

ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

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

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY AND
GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 16
№ 3 / 2026**

Владикавказ 2026

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

Республиканский Центр сейсмологической службы при НАНА, Азербайджан

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

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

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

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

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2026

Фото на обложке – Святилище Реком в Цейском ущелье (К. С. Харебов)

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

Editor in Chief

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

Deputy Editor in Chief

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

Members of Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Executive Secretary

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

Managing Editor

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

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

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

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

Founder:

Vladikavkaz Scientific Centre of RAS

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

Publisher:

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

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

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

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2026

Cover photo – The Rekom Shrine in the Tsey Valley (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
Газеев В.М., Кондрашов И.А.	
Среднепалеозойские адакитовые гранитоиды кристаллического основания Передового хребта Большого Кавказа	8
ГИДРОГЕОЛОГИЯ	
Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И.	
Теоретические основы селективного способа отбора воды из внутреннего пространства стратифицированного водоема	22
Новиков Д.А., Черных В.В., Яндола Н.И., Дульцев Ф.Ф.	
Радионуклидный состав природных вод Крымского полуострова	34
ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Докукин П.А., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Байрамов А.Н.	
Пространственно-временной анализ современных движений земной коры Западного Кавказа на основе ГНСС-измерений и оценка конфигурации региональной геодинамической сети	47
ГЕОФИЗИКА	
Аверин А.А., Дмитриев А.В., Едемский Д.Е., Заалишвили В.Б., Корженков А.М., Ларьков А.С., Овсяченко А.Н., Попов А.В., Прокопович И.В.	
Георадиолокационные исследования дольменов Черноморского побережья Кавказа: первые результаты и методические аспекты	58
Голик В.И.	
Геофизическое обеспечение горного производства	70
Евсюков Д.Ю., Потапов Б.В., Бабкина А.В., Журавлёв М.В., Мигда Н.С.	
Система прогнозирования зон повышенного геодинамического риска на основе комплексного анализа геофизических полей	79
Кукарцев В.В., Степанцевич М.Н., Водяников В.Т., Прудкий А.С., Козенкова Г.Л.	
Применение сверточных нейронных сетей для автоматического выделения микросейсмических событий в данных локального мониторинга Северного Кавказа	91
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Керимов А.Г.Г., Максимова Н.А., Шерстюков М.П., Мкртчян Л.С., Керимова Е.Г.	
Определение стратиграфической принадлежности пачки органогенно-обломочных известняков пограничных отложений аалена-байоса Лабино-Малкинской зоны (Северный Кавказ)	104
Парада С.Г., Рыбин И.В., Шевердяев И.В.	
Морфометрический анализ Донецкого складчатого сооружения в связи с проблемой рудоносности	114
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Хуторской М.Д., Керимов В.Ю., Гурянов С.А., Мустаев Р.Н.	
Двух- и трехмерные модели геотермического поля Каспийского моря	123
ГЕОЭКОЛОГИЯ	
Атаев З.В., Керимов И.А.	
Геоинформационное среднемасштабное ландшафтное картографирование трансграничных бассейнов горных рек Прикаспийского региона Кавказа	141

Ермолаева О.С., Тынченко В.С., Горбачев С.И., Рожков Е.А., Герасиди В.В.	
Оценка эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России по данным лидарной съемки и цифрового моделирования рельефа	152
Заалишвили В.Б., Ревазов М.О., Мельков Д.А., Бурдзиева О.Г., Архиреева И.Г.	
Геоэкологическое районирование горных территорий Центрального Кавказа: классификация по уровням нагрузки и типам риска.....	164
Каширина Е.С., Горбунова Т.Ю., Фам К.Н., Гагаева З.Ш.	
Содержание потенциально токсичных химических элементов в растениях бассейнов горных рек Каспийского региона.....	175
Красиков В.А., Кораблева Г.В., Пчелкин В.В., Вахрушева И.А., Штырхунова Н.А.	
Интеллектуальная классификация нефтезагрязненных территорий по данным геоэкологического мониторинга	186
Курашкин С.О., Торопцев В.В., Пучкова О.С., Ягудаева Н.А., Кузнецова Ю.С.	
Влияние селевых процессов на трансформацию почвенно-растительного покрова Центрального Кавказа	198
Курбатова И.Е., Мулин М.О.	
Организация комплексного мониторинга заливов русловых водохранилищ Юга России с использованием данных дистанционного зондирования	212
Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М.	
Современное состояние вод р. Камбилеевки и её притоков	226
Фокеев Е.В., Суховеева О.Э., Ольчев А.В., Керимов И.А.	
Межгодовая и сезонная изменчивость углеродного обмена широколиственного леса Северного Кавказа по результатам биогеохимического моделирования	237
ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА	
Харисов Т.Ф., Балек А.Е., Прищепа Д.В., Коптяков Д.А., Масальский Н.А.	
Методика расчета параметров комбинированной крепи выработок в условиях неустойчивого массива	252
ГЕОИНФОРМАТИКА	
Колбовский Е.Ю., Гуня А.Н., Пуреховский А.Ж.	
Кластеризация рельефа и землепользования в муниципальных образованиях Северного Кавказа	264
Маммаев О.А., Мамаев А.С., Магомедов Р.А.	
Использование космической информации в комплексе с наземными геологическими исследованиями на территории Восточного Кавказа	276
ЮБИЛЕИ	
Василий Иванович Черкашин	288

CONTENTS

===== GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =====	
Gazeev V.M., Kondrashov I.A.	
Middle paleozoic adakite granitoids of the crystalline basement of the Foreland Range of the Greater Caucasus	8
===== HYDROGEOLOGY =====	
Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I.	
Theoretical foundations of the selective method of water extraction from the interior of a stratified reservoir.....	22
Novikov D.A., Chernykh V.V., Yandola N.I., Dultsev F.F.	
Radionuclide composition of natural waters of the Crimean Peninsula.....	34
===== GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =====	
Dokuin P.A., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Bayramov A.N.	
Present-day crustal movements in the Western Caucasus region from GNSS data and analysis of the regional geodynamic network configuration.....	47
===== GEOPHYSICS =====	
Averin A.A., Dmitriev A.V., Edemsky D.E., Zaalishvili V.B., Korzhenkov A.M., Larkov A.S., Ovsyuchenko A.N., Popov A.V., Prokopovich I.V.	
Ground penetrating radar surveys of dolmens on the Black Sea coast of the Caucasus: initial results and methodological aspects	58
Golik V.I.	
Geophysical support of mining	70
Evsyukov D.Yu., Potapov B.V., Babkina A.V., Zhuravlev M.V., Migda N.S.	
System for predicting areas of elevated geodynamic risk based on integrated analysis of geophysical fields	79
Kukartsev V.V., Stepansevich M.N., Vodyannikov V.T., Prudkiy A.S., Kozenkova G.L.	
Application of convolutional neural networks for automatic detection of microseismic events in local monitoring data of the North Caucasus.....	91
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY =====	
Kerimov A.G.G., Maksimova N.A., Sherstyukov M.P., Mkrtchyan L.S., Kerimova E.G.	
Identification of the Stratigraphic Position of a Bioclastic Limestone Unit in the Aalenian–Bajocian Boundary Deposits of the Laba-Malka Zone (North Caucasus)	104
Parada S.G., Rybin I.V., Sheverdyayev I.V.	
Morphometric analysis of the Donetsk folded structure in connection with the ore-bearing potential	114
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS =====	
Khutorskoy M.D., Kerimov V.Yu., Guryanov S.A., Mustaev R.N.	
2D and 3D models of the geothermal field of the Caspian Sea.....	123
===== GEOECOLOGY =====	
Ataev Z.V., Kerimov I.A.	
Geoinformation medium-scale landscape mapping of transboundary mountain-river basins in the Caspian region of the Caucasus.....	141
Ermolaeva O.S., Tynchenko V.S., Gorbachev S.I., Rozhkov E.A., Gerasidi V.V.	
Assessment of erosion resistance of bank slopes of reservoirs in the South of Russia based on LiDAR survey data and digital terrain modeling.....	152

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

Geoecological zoning of mountain regions in the Central Caucasus: classification by load levels and risk types 164

Kashirina E.S., Gorbunova T.Yu., Pham C.N., Gagaeva Z.Sh.

Content of potentially toxic chemical elements in plants of mountain river basins of the Caspian region 175

Krasikov V.A., Korableva G.V., Pchelkin V.V., Vakhrusheva I.A., Shtyrkhunova N.A.

Intelligent classification of oil-contaminated areas based on geoecological monitoring data 186

Kurashkin S.O., Toroptsev V.V., Puchkova O.S., Yagudaeva N.A., Kuznetsova Yu.S.

The influence of debris-flow processes on the transformation of soil and vegetation cover
of the Central Caucasus 198

Kurbatova I.E., Mulin M.O.

Organization of comprehensive monitoring of embayments in channel reservoirs of Southern Russia
using remote sensing data 212

Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M.

The current status of the Kambileyevka River and its tributaries 226

Fokeev E.V., Sukhoveeva O.E., Olchev A.V., Kerimov I.A.

Interannual and seasonal variability in the carbon cycle of a broadleaf forest in the North Caucasus, based
on biogeochemical modeling results 237

GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS

Kharisov T.F., Balek A.E., Prishchepa D.V., Koptiyakov D.A., Masalskiy N.A.

Method for calculating the parameters of combined support for mine workings in an unstable rock mass 252

GEOINFORMATICS

Kolbovsky E.Yu., Gunya A.N., Purekhovsky A.Zh.

Clustering of terrain and land use in municipalities of the North Caucasus 264

Mammaev O.A., Mamaev A.S., Magomedov R.A.

The use of space-based information in conjunction with ground-based geological surveys
in the Eastern Caucasus 276

JUBILEES

Vasily Ivanovich Cherkashin 288

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC.2026.15.69.001

Оригинальная статья

Среднепалеозойские адакитовые гранитоиды кристаллического основания Передового хребта Большого Кавказа

В.М. Газеев^{1,2}, И.А. Кондрашов¹

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

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

Статья поступила: 28.01.2026, доработана: 23.07.2026, принята к публикации:2026

Резюме: Актуальность работы. Изучение гранитов зоны Передового хребта Большого Кавказа, сформировавшихся в среднем палеозое, — интересная и важная задача в связи с тем, что с ними в регионе ассоциируют рудные объекты с молибденовой и вольфрамовой минерализацией. **Целью исследования** является получение аналитических данных, уточнение геодинамической позиции и рудной специализации среднепалеозойских гранитоидов. **Объектами исследований** являлись массивы гранитогнейсов, обнажающиеся в кристаллическом основании Передового хребта Большого Кавказа, в междуречье Большой и Малой Лабы. **Методы исследования** включали: изучение состава отобранных образцов количественными XRF, ICP-MS методами, их петрографическое описание, расчеты геохимических характеристик, анализ дискриминационных диаграмм. **Результаты исследования.** Установлено, что гранитогнейсы являются нормально- и умеренно-щелочными, умеренно- и высокомагнезиальными, умереннокалиевыми образованиями. Показано, что они являются гранитоидами адакитового типа, характеризуются высокими содержаниями Na_2O , Ba, Sr, LiLe, LREE и высокими величинами Sr/Y 60 – 190 и La_n/Yb_n 13 – 40 отношения, при пониженных содержаниях CaO, HFSE, HREE, Y, Yb. Предполагается, что их исходные расплавы формировались в надсубдукционных условиях на значительных глубинах (P15–16 кбар). Плавающимся протолитом являлись нижнекоровые, гранатовые амфиболиты при термальном и флюидном участии субдуцированной океанической коры. Отмечено, что с породами ассоциирует гидротермальное оруденение кварц-шеелитовой формации.

Ключевые слова: геодинамика, граниты, адакиты, геохимия, минерагения.

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

Для цитирования: Газеев В.М., Кондрашов И.А. Среднепалеозойские адакитовые гранитоиды кристаллического основания Передового хребта Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): ...-... DOI: 10.46698/VNC.2026.15.69.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.15.69.001

Original paper

Middle Paleozoic adakite granitoids of the crystalline basement of the Foreland Range of the Greater Caucasus

V.M. Gazeev^{1,2}, I.A. Kondrashov¹

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

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

Received: 28.01.2026, revised: 23.07.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The study of granites in the Foreland Range of the Greater Caucasus, which were formed in the middle Paleozoic, is an interesting and important task due to the fact that ore objects with molybdenum and tungsten mineralization are associated with them in the region. **The aim** of the study is to obtain analytical data and to clarify the geodynamic position and ore specialization of middle Paleozoic granitoids. **The objects of research** were the granitogneiss masses exposed in the crystalline basement of the Foreland Range of the Greater Caucasus in the interfluvium of the Bolshaya and Malaya Laba rivers. **The research methods** included: study the composition of the selected samples by *XRF*, *ICP-MS* methods, their petrographic description, calculating geochemical characteristics, and analyzing discrimination diagrams. **Results.** It has been established that granitogneisses are normally and moderately alkaline, moderately and highly magnesian, and moderately potassium formations. It has been shown that they are adakitic granitoids characterized by high contents of Na_2O , Ba , Sr , $LiLe$, $LREE$, and high Sr/Y 60–190 and La_n/Yb_n 13 – 40 ratios, with low CaO , $HFSE$, $HREE$, Y , and Yb . It is assumed that their initial melts were formed in supra-subduction conditions at significant depths (P15–16 kbar). The melting protolith was a lower-crustal garnet amphibolite, with thermal and fluid participation of the subducted oceanic crust. It has been noted that the hydrothermal mineralization of the quartz-scheelite formation is associated with the rocks.

Keywords: geodynamics, granites, adakites, geochemistry, mineral genesis.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the Basic Theme of the Petrology Laboratory of the IGM RAS “Petrology of Magmatic Complexes for Reconstruction of Geodynamic Modes of Formation of the East European Craton” (reg. No. FMMN-2024-0014.124022400143-9) and financial support from the NIOKR KNIO VSC RAS (reg. No. 125022803010-6).

For citation: Gazeev V.M., Kondrashov I.A. Middle paleozoic adakite granitoids of the crystalline basement of the Foreland Range of the Greater Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): ... DOI: 10.46698/VNC.2026.15.69.001

Введение

Петролого-геохимическое изучение гранитов кристаллического основания Передового хребта (ПХ) Большого Кавказа (БК), сформировавшихся в среднем палеозое, является важной задачей. Ее актуальность определяется тем, что с ними пространственно ассоциирует Большеблыбское шеелитовое месторождение и рудопроявления с вольфрам-молибден-полиметаллической минерализацией. **Целью исследования** было изучение геохимических особенностей гранитогнейсов, залегающих среди пород армовского, балканского и бескесского метаморфических комплексов, в междуречье Большой и Малой Лабы (рис. 1).

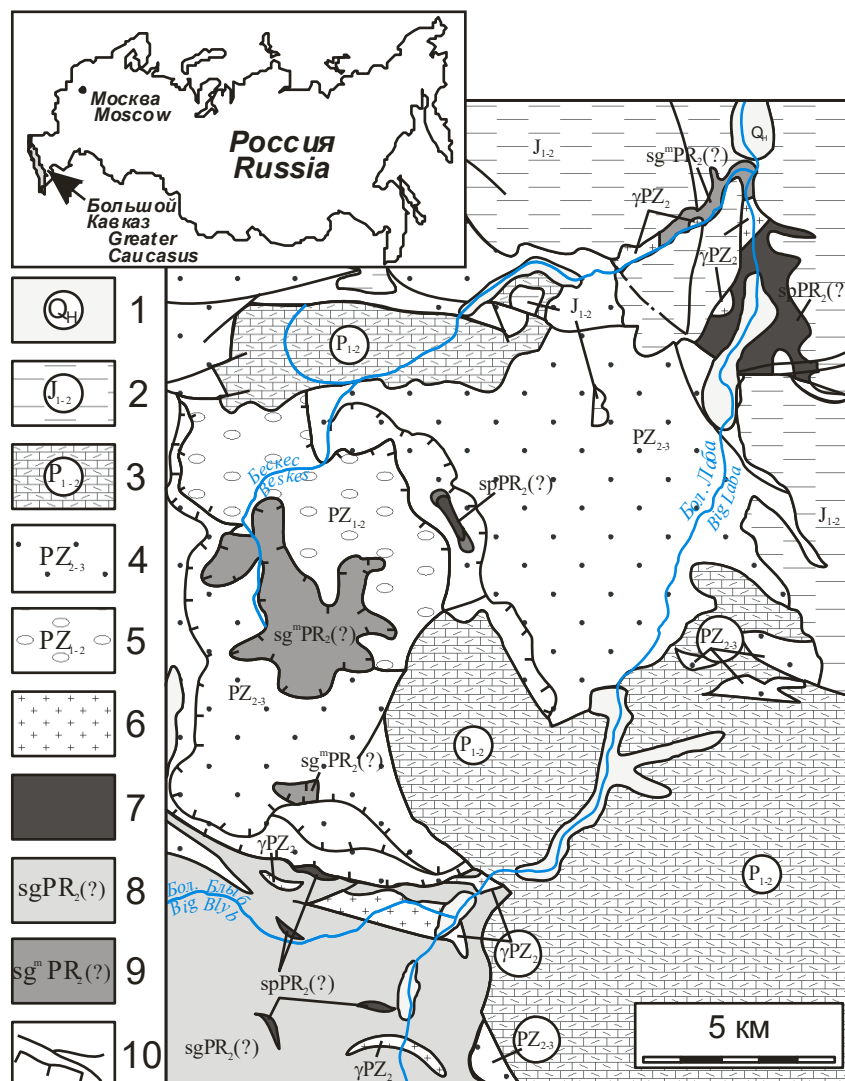


Рис. 1. Схематичная геологическая карта района распространения интрузий среднепалеозойских гранитоидов в долине р. Большая Лаба (по материалам ФГУГП «Кавказгеолсъемка», лист К-37-V. 2002 г.).

Условные обозначения: 1–5. Разновозрастные толщи вулканогенных и осадочных пород: 1 – четвертичные; 2 – ранне-среднеюрские (Аргиллиты рассланцованные с прослоями алевролитов и кварцевых песчаников. Песчаники кварцевые, туфопесчаники с линзами гравелитов, прослои алевролитов, аргиллитов и туфов андезитов); 3 – пермские (Мраморизованные известняки светло-серые и темные с прослоями глинистых сланцев. Гравелиты, песчаники и конгломераты с прослоями алевролитов); 4 – средне- и позднпалеозойские (амфиболит-сланцевый метакомплекс); 5 – ранне-среднпалеозойские (амфиболит-гнейсовый метакомплекс). 6–7. Магматические породы: 6 – граниты, гранодиориты; 7 – серпентиниты. 8–9. Метаморфические породы: 8 – амфиболиты, гнейсы; 9 – кристаллические сланцы. 10 – геологические границы /

Fig. 1. Schematic geological map of the area of intrusions of middle paleozoic granitoids in the Bolshaya Laba river valley (based on the materials of the FGUGP "Kavkazgeols'emka", sheet K-37-V. 2002).

Legend. 1–5. Heterogeneous strata of volcanic and sedimentary rocks: 1 – Quaternary; 2 – early-middle Jurassic (Laminated mudstones with interbeds of siltstones and quartz sandstones. Quartz sandstones, tuff sandstones with lenses of gravelites, interlayers of siltstones, mudstones and tufts of andesites); 3 – Permian (Marbled limestones are light gray and dark with interlayers of clay shales. Gravelites, sandstones and conglomerates with siltstone interbeds); 4 – middle and late Paleozoic (amphibolite-gneiss metacomplex); 5 – early-middle Paleozoic (amphibolite-shale metacomplex). 6–7. Igneous rocks: 6 – granites, granodiorites; 7 – serpentinites. 8–9. Metamorphic rocks: 8 – amphibolites, gneisses; 9 – crystal schists. 10 – Geological boundaries

Определение их петрохимического типа, минерагенической специализации и реконструкция геодинамических условий, существовавших в регионе в период формирования пород. **Объектами для исследования** выбраны 2 массива, вскрытые эрозийной деятельностью р. Большая Лаба и её притоков. 1 – Массив р. Большой Блыб, размером до 5 км² сложенный гранодиоритами и плагиогранитами. По внешнему облику это серые, зеленовато-серые, иногда розоватые средне- и мелкозернистые породы с гнейсовидной текстурой. Поздние фазы представлены секущими телами аплитов, пегматитов и их производными кварц-мусковитовыми жилами. Величины стронциевых отношений (Sr^{87}/Sr^{86}) в породах варьируют в пределах от 0,70407 до 0,70442 [Gurbanov et al., 1994]. Характерной особенностью пород является высокое содержание стронция, что приводит к появлению в пегматитах стронцийсодержащего цоизита и целестина [Афанасьев и др., 1976]. С породами массива пространственно ассоциирует Блыбское шеелитовое месторождение и ряд рудопроявлений вольфрама [Gurbanov et al., 1994; Глазырин, 2004]. 2 – Массив р. Мощевой размером до 5 км² расположен в 22–23 км, севернее первого. Сложен он среднезернистыми серыми и розоватыми гранитами с отчетливо выраженной гнейсовидной текстурой. Поздние фазы представлены аплитами.

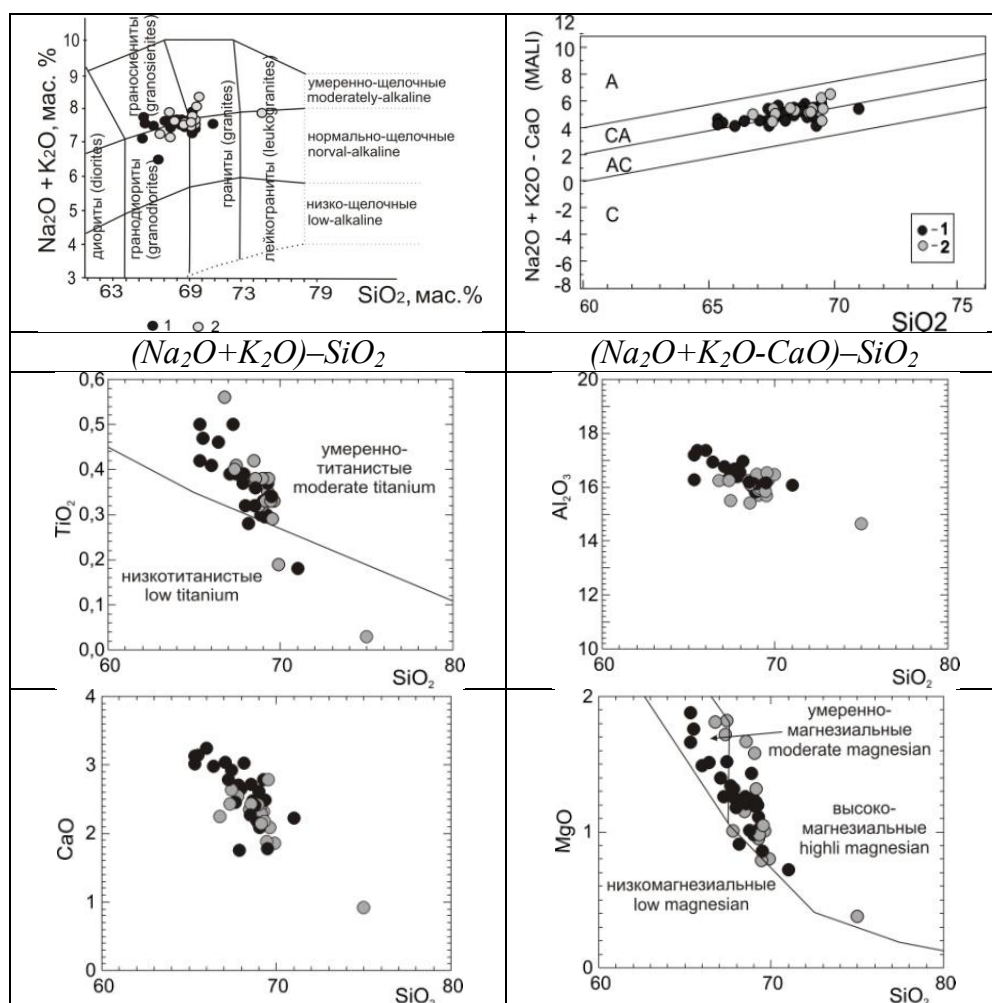
Возраст пород все еще остается дискуссионным. На основании наиболее древних датировок $T = 400\text{--}460$ Ma ($Sm\text{--}Nd$), $T = 350\text{--}380\text{--}450$ Ma ($K\text{--}Ar$), $T = 376\text{--}470$ Ma ($Rb\text{--}Sr$) он предполагается раннепалеозойским (ордовик), что отражено на геологической карте $K\text{--}37\text{--}V$ [Лаврищев и др., 2002]. Новые данные о возрасте пород армовского и бескесского метаморфических комплексов [Омельченко, 2021] позволяют относить их к среднепалеозойским образованиям. Исследования по цирконометрии показывают, что возраст магматической стадии гранитогнейсов, вероятно, был девонским, около 390 Ma [Somn, 2011], и в последующем породы претерпели метаморфические изменения в поздневарисийскую эпоху, около 285 млн лет назад [Чернышев и др., 1987].

Материал и методы его исследования

Изучена коллекция образцов, собранная в 2020 году по бортам долины р. Большая Лаба и ее притокам: Большой Блыб, Мощевой. Аналитические данные получены в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика» методами рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре «Респект-100» (8 проб) и спектроскопии с индукционно-связанной плазмой ($ICP\text{--}MS$) на масс-спектрометре $X\text{--}Series II$ (13 проб). Контроль точности анализов осуществлялся с использованием российских и международных стандартов применяемых в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика». Потери при прокаливании ($ППП$) для (XRF) определены обычным весовым методом. При построении диаграмм дополнительно использованы результаты анализов (36 проб), полученные в разные годы А.Г. Гурбановым. Анализы по массиву р. Мощевой были выполнены методом XRF на квантометре $CPM\text{--}25$ и инструментальным нейтронно-активационным методом в Лаборатории ядерно-физических исследований ИГЕМ РАН. Анализы по массиву р. Большой Блыб были выполнены на рентгеноспектрометре ($PHILIPPS PW1400$) в Институте геологических наук и изучения литосферы г. Гессена (Германия).

Полученные результаты. На классификационной диаграмме $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$ (рис. 2) фигуративные точки (ФТ) составов изученных пород располагаются в полях гранодиоритов и гранитов. Гранодиориты и граниты встречаются совместно и сложены они единым набором минералов, которые представлены обычно не зональным плагиоклазом (альбит, олигоклаз), деформированным кварцем, микроклином, мусковитом, клиноцоизитом; реже отмечается хлорит, цоизит, эпидот, карбонат. Акцессорные минералы: сфен, апатит, циркон. Для пород массива р. Мощевой характерна преимущественно плейрогнейсовая структура, обусловленная развитием в индивидах плагиоклаза обильных новообразований, представленных мусковитом и, реже, клиноцоизитом.

Ориентировка пластинок слюды часто зависит от кристаллографических элементов плагиоклаза. Появление такой структуры связывают с ретроградным метаморфизмом пород, при котором плагиоклаз средней основности замещается альбитом, цоизитом и слюдой. Текстура гнейсовая, линзовидно-полосчатая. Отмечаются участки с гранобластовой структурой, сложенные ксеноморфными субизометричными кристаллами незонального альбит-олигоклаза, иногда с включениями слюды (реликтовые фрагменты плейрогнейсовой структуры) и катаклазированного кварца, а также более слюдистые линзовидные участки обогащенные мусковитом, клиноцоизитом, сфеном, хлоритом с лепидогранобластовой структурой. Массив р. Большой Блыб обладает аналогичным минералогическим составом пород и структурно-текстурными характеристиками. Более ранний этап – плейрогнейсовый узор. В дальнейшем в связи с наложенными деформациями развивается типично метаморфические грано- и лепидогранобластовые структурные узоры с реликтовыми плейрогнейсовыми участками. На диаграмме $(Na_2O + K_2O - CaO) - SiO_2$ [Frost et al., 2001] (рис. 2) ФТ пород группируются по линии разделяющей поля щелочно-известковистых и известково-щелочных гранитоидов $Na_2O + K_2O$ от 7,12% до 8,31% (табл. 1) $\Sigma(Na_2O + K_2O)/n$ 7,61%, $n=75$. На диаграммах $SiO_2 - \text{петрогенные элементы}$ отмечается, что породы относятся к умереннотитанистым; умеренно- и высокомагнезиальным $Mg^\#$ 0,42–0,62; умереннокалиевым образованиям K_2O от 1,75 до 2,95 ($\Sigma K_2O/n = 2,34\%$). Они характеризуются низкими содержаниями CaO 1,75–3,03 ($\Sigma CaO/n = 2,24\%$) высокими содержаниями Na_2O 4,28–5,64 ($\Sigma Na_2O/n = 5,27\%$). Это пересыщенные глиноземом $(CaO + Na_2O + K_2O) < Al_2O_3$; $Al^I = 4,28$ породы с калиево-натриевым типом щелочности Na_2O/K_2O 1,54–3,22.



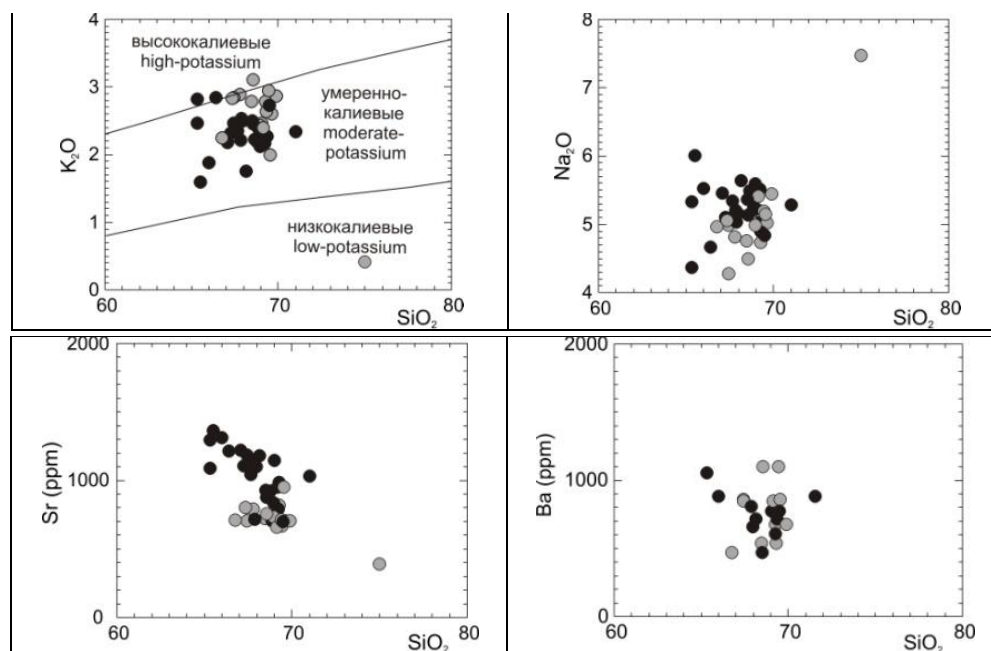


Рис. 2. Составы пород на классификационных диаграммах и диаграммах концентраций петрогенных компонентов (в мас. %). Условные обозначения: 1 – гранитоидный массив р. Большой Блыб, 2 – гранитоидный массив р. Моцовой.

На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})-\text{SiO}_2$ поля гранитоидов: С – известковистых,

АС – щелочно-известковистых, СА – известково-щелочных, А – щелочных /

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

Таблица 1 / Table 1

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

Образец / Sample	71/20	73/20	75/20	77/20	78/20	65/20	67/20	69/20
SiO ₂	69,47	68,16	67,87	65,31	68,5	69,87	69,44	67,41
TiO ₂	0,34	0,28	0,39	0,5	0,32	0,19	0,33	0,41
Al ₂ O ₃	16,15	16,97	16,71	16,27	16,19	16,32	15,85	15,49
Fe ₂ O ₃	2,31	2,03	2,61	3,43	1,55	1,34	2,21	3,11
MnO	0,03	0,03	0,03	0,05	0,4	0,02	0,04	0,05
MgO	0,86	0,91	1,25	1,88	1,26	0,8	0,79	1,82
CaO	1,78	3,03	1,75	3,01	2,27	1,86	1,88	2,64
Na ₂ O	4,84	5,64	5,03	4,37	5,36	5,44	5,19	4,28
K ₂ O	2,73	1,75	2,53	2,82	2,5	2,87	2,95	2,84
P ₂ O ₅	0,15	0,08	0,19	0,25	0,15	0,07	0,14	0,22
Ппп / LOI	1,01	0,76	1,30	1,65	1,4	0,92	0,79	1,36
Сумма / Total	99,67	99,64	99,66	99,54	99,9	99,7	99,61	99,63
Cr	25	30	30	52	10	31	15	47
V	47	41	52	62	55	32	44	64
Co	4,2	4,73	6,26	9,73	5,96	2,62	3,56	6,76

Ni	12	20	24	30	5	19	13	29
Cu	13	24	41	22	15	13	14	10
Zn	50	34	47	68	58	31	39	55
Pb	26	31	16	33	21	37	21	45
Rb	83	38	61	62	54	76	68	75
Sr	705	1265	785	1194	685	650	735	686
Ba	1067	950	1066	1353	500	966	1386	1132
Zr	117	100	122	131	140	71	108	117
Y	6,51	5,06	4,3	7,78	5,82	3,08	14,14	9,17
Li	8,11	11,2	26,1	20,3	14,6	12,4	10,4	20,2
Be	2,28	1,73	1,96	2,55	1,75	2,64	2,52	3,08
Sc	1,18	1,72	3,41	5,17	4,28	0,48	3,59	3,9
Ti	2024	1623	2378	3012	2703	974	1864	2492
Nb	4,04	2,92	2,73	4,88	2,31	1,93	9,24	7,34
Mo	0,9	0,61	1,03	1,24	0,3	0,87	1,24	0,68
Ga	16,7	16,8	18,8	21,2	15,9	14,8	18,0	16,7
Cs	3,5	0,98	2,0	2,28	1,37	1,73	1,49	2,01
La	20,9	17,6	6,7	14,3	26,9	13,7	21,9	46,6
Ce	31,1	39,9	26,8	35,6	52,8	15,8	30,4	36,2
Pr	3,96	4,68	2,58	4,5	6,83	2,09	3,71	4,47
Nd	15,3	17,4	10,0	17,8	23,3	7,5	14,43	17,62
Sm	2,88	2,85	2,03	3,42	3,72	1,28	2,92	3,24
Eu	0,85	0,9	0,75	1,05	0,96	0,6	0,96	0,94
Gd	2,17	1,91	1,56	2,46	2,28	0,98	2,49	2,39
Tb	0,27	0,23	0,2	0,31	0,3	0,12	0,4	0,32
Dy	1,35	1,1	1,02	1,62	1,2	0,6	2,45	1,65
Ho	0,23	0,19	0,18	0,29	0,25	0,12	0,48	0,33
Er	0,65	0,5	0,43	0,75	0,54	0,3	1,41	0,92
Tm	0,08	0,07	0,06	0,1	0,09	0,04	0,19	0,14
Yb	0,53	0,42	0,37	0,65	0,55	0,28	1,2	0,9
Lu	0,08	0,07	0,06	0,1	0,1	0,05	0,16	0,14
Hf	3,24	2,71	3,18	3,66	4,12	2,03	3,04	3,53
Ta	0,3	0,23	0,13	0,34	0,21	0,15	1,64	0,47
W	0,5	0,3	0,3	0,3	0,02	0,5	0,3	0,3
Bi	0,07	0,03	0,07	0,15	0,05	0,02	0,12	0,05
Th	5,8	5,3	3,5	3,8	8,4	4,2	5,5	6,3
U	1,2	1,3	1,2	1,7	2,9	1,0	2,9	3,8

Примечание: 69, 73, 75, 77, 78/20 гранодиориты; 65,67,71/20 граниты. Место отбора образцов: 71, 73, 75, 77, 78/20 р. Большой Блыб; 65, 67, 69/20 р. Мошевая. XRF Cr-Y; ICP-MS Li-U / Note: 69, 73, 75, 77, 78/20 granodiorites, 65,67,71/20 granites. Sampling location: 71, 73, 75, 77, 78/20 p. Large Blyb river; 65, 67, 69/20 Mostovaea river. XRF Cr-Y; ICP-MS Li-U.

Индикаторные отношения геохимически сходных элементов $Zr/Hf = 33$ и $K/Rb = 365$ указывают на возможную дифференциацию расплавов, а $U/Th (0,39) < 1$ – на неизменность составов пород вторичными процессами. На дискриминационной диаграмме (ДД) $Rb/30 - Hf - Ta \times 3$ [Harris et al., 1986] (рис. 3) ФТ ЧК группируются в поле VAG гранитов вулканических дуг. Следует отметить, что ФТ расположенные в полях (Post-COLG; WPG) характеризуют образцы, отобранные вблизи пегматитовых и кварц-мусковитовых прожилков.

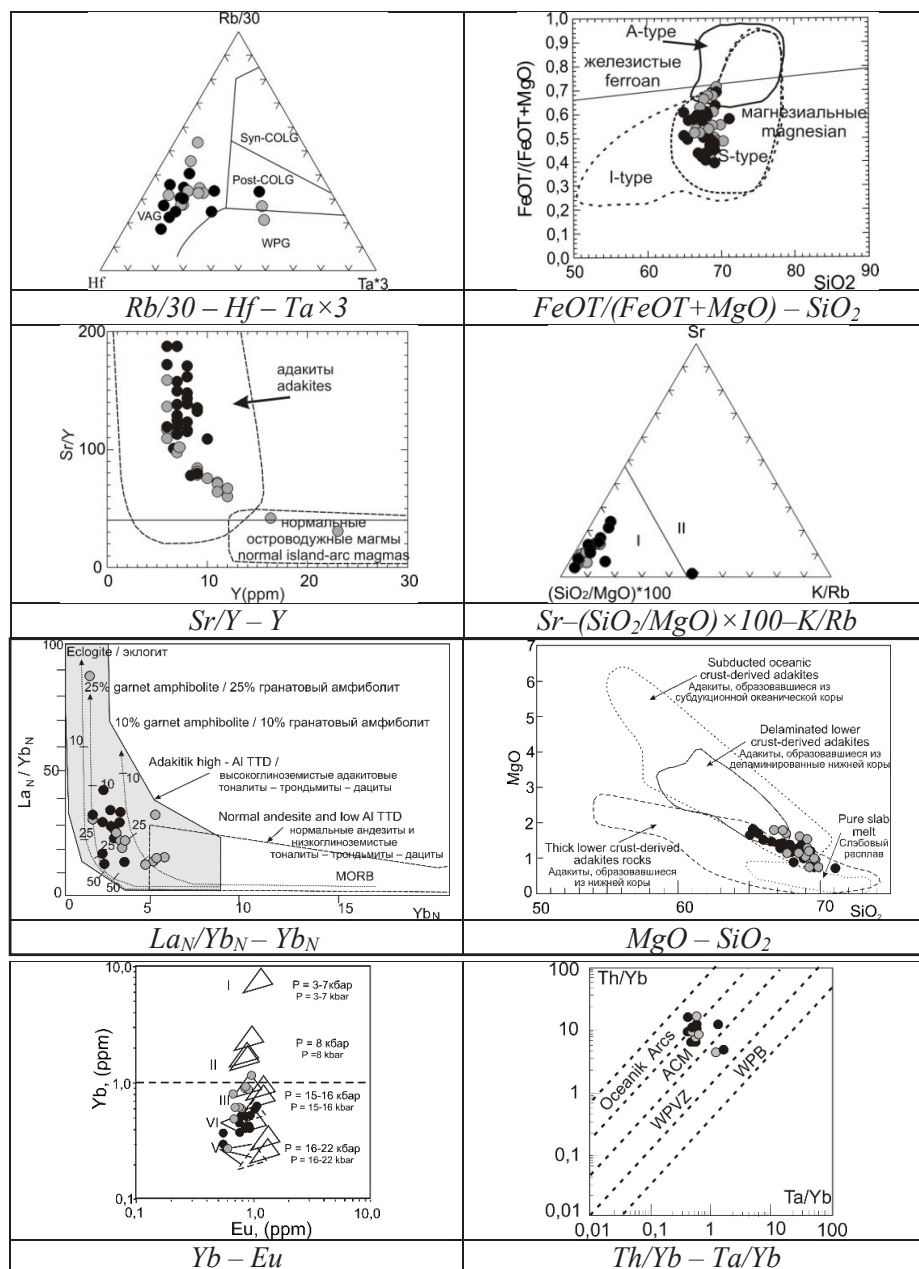


Рис. 3. Составы пород на петрогенетических диаграммах.

Условные обозначения: На диаграммах $Rb-(Y+Nb)$, $Rb/30 - Hf - Ta \times 3$:

VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – граниты синколлизийные, post-COLG – граниты постколлизийные, WPG – граниты внутриплитные.

На $Sr-(SiO_2/MgO) \times 100 - K/Rb$ поля адакитов: I – высококремнистых, II – низкокремнистых.

На $La_N/Yb_N - Yb_N$ поля: Adakitik high – Al TTD высокоглиноземистые адакитовые тоналиты – трондьмиты – дациты; Normal andesite and low Al TTD – нормальные андезиты и низкоглиноземистые тоналиты – трондьмиты – дациты.

На $Yb - Eu$ P – давление в кбар; На $Th/Yb - Ta/Yb$ Oceanic Arcs – океанических дуг, ACM – активных континентальных окраин,

WPVZ – внутриплитных вулканических зон, WPB – внутриплитных базальтов /

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

На ДД $FeOT/(FeOT+MgO) - SiO_2$ [Frost et al., 2001] с линией разграничения магнезиальных и железистых гранитоидов, ФТ пород группируются в области магнезиальных образований, в поле гранитов S и I типа. Сравнение содержаний оксидов и типоморфных элементов с эталонами гранитов I, S типа [Туркина, 2014] показывает, что изученные породы отличаются от этих стандартов существенно меньшими содержаниями CaO , K_2O , Rb , Nb , Ce , Zr , Y и большими содержаниями Na_2O , Ba , Sr . Массив р. Большой Блыб Na_2O 5,37%, Ba 685–1265 ($\Sigma Ba/n = 987$ ppm), Sr 500–1353 ($\Sigma Sr/n = 927$ ppm); массив р. Мощевой Na_2O 5,18%, Ba 966–1386 ($\Sigma Ba/n = 1161$ ppm), Sr 650–735 ($\Sigma Sr/n = 690$ ppm). На ДД $Sr/Y - Y$ [Defant, Drummond, 1990] ФТ пород расположены в поле адакитов, а на ДД $Sr-(SiO_2/MgO) \times 100 - K/Rb$ [Martin et al., 2005] – в поле высококремнистых адакитов. На ДД $La_N/Yb_N - Yb_N$ – в поле высокоглиноземистых адакитовых тоналитов – трондьмитов – дацитов [Defant, Drummond, 1990; Xu et al., 2000] вблизи трендов плавления гранатовых амфиболитов. На ДД $MgO - SiO_2$ [Gan et al., 2022] ФТ сгруппированы в пограничной зоне между нижнекоровыми адакитами и адакитами, образованными при участии субдуцированной океанической коры. На ДД $Yb - Eu$ [Туркина, 2000] ФТ расположены вблизи треугольных полей модельных составов, образующихся в результате плавления исходных пород при давлениях ~ 15 – 16 кбар, что соответствует ориентировочно глубине 52–56 км. На ДД $Th/Yb - Ta/Yb$ [Gorton, Schandl, 2000] ФТ находятся в поле пород океанических островных дуг и активных континентальных окраин. Графики концентрации редкоземельных элементов (REE) нормированных по хондриту [Sun, McDonough, 1989] показаны на (рис. 4). La_n/Yb_n отношение (показатель степени фракционирования REE) 13,1–35,9. La_n/Sm_n 2,0–9,2. Gd_n/Yb_n 1,7–3,7. Eu/Eu^* где ($Eu^* = (Sm_n + Gd_n)/2$) 0,9–1,2. ΣREE г/т 43–119 $\Sigma REE/n = 78$. На мультиэлементных спайдер-диаграммах, где показаны несовместимые элементы, нормированные по N-MORB [Sun, McDonough, 1989], можно отметить: – высокие содержания крупноионных литофильных элементов Rb , Ba , K , Sr (LiLe), радиоактивных элементов Th , U ; – пониженные содержания высокочarged элементов HFSE, тяжелых редкоземельных элементов HREE и Y . А также негативные аномалии Ta , Nb , Ti .

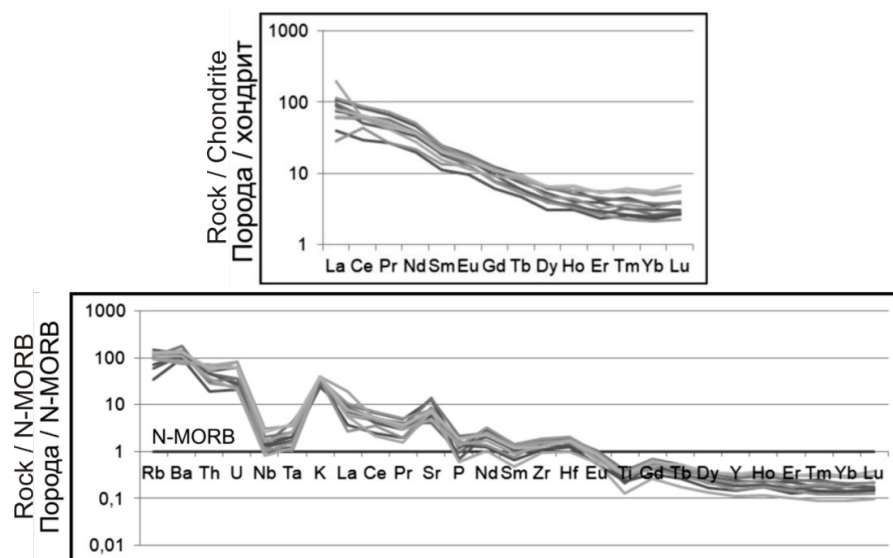


Рис. 4. Составы пород на спайдер-диаграммах.
Концентрации несовместимых элементов нормированы по N – MORB, концентрации REE нормированы к хондриту по [Sun, McDonough, 1989] /

Fig. 4. Composition of rocks on spider diagrams. Concentrations of incompatible elements are normalized by N – MORB, REE concentrations are normalized to chondrite by [Sun, McDonough, 1989]

Ранжированный ряд кларков концентрации ($K_k \geq 1,0$) рассчитанный по кларкам кислых пород [Гусев и др., 1999] имеет следующий вид: $Sr_{3,3}$; $Ni_{2,1}$; $Pb_{1,3}$; $Cr_{1,2}$; $Cd_{1,1}$; $Ti_{1,0}$; $Ba_{1,0}$; $Ga_{1,0}$. Его сравнение с породами эталонных геодинамических обстановок показывает, что изученные гранитоиды вполне сопоставимы с образованиями зрелых островных дуг и краевых вулканоплутонических поясов активных континентальных окраин.

Обсуждение результатов

Исходя из вышеописанного гранитогнейсы кристаллического основания ПХ БК, распространенные в Лабинском междуречье, до метаморфических преобразований были типичными ортомагматическими породами, слагавшими небольшие интрузивные тела, становление которых происходило в гипабиссальных условиях. Отсутствие классических магматических структурных узоров с заменой их на плейрогнейсовые и лепидогранобластовые указывает на последующее аутометасоматическое и динамометаморфическое (структурное) перерождение пород без существенного изменения исходного состава. На изохимические условия этих преобразований указывает компактное положение фигуративных точек на диаграммах. Гранитогнейсы содержат SiO_2 65–70%, Al_2O_3 15,5–16,9%; характеризуются высокими содержаниями Na_2O , Ba , Sr , $LiLe$, $LREE$, и высокими значениями характерных отношений La/Yb , Sr/Y 60–190, $Mg^\#$ 0,42–0,62. Для них также характерны пониженные содержания CaO , $HFSE$, $HREE$, Y 3–14 г/т, Yb 0,3–1,2 г/т. На петрогенетических диаграммах ФТ пород расположены в полях гранитов адакитового типа. Отметим, что для адакитов показательны высокие содержания: $SiO_2 > 56\%$, $Al_2O_3 > 15\%$, Sr , $LiLe$, La/Yb , $Sr/Y > 40$ и низкие – $Y < 18$ г/т и $Yb < 1,8$ г/т; $HFSE$ (Nb, Ta) и $HREE$ [Гусев, 2014; Авдеев и др., 2011]. Можно предполагать, что формирование пород происходило в условиях активной континентальной окраины либо зрелой островодужной системы за счет расплавов, образовавшихся на значительных глубинах (P 15–16 кбар). Плавающимся протолитом являлись ниже-коревые гранатовые амфиболиты при термальном и флюидном участии субдущированной океанической коры. Известно, что флюидный режим адакитовых магм характеризуется повышенной восстановленностью, обогащенностью водой, углекислотой и, иногда, присутствием хлора во флюидах. Такие параметры флюидов адакитовых расплавов благоприятно влияют на их потенциальную рудоносность и специализацию на золото, медь, молибден и др. элементы. Это находит свое подтверждение в том, что с адакитами в различных регионах мира ассоциируют порфировые и эпитермальные, медные и различного типа золоторудные месторождения [Гусев, 2014; Газеев, Кондрашов, 2025]. По данным А.Г. Гурбанова [Gurbanov et al., 1994], Е.А. Глазырина [Глазырин, 2004] и материалам отчета Ростовского университета «Геолого-геохимические и физико-химические условия формирования вольфрамового оруденения Центрального Кавказа», с массивом р. Большой Блыб пространственно ассоциируют средне-высокотемпературное гидротермальное месторождение кварц-шеелитовой формации и ряд рудопроявлений вольфрама и молибдена. Месторождение являлось объектом старательской добычи шеелита в период с 1939 по 1953 гг. На месторождении в пределах эрозионного вреза ~550 м обнажаются кристаллические сланцы, гнейсы, гранодиориты и плагиограниты. Кварцевые жилы встречаются на всем протяжении вреза, а в нижней части в них отмечается полевой шпат, мусковит, стронций, содержащий цоизит, молибденит. Здесь же развит ореол жильных аплитов и пегматитов. С уровня 300–350 м появляются шеелит, кальцит, пирит, пирротин, халькопирит, галенит, реже арсенопирит, а сами жилы подразделяются на кварц-шеелит-сульфидные и кварц-шеелитовые. Мощность жил колеблется от 1–2 см до 0,3 м. Шеелит рассеян по всей массе жил в виде кристаллов (иногда размером до 3–4 см), реже в виде их скоплений

и гнезд до 10 см; также он слагает прожилки параллельные зальбандам. По данным температур декрипитации газово-жидких включений: кварц-шеелитовая формация формировалась при 320–360 °С; сульфидная минерализация – 270–300 °С; безрудный кварц – 200–230 °С. Интересными являются данные по шеелитам. Сравнение шеелитов разных месторождений и рудопроявлений Центрального Кавказа показало, что по содержанию Sr и Mo шеелиты Тырныаузского (SrO 0,73–0,8%; MoO₃ до 4,92%) и Блыбского (SrO 0,24–0,26%; MoO₃ 0,015%) месторождений сопоставимы и заметно отличаются от остальных.

Для оценки полученных данных о геодинамической принадлежности гранитогнейсов важно представлять историю развития региона. В связи с тем, что наиболее вероятным возрастом пород является девон (~390 Ma) [Somin, 2011] отметим, что в истории региона на основании стратиграфии и структуры додевонских комплексов выделяют несколько этапов:

1 – Позднепротерозойский этап. Накопление этих осадков примерно с рубежа 1700 млн лет, происходит в условиях мобильной зоны Средиземноморского подвижного пояса (Прототетис).

2 – Венд (?) кембрий – ордовикский этап.

На севере региона существовала плита, где временами происходило накопление осадков в условиях мелководья [Потапенко, 1981]. В силурийско-раннеэфельское время в направлении с юга на север в Кавказском регионе присутствовали следующие геотектонические мегаструктуры:

- Понтийско-Закавказский (Дзирульский) массив Закавказской литосферной плиты;
- океаническая впадина Палеотетиса, в центре которой располагался Срединно-океанический хребет (СОХ);
- островодужная система и морской бассейн, покрывающий Скифско-Туранскую плиту (СТП).

В СОХ происходили явления спрединга и формировалась нижнедевонская океаническая кора (ОК). Одновременно на северной окраине Палеотетиса шел компенсационный процесс с субдукцией ОК. В результате здесь формировались две субпараллельные островные дуги (ОД): Кизилкольская, располагавшаяся ближе к СТП, и Лабино–Зарауская (Урупская), внешняя. В Кизилкольской дуге происходило накопление вулканитов базальт-андезит-риолитовой, а в Лабино-Зарауской – базальт-риолитовой ассоциации [Омельченко, 2021; Газеев, Гурбанов, 2023]. Согласно с геодинамической моделью региона [Греков, Пруцкий, 2001] в настоящее время фрагменты этих ОД слагают раннегерцинский структурный ярус, характеризующийся развитием аллохтонных толщ. В этих толщах присутствуют фрагменты коллажированных террейнов, образующих аккреционные комплексы, отдельные элементы которых формировались в различных геодинамических условиях. Полученные нами результаты согласуются с существующими представлениями, но указывают на более сложное строение девонской зоны субдукции. Можно предполагать, что в пределах внутренней Кизилкольской ОД либо к северу от нее, уже в пределах активной окраины СТП, происходила генерация глубинных расплавов адакитового типа, перемещавшихся ближе к земной поверхности с образованием небольших рудогенерирующих гранитоидных массивов. В настоящее время на сопредельных картах 1:200000 масштаба эти массивы выделены в самостоятельные комплексы – трондьемиты Тырныаузского вольфрам-молибденового месторождения (*K-38-I, VII*), граниты с сопутствующим молибденовым оруденением озеракфарского комплекса (*K-37-IV*), диориты бахмуткинского комплекса (*K-37-IV*), гранитогнейсы кристаллического основания ПХ БК (*K-37-V*). Сравнительные петрохимические исследования этих образований позволят детальнее изучить гранитоидный магматизм и рудоносность девонской островодужной системы БК.

Заключение

Изучены петрохимические особенности среднепалеозойских гранитогнейсов кристаллического основания Передового хребта Большого Кавказа. Установлено, что они являются нормально- и умеренно-щелочными Na_2O+K_2O от 7,12% до 8,31%, умеренно- и высокомагнезиальными $Mg^{\#}$ 0,42–0,62 образованиями с калиево-натриевым типом щелочности Na_2O/K_2O 1,54–3,22. Показано, что изученные породы являются гранитоидами адакитового типа и характеризуются высокими содержаниями Na_2O , Ba , Sr , $LiLe$, $LREE$, высокими величинами Sr/Y и La/Yb отношения. Они также имеют пониженные содержания CaO , $HFSE$, $HREE$, Y 3–14 г/т, Yb 0,3–1,2 г/т. Предполагается, что исходные расплавы этих пород формировались в надсубдукционных условиях на значительных глубинах. Плавающим субстратом при термальном и флюидном участии субдуцированной океанической коры являлись нижнекоревые гранатовые амфиболиты. Отмечено, что с породами ассоциирует гидротермальное оруденение кварц-шеелитовой формации.

Литература

1. Авдеев Г.П., Палуева А.А., Кувиас О.В. Адакиты в зонах субдукции Тихоокеанского кольца: Обзор и анализ геодинамических условий образования // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. – 2011. – Вып. 1(17). – С 45–60.
2. Афанасьев Г.Д., Плошко В.В., Неговдов Ф.С. и др. Апатитовые проявления Северного Кавказа. М.: Наука, 1976. – 248 с.
3. Газеев В.М., Кондрашов И.А. Граносиениты Чучурского гипабиссального комплекса (Передовой хребт Большого Кавказа): вопросы петрогенезиса, геодинамическая типизация // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 8–20. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.34.002.
4. Газеев В.М., Гурбанов А.Г. Ранне-среднедевонские вулканогенные породы из районов колчеданных месторождений Передового хребта Большого Кавказа: геодинамическая типизация и минерогения // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 6–21. DOI: 10.46698/VNC.2023.29.60.001.
5. Глазырин Е.А. Геологическое строение Блыбского участка шеелитового месторождения (Большой Кавказ) // Материалы IV Международной научной конференции «Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии Юга России и Кавказа». Новочеркасск: Темп, 2004. – С 156–173.
6. Греков И.И., Пруцкий Н.И. Проблемы геодинамики и металлогении Центрального Кавказа в позднегерцинский – триасовый этап развития Северного Кавказа // Сборник научных трудов «Проблемы геологии и геоэкологии Южно-Российского региона». Новочеркасск: НАБЛА, 2001. – С. 4–15.
7. Гусев А.И. Петрология адакитовых гранитоидов. М.: Изд. Академия Естествознания, 2014. – 133 с.
8. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гущин А.В. и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. – СПб: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.
9. Лаврищев В.А., Пруцкий Н.И. и др. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. К-37-V. (Красная Поляна). Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2002. – 259 с.
10. Омельченко В.Л. Офиолиты Северного Кавказа и некоторые проблемы геологии его древних комплексов. Ессентуки, 2021. – 167 с.
11. Потапенко Ю.Я. Стратиграфия и структура додевонских комплексов Северного Кавказа. Тбилиси: Мецниереба, 1981. – 159 с.
12. Туркина О.М. Модельные геохимические типы тоналит-трондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты // Геохимия. – 2000. – № 7. – С. 704–717.
13. Туркина О.М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. – 118 с.
14. Чернышев И.В., Гурбанов А.Г., и др. О возрасте цирконов из гнейсо-гранитов Северного Кавказа // Доклады академии наук СССР. – 1987. – Т. 295. № 2. – С. 468–472.

15. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature*. – 1990. – Vol. 347. – pp. 662–665.
16. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J. et al. A geochemical classification for granitic rocks // *Journal of Petrology*. – 2001. – Vol. 29. – pp. 515–518.
17. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks // *The Canadian Mineralogist*. – 2000. – Vol. 38. – p. 1065–1073.
18. Gurbanov A.G., Aretz Y., Gazis C. et al. Origin of granodiorite gneisses and related tungsten mineralization, North Caucasus, Russia // *International Geology Review*. – 1994. – Vol. 36. – pp. 259–271.
19. Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision–zone magmatism // *Geological Society, London, Special Publications*. – 1986. – Vol. 19. – pp. 67–81.
20. Martin H., Smithies R.H., Rapp R. et al. An overview of adakite, tonalite – trondhjemite – granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // *Lithos*. – 2005. – Vol. 79. – pp. 1–24.
21. Gan J., Xiong F., Xiao Q., Wang W., Yan D. Petrogenesis and geodynamic implications of late triassic mogetong adakitic pluton in East Kunlun Orogen, Northern Tibet: constraints from zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 10. Issue 208. DOI: 10.3389/feart.2022.845763.
22. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts // *Geological Society London Special Publications*. – 1989. – Vol. 42. – pp. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.
23. Somin M.L. Pre-Jurassic Basement of the Greater Caucasus: Brief Overview // *Turkish Journal of Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 20. – pp. 545–610. DOI: 10.3906/yer-1008-6.
24. Xu J.-F., Wang Q., Yu X.-Y. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qilling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust // *Geochemical Journal*. – 2000. – Vol. 34. – pp. 359–377.

References

1. Avdeinko G.P., Paluyeva A.A., Kuvikas O.V. Adakites in the subduction zones of the Pacific Ring: review and analysis of geodynamic genesis conditions. *Bulletin of KRAUNTS. Earth Sciences*. 2011. Issue 1(17). pp. 45–60. (In Russ.)
2. Afanasyev G.D., Ploshko V.V., Negovedov F.S. et al. Apatite deposits of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1976. 248 p. (In Russ.)
3. Gazeev V.M., Kondrashov I.A. Granosyenites of the Chuchkur hypabyssal complex (Greater Caucasus Front Range): petrogenesis issues, geodynamic typing. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 8–20. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.34.002. (In Russ.)
4. Gazeev V.M., Gurbanov A.G. Early Middle Devonian volcanic rocks from areas of massive sulfide deposits of the Front Range of the Greater Caucasus: geodynamic typification and minerageny. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 6–21. DOI: 10.46698/VNC.2023.29.60.001. (In Russ.)
5. Glazyrin E.A. Geological structure of the Blybsky section of the scheelite deposit (Greater Caucasus). In: *Materials of the IV International Scientific Conference “Problems of geology, minerals and ecology of the South of Russia and the Caucasus”*. Novocherkassk. Temp. 2004. pp. 156–173. (In Russ.)
6. Grekov I.I., Prutsky N.I. Problems of geodynamics and metallogeny of the Central Caucasus in the Late Hercynian–Triassic stage of development of the North Caucasus. In: *Proceedings Problems of geology and geoecology of the Southern Russian region*. Novocherkassk. NABLA. 2001 pp. 4–15. (In Russ.)
7. Gusev A.I. Petrology of adakite granitoids. Moscow. Academy of Natural Sciences. 2014. 133 p. (In Russ.)
8. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V. et al. Geochemical and metallogenic specialization of structural and material complexes. Saint Petersburg. VSEGEI. 1999. 514 p. (In Russ.)

9. Lavrishchev V.A., Prutsky N.I. et al. State geological map of the Russian Federation scale 1:200 000. K-37-V. (Krasnaya Polyana). Explanatory note. Saint Petersburg. VSEGEI. 2002. 259 p. (In Russ.)
10. Omelchenko V.L. Ophiolites of the North Caucasus and some problems of the geology of its ancient complexes. Essentuki. 2021. 167 p. (In Russ.)
11. Potapenko Yu.Ya. Stratigraphy and structure of the Pre-Devonian complexes of the North Caucasus. Tbilisi. Metsniereba. 1981. 159 p. (In Russ.)
12. Turkina O.M. Model geochemical types of tonalite–trondyemite melts and their natural equivalents. *Geochemistry*. 2000. No. 7. pp. 704–717. (In Russ.)
13. Turkina O.M. Lectures on the geochemistry of magmatic and metamorphic processes. Novosibirsk. RIC NGU. 2014. 118 p. (In Russ.)
14. Chernyshev I.V., Gurbanov A.G. et al. On the age of zircons from the gneiss-granites of the North Caucasus. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1987. Vol. 295. No. 2. pp. 468–472.
15. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*. 1990. Vol. 347. pp. 662–665.
16. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J. et al. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 29. pp. 515–518.
17. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist*. 2000. Vol. 38. p. 1065–1073.
18. Gurbanov A.G., Aretz Y., Gazis C. et al. Origin of granodiorite gneisses and related tungsten mineralization, North Caucasus, Russia. *International Geology Review*. 1994. Vol. 36. pp. 259–271.
19. Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision–zone magmatism. Geological Society, London, Special Publications. 1986. Vol. 19. pp. 67–81.
20. Martin H., Smithies R.H., Rapp R. et al. An overview of adakite, tonalite – trondhjemite – granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*. 2005. Vol. 79. pp. 1–24.
21. Gan J., Xiong F., Xiao Q., Wang W., Yan D. Petrogenesis and geodynamic implications of late triassic mogetong adakitic pluton in East Kunlun Orogen, Northern Tibet: constraints from zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Issue 208. DOI: 10.3389/feart.2022.845763.
22. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. Geological Society London Special Publications. 1989. Vol. 42. pp. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.
23. Somin M.L. Pre-Jurassic Basement of the Greater Caucasus: Brief Overview. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2011. Vol. 20. pp. 545–610. DOI: 10.3906/yer-1008-6.
24. Xu J.-F., Wang Q., Yu X.-Y. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qilling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. *Geochemical Journal*. 2000. Vol. 34. pp. 359–377.

УДК 517; 532

DOI: 10.46698/VNC.2026.76.69.001

Оригинальная статья

Теоретические основы селективного способа отбора воды из внутреннего пространства стратифицированного водоема

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

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

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

Статья поступила: 11.03.2026, доработана: 17.08.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Поставлена и решена контактная начально-краевая задача, моделирующая процесс селективного отбора воды из промежуточного слоя трехслойного стратифицированного водоема. В промежуточном слое вода бывает холоднее на 8–10 °С, чем в поверхностном, и чище от наносов, чем в нижнем, придонном слое. Такой способ отбора воды бывает необходим для технического водоснабжения промышленных предприятий, использующих высокотемпературные тепловыделяющие устройства. К ним причисляются тепловые и атомные электростанции. **Цель исследования.** Разработка нового эффективного способа селективного забора воды из промежуточного слоя трехслойного стратифицированного водоема. **Объект исследования.** Водоем геометрически схематизирован в виде вертикального цилиндра с осевой симметрией. Краевая задача составлена в цилиндрической системе координат. Вода из промежуточного слоя забирается трубой, опущенной через свободную поверхность водоема внутрь промежуточного слоя. **Метод исследования.** Начально-краевая задача решена аналитическими методами математической физики. Применены интегральное преобразование Лапласа по времени и конечное интегральное преобразование Бесселя по горизонтальной цилиндрической координате. **Результаты исследования.** В результате решения начально-краевой задачи получена совокупность расчетных формул для вычисления критического расхода забираемой воды. Расчет и проектирование селективных водоотборных устройств и процессов на основе полученной совокупности формул гарантируют селективный отбор воды из промежуточного слоя трехслойного стратифицированного водоема.

Ключевые слова: стратифицированный водоем, начально-краевая задача, интегральное преобразование Лапласа, конечное интегральное преобразование Бесселя, критическое положение поверхности раздела слоев воды, критический расход.

Для цитирования: Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Теоретические основы селективного способа отбора воды из внутреннего пространства стратифицированного водоема. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3):..... DOI: 10.46698/VNC.2026.76.69.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.76.69.001

Original paper

Theoretical foundations of the selective method of water extraction from the interior of a stratified reservoir

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

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

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

Received: 11.03.2026, revised: 17.08.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. A contact initial boundary value problem modeling the process of selective water extraction from the intermediate water layer of a three-layer stratified reservoir has been posed and solved. In the intermediate layer, the water is cooler by 8°-10° than in the surface layer and with lower sediment content than in the lower bottom layer. This method of water extraction may be necessary for the technical water supply of industrial enterprises using high-temperature heat-generating devices. These include thermal and nuclear power plants. **Aim.** Development of a new effective method for selective water intake from the intermediate layer of a three-layer stratified reservoir. **The object of research.** The reservoir is geometrically schematized as a vertical cylinder with axial symmetry. The boundary value problem is formulated in a cylindrical coordinate system. The water from the intermediate layer is taken up by a pipe lowered through the free surface of the reservoir into the intermediate layer. **Methods.** The initial boundary value problem is solved by analytical methods of mathematical physics. The integral Laplace transform in time and the finite integral Bessel transform in horizontal cylindrical coordinates are applied. **Results.** As a result of solving the initial boundary value problem, a set of calculation formulas for calculating the critical flow rate of the withdrawn water was obtained. The calculation and design of selective water collection devices and processes based on the obtained set of formulas guarantees selective water extraction from the intermediate layer of a three-layer stratified reservoir. The calculation and design of selective water collection devices and processes based on the obtained set of formulas guarantees selective water extraction from the intermediate layer of a three-layer stratified reservoir.

Keywords: stratified reservoir, initial boundary value problem, integral Laplace transform, finite integral Bessel transform, critical position of the interface of water layers, critical flow rate.

For citation: Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Theoretical foundations of the selective method of water extraction from the interior of a stratified reservoir. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): ...-.... DOI: 10.46698/VNC.2026.76.69.001

Введение

В летнее время в водоемах-источниках технического водоснабжения происходит температурная стратификация. В глубинном слое вода бывает холоднее на 8–10 °С, чем в поверхностном слое [Аверкиев и др., 1969; Музаев и др., 2020, 2025].

На промышленных предприятиях имеются устройства, в которых происходят высокотемпературные тепловые процессы, например в конденсаторах турбин тепловых и атомных электростанций. Для охлаждения и отвода излишнего тепла к таким устрой-

ствам надо подавать воду из глубинного холодного слоя стратифицированного водоема. Иначе из-за перегрева устройства на предприятии может произойти авария с тяжелыми геоэкологическими последствиями.

На рисунке 1 представлена расчетная схема селективного отбора воды из нижнего слоя двухслойного стратифицированного водоема. Вода забирается трубой, подведенной через дно водоема внутрь нижнего слоя. При заборе воды через трубу поверхность раздела слоев сильно искривляется. На ней образуются гравитационные внутренние волны. При определенном значении расхода (скорости) забираемой воды через трубу поверхность раздела слоев может опускаться до проема трубы. Поверхность раздела слоев принимает форму стоячей уединенной волны, как это показано на рисунке 1. Такое положение поверхности раздела слоев называется верхним критическим положением. Расход воды через трубу, который создает критическое положение поверхности раздела слоев, называется критическим расходом. Очевидно, что при дальнейшем увеличении расхода воды выше критического разрушится селективный отбор воды из нижнего слоя. Вода из верхнего слоя будет поступать в проем водозаборной трубы.

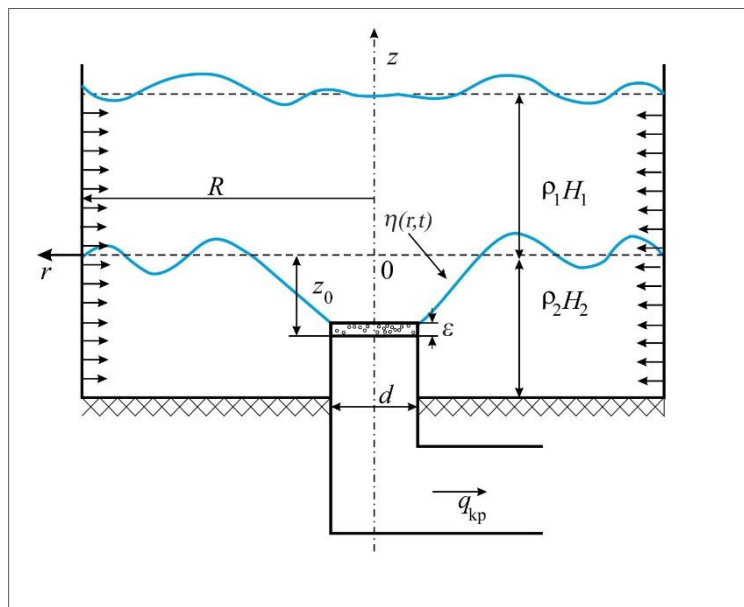


Рис. 1. Расчетная схема селективного отбора воды из нижнего слоя /
Fig. 1. Calculation scheme of selective water extraction from the lower layer

В справочных литературных источниках, а также в строительных нормах и правилах для расчета и проектирования устройств отбора воды из нижнего слоя рекомендуется проводить расчет по эмпирической формуле Д. Харлемана, которая имеет следующий вид [Harleman, Stolzenbach, 1972; Музаев и др., 2020]:

$$q_{кр} = 1,42\pi z_0^2 \sqrt{gd \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}},$$

где H_2 – толщина воды в нижнем слое водоема, ρ_1 и ρ_2 – плотности воды в верхнем и нижнем слоях соответственно, g – ускорение силы тяжести, $\pi=3,14$.

Представленная выше формула рекомендована только для случая, когда водозаборная труба подведена заподлицо с дном водоема. Как видно, в этой формуле не содержится ни диаметр трубы, ни толщина верхнего слоя водоема.

Для случая, когда вода отбирается из верхнего слоя трубой, опущенной через свободную поверхность водоема внутрь верхнего слоя, расчетная схема представлена на

рисунке 2. В справочных литературных источниках, а также в строительных нормах и правилах для расчета и проектирования устройств отбора воды из верхнего слоя расчет рекомендуется проводить по эмпирической формуле Давидиана-Гловера [Аверкиев и др., 1969; Справочник..., 1977; Craya, 1949; Методические..., 2003; Музаев и др., 2020], имеющей следующий вид:

$$q_{кр} = 1,42\pi z_0^2 \sqrt{gd \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}},$$

где z_0 – расстояние от первоначального горизонтального положения поверхности раздела слоев до проема трубы, d – диаметр трубы. Остальные идентификаторы такие же, как в формуле Д. Харлемана.

В этой формуле также не содержатся толщины слоев воды в водоеме.

В связи с перечисленными недостатками расчет и проектирование селективных водоотборных устройств и процессов в некоторых случаях могут не гарантировать селективный отбор воды, как из нижнего, так и из верхнего слоев стратифицированного водоема. Такое заключение сделано на том основании, что диаметр трубы и толщина верхнего слоя водоема существенно влияют на значение критического расхода отобранной воды из нижнего слоя. А в эмпирической формуле Д. Харлемана эти параметры не содержатся.

В формуле Давидиана-Гловера не содержатся толщины слоев воды в водоеме.

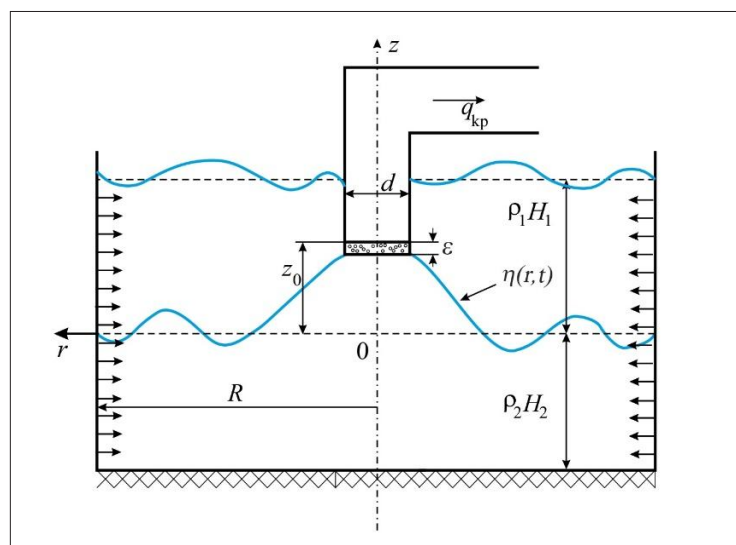


Рис. 2. Расчетная схема селективного отбора воды из верхнего слоя /
Fig. 2. Calculation scheme of selective water extraction from the upper layer

Методы исследования

Полагается, что в цилиндрической системе координат (r, z) , часть пространства, ограниченная условиями $0 < r < R$; $H_2 < z < H_1$ занята трехслойным стратифицированным водоемом – источником технического водоснабжения некоторого промышленного предприятия. Вода отбирается из промежуточного слоя водоема по трубе, как показано на схематическом рисунке 3. Водоем геометрически схематизирован в виде вертикального цилиндра радиусом R . H_1 , H_2 , H_3 – толщины верхнего, промежуточного и нижнего слоев воды соответственно. Принимается, что в начальный момент времени $t = 0$, то есть до включения водозаборного устройства, вода в слоях была неподвижна. Поверхности раздела слоев и свободная поверхность водоема горизонтальны. Вода считается идеальной несжимаемой жидкостью, а движение воды считается безвихревым (потенциальным) [Karplus, 1956; Басниев и др., 1993; Маскет, 1953].

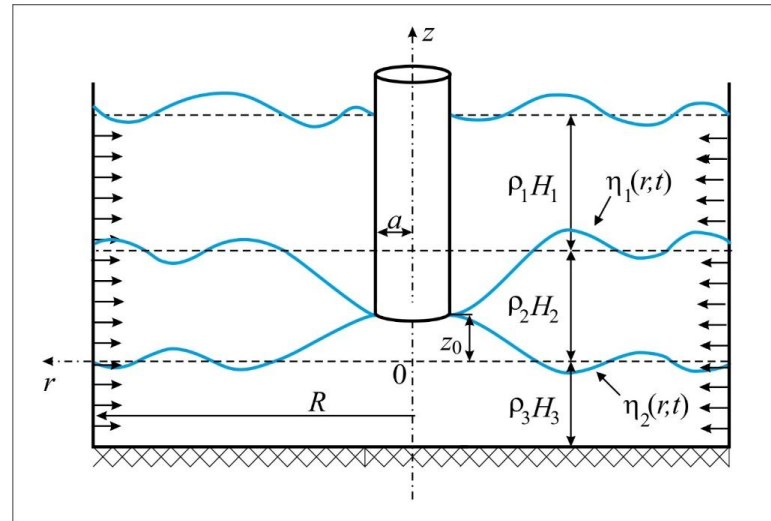


Рис. 3. Расчетная схема задачи селективного отбора воды из промежуточного слоя трехслойного стратифицированного водоема /

Fig. 3. Calculation scheme of the problem of selective water extraction from the intermediate layer of a three-layered stratified reservoir

Эти упрощающие предположения положены в основу гидродинамической теории поверхностных и внутренних гравитационных волн в идеальной несжимаемой жидкости [Шокин и др., 2015; Сретенский, 1977; Штеренлихт, 2004; Гавич, 1988; Чарный, 1968; Гинзбург, 1970; Белолипецкий и др., 1991; Музаев и др., 2020, 2025], а также метода источников и стоков [Garabedian, 1956]. Физико-математической моделью движения воды в слоях будет следующая контактная пространственная начально-краевая задача [Вазов, Форсайт, 1963; Заалишвили и др., 2024; Корн, Корн, 1977; Кошляков и др., 1970; Ламб, 1947; Harleman, Stolzenbach, 1972; Букреев, 2010]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z_1^2} = 0, \quad 0 < z_1 < H_1 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z_2^2} = -\frac{qZ(z)f(r)}{\pi a^2 \varepsilon} + \frac{q\bar{f}(r)}{[\pi R^2 - \pi(R-\varepsilon)^2]H_1}, \quad 0 < z_2 < H_2 \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi_3}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z_3^2} = 0, \quad -H_3 < z_3 < 0 \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=H_1} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=0} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z_2} \Big|_{z_2=H_2} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z_2} \Big|_{z_2=0} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial z_2} \Big|_{z_2=0} \quad (6)$$

$$\rho_1 \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_1} \right) \Big|_{z_1=0} = \rho_2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_2}{\partial z_2} \right) \Big|_{z_2=H_2}, \quad (7)$$

$$\rho_2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_2}{\partial z_2} \right) \Big|_{z_2=0} = \rho_3 \left(\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_3}{\partial z_3} \right) \Big|_{z_3=0}, \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial z_3} \Big|_{z_3=-H_3} = 0, \quad (8)$$

где приняты следующие обозначения и предположения: r и z – цилиндрические координаты переменной точки; $\varphi_1(r, z_1, t)$, $\varphi_2(r, z_2, t)$, $\varphi_3(r, z_3, t)$ – потенциалы скоростей движения воды в верхнем, промежуточном и нижнем слоях соответственно; H_1 , H_2 , H_3 – толщины верхнего, промежуточного и нижнего слоев воды соответственно; $q(t)$ – расход воды через трубу; a – внутренний радиус трубы; $f(r)$; $\bar{f}(r)$; $Z(z)$ – вспомогательные функции определенные следующим образом:

$$f(r) = \begin{cases} 1, & \text{если } r \in (0; a) \\ 0, & \text{если } r \notin (0; a) \end{cases}, \quad \overline{f(r)} = \begin{cases} 1, & \text{если } r \in (R - \varepsilon, R) \\ 0, & \text{если } r \notin (R - \varepsilon, R) \end{cases} \quad (9)$$

$$Z(z) = \begin{cases} 1, & \text{если } z \in (z_0 - \varepsilon, z_0) \\ 0, & \text{если } z \notin (z_0 - \varepsilon, z_0) \end{cases},$$

ε – вспомогательная бесконечно малая величина, которая устремляется к нулю в определенном месте в процессе решения поставленной начально-краевой задачи.

Комментарии относительно составленной начально-краевой задачи:

1. Первое слагаемое правой части дифференциального уравнения (2) моделирует отток из элементарного цилиндра высотой ε , примыкающего к проему водозаборной трубы. Расход оттока воды q равен расходу забираемой воды через трубу. Второе слагаемое в правой части того же уравнения моделирует исток воды в кольцевом цилиндре радиусами $R - \varepsilon$ и R и высотой H_2 с тем же расходом q . Цилиндр с большой поверхностью примыкает к условно боковой поверхности водоема при $r=R$. Очевидно, что при $\varepsilon \rightarrow 0$ правая сторона дифференциального уравнения моделирует процесс затекания воды в проем водозаборной трубы и синхронного затекания воды в водоем через условную поверхность при $r=R$ в пределах $0 < z_2 < H_2$.

2. Граничные условия при $r=0$ выражают условие симметрии относительно центральной оси водозаборной трубы при условии $a \rightarrow 0$, где a – радиус трубы. Граничное условие при $r=R$ выражает неподвижность условной цилиндрической поверхности $r=R$, а также процесс синхронного затекания воды через нее. Граничные условия на контактных поверхностях при $z_1=0$, $z_2=H_2$, $z_2=0$ выражают равенство вертикальных составляющих скоростей в слоях, а также равенство гидродинамических давлений в слоях воды.

3. Составленная контактная начально-краевая задача записана в двух разных координатных системах (r, z_1) и (r, z_2) . Если количество слоев больше двух, то такой подход к решению контактной начально-краевой задачи существенно сокращает кропотливые математические выкладки и облегчает путь решения начально-краевой задачи.

При известных потенциалах $\varphi_1(r, z_1, t)$, $\varphi_2(r, z_2, t)$, $\varphi_3(r, z_2, t)$ уравнение поверхности раздела верхнего и промежуточного слоев $\eta_2(r, z_2, t)$, а также уравнение поверхности между промежуточным и нижним слоями вычисляются при помощи следующих формул [Craya, 1949; Музаев и др., 2020; Музаев и др., 2020; Шокин и др., 2015]:

$$\eta_1(r, t) = \frac{1}{(\rho_2 - \rho_1)g} \left(\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} \Big|_{z_1=0} - \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \Big|_{z_2=H_2} \right),$$

$$\eta_2(r, t) = \frac{1}{(\rho_3 - \rho_2)g} \left(\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} - \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} \right) \Big|_{z_2=0}.$$

Для решения поставленной начально-краевой задачи вначале к выражениям (1)–(9) применяются интегральные преобразования Лапласа по времени t и конечное интегральное преобразование Бесселя по переменной r в промежутке $r \in (0; R)$. В результате таких преобразований начально-краевая задача (1)–(9) приводится к такому виду:

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}_{1,n}}{dz_1^2} - \lambda_n^2 \tilde{\varphi}_{1,n} = 0, \quad 0 < z_1 < H_1, \quad (10)$$

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}_{2,n}}{dz_2^2} - \lambda_n^2 \tilde{\varphi}_{2,n} = -\frac{\tilde{q}Z(z_1)}{\pi a^2 \varepsilon} \int_0^a r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr + \frac{\tilde{q}}{2\pi \varepsilon} \int_{R-\varepsilon}^R r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr, \quad (11)$$

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}_{3,n}}{dz_2^2} - \lambda_n^2 \tilde{\varphi}_{3,n} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}_{1,n}}{\partial z_1} \Big|_{z_1=H_1} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{\varphi}_{1,n}}{\partial z_1} \Big|_{z_1=0} = \frac{\partial \tilde{\varphi}_{2,n}}{\partial z_2} \Big|_{z_2=H_2}; \quad \frac{\partial \tilde{\varphi}_{2,n}}{\partial z_2} \Big|_{z_2=0} = \frac{\partial \tilde{\varphi}_{3,n}}{\partial z_2} \Big|_{z_2=0} \quad (13)$$

$$\rho_1 \left(P^2 \tilde{\varphi}_{1,n} + g \frac{\partial \tilde{\varphi}_{1,n}}{\partial z_1} \right) \Big|_{z_1=0} = \rho_2 \left(P^2 \tilde{\varphi}_{2,n} + g \frac{\partial \tilde{\varphi}_{2,n}}{\partial z_2} \right) \Big|_{z_2=H_2}, \quad (14)$$

$$\rho_2 \left(P^2 \tilde{\varphi}_{2,n} + g \frac{\partial \tilde{\varphi}_{2,n}}{\partial z_2} \right) \Big|_{z_2=0} = \rho_3 \left(P^2 \tilde{\varphi}_{3,n} + g \frac{\partial \tilde{\varphi}_{3,n}}{\partial z_2} \right) \Big|_{z_2=0}, \quad \frac{d \tilde{\varphi}_{3,n}}{dz_2} \Big|_{z_2=-H_3} = 0, \quad (15)$$

$$\tilde{\eta}_{1,n} = \frac{P}{(\rho_2 - \rho_1)g} \left(\rho_1 \tilde{\varphi}_{1,n} \Big|_{z_1=0} - \rho_2 \tilde{\varphi}_{2,n} \Big|_{z_2=H_2} \right), \quad (16)$$

$$\tilde{\eta}_{2,n} = \frac{P}{(\rho_3 - \rho_2)g} \left(\rho_2 \tilde{\varphi}_{2,n} \Big|_{z_2=0} - \rho_3 \tilde{\varphi}_{3,n} \Big|_{z_2=0} \right), \quad (17)$$

$$\lambda_n = \mu_n \frac{1}{R} \quad (18)$$

где P – параметр преобразования Лапласа, μ_n – положительные корни трансцендентного уравнения:

$$J'_0(\mu) = -J_1(\mu) = 0, \quad (19)$$

J_0 и J_1 – цилиндрические функции Бесселя первого рода, нулевого и первого порядка соответственно.

Последовательность положительных корней трансцендентного уравнения (19) с высокой точностью задается следующей формулой:

$$\mu_n = 3,832 + (n-1)\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad \pi = 3,14159. \quad (20)$$

Знак « $\sim$ » (тильда) над символом выражает прямое преобразование Лапласа. Натуральный индекс n выражает прямое конечное преобразование Бесселя.

В правой части дифференциального уравнения (11) содержатся определенные интегралы с бесконечно малыми интервалами интегрирования:

$$\int_0^a r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr + \int_{R-\varepsilon}^R r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr. \quad (21)$$

Считая радиус трубы a малой величиной по сравнению с радиусом R , а также считая величину ε малой величиной по сравнению с радиусом R , можно заменить значения этих интегралов на соответствующие эквивалентные малые величины:

$$\int_0^a r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr \sim \frac{a}{2} J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right), \quad \int_{R-\varepsilon}^R r J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr \sim R J_0(\mu_n) \varepsilon. \quad (22)$$

С учетом приближенных эквивалентных формул (22) дифференциальное уравнение (11) переписывается в следующем виде:

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}_{2,n}}{dz_2^2} - \lambda_n^2 \tilde{\varphi}_{2,n} = -\frac{\tilde{q} Z(z_1)}{2\pi\varepsilon} J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right) + \frac{\tilde{q} J_0(\mu_n)}{2\pi H_2}, \quad (23)$$

Решения дифференциальных уравнений (10), (12) и (23), удовлетворяющие граничному условию свободной поверхности водоема при $z_1 = H_1$, а также граничному условию на дне водоема при $z_2 = -H_2$, имеют следующий вид:

$$\tilde{\varphi}_{1,n}(z_1) = C_1 \operatorname{ch} \lambda_n (z_1 - H_1), \quad 0 < z_1 < H_1, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{2,n}(z_2) = & C_2 \operatorname{sh} \lambda_n z_2 + C_3 \operatorname{ch} \lambda_n z_2 - \frac{\tilde{q}}{2\pi\lambda_n} J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right) \int_0^{z_2} Z(\xi) \operatorname{sh} \lambda (z_2 - \xi) d\xi + \\ & + \frac{\tilde{q}}{2\pi H_2} J_0(\mu_n) \int_{z_0-\varepsilon}^{z_0} \operatorname{sh} \lambda (H_2 - \xi) d\xi, \quad 0 < z_2 < H_2, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\tilde{\varphi}_{3,n}(z_2) = C_4 \operatorname{ch} \lambda_n (z_2 + H_3), \quad -H_3 < z_2 < 0, \quad (26)$$

В процессе удовлетворения остальным граничным условиям на контактных поверхностях слоев получаем четкие линейные уравнения относительно переменных C_1 , C_2 , C_3 и C_4 .

$$\begin{cases} \operatorname{sh} \lambda_n H_1 C_1 + \operatorname{ch} \lambda_n H_2 C_2 + \operatorname{sh} \lambda_n H_2 C_3 = R_1 \\ C_2 = C_4 \operatorname{sh} \lambda_n H_3 \\ S_1 C_1 - S_2 C_2 - S_3 C_3 = -(\rho_2 P^2 R_2 + \rho_2 g \lambda R_1) \\ S_3 C_2 - S_4 C_3 = 0 \end{cases}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} S_1 &= \rho_1 (P^2 \operatorname{ch} \lambda H_1 - g \lambda_n \operatorname{sh} \lambda H_1), & S_2 &= \rho_2 (P^2 \operatorname{sh} \lambda_n H_2 + g \lambda \operatorname{ch} \lambda_n H_2), \\ S_3 &= \rho_2 (P^2 \operatorname{ch} \lambda_n H_2 + g \lambda_n \operatorname{sh} \lambda_n H_2), & S_4 &= \rho_3 P^2 \operatorname{ch} \lambda_n H_3 + (\rho_3 - \rho_2) g \lambda \operatorname{sh} \lambda_n H_3, \\ R_1 &= \frac{\tilde{q}}{2\pi\lambda_n} \rho_1 J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right) \operatorname{ch} \lambda_n (H_2 - z_0) - \frac{\tilde{q} J_0(\mu_n)}{2\pi H_2 \lambda_n}, \\ R_2 &= \frac{\tilde{q}}{2\pi\lambda_n} J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right) \operatorname{sh} \lambda_n (H_2 - z_0) - \frac{\tilde{q} J_0(\mu_n)}{2\pi H_2 \lambda_n}, \end{aligned} \quad (28)$$

В выражении (25) определенный интеграл с бесконечно малым интервалом интегрирования заменен эквивалентным бесконечно малым значением:

$$\tilde{\eta}_{1,n} = \frac{P}{(\rho_2 - \rho_1)g} (\rho_1 C_1 ch\lambda H_1 - \rho_2 (C_2 sh\lambda H_2 + C_3 ch\lambda H_2 - R_1)), \quad (29)$$

$$\tilde{\eta}_{2,n} = \frac{P}{(\rho_3 - \rho_2)g} (\rho_2 C_3 - \rho_3 C_4 ch\lambda H_3). \quad (30)$$

Выражения (16) и (17) через постоянные C_i переписуются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \int_{z_0-\varepsilon}^{z_0} sh\lambda(H_2 - \xi) d\xi &= sh\lambda(H_2 - z_0)\varepsilon, \text{ при } \varepsilon \rightarrow 0 \\ \int_{z_0-\varepsilon}^{z_0} ch\lambda(H_2 - \xi) d\xi &= ch\lambda(H_2 - z_0)\varepsilon, \text{ при } \varepsilon \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (31)$$

Вычислены значения постоянных C_i из системы уравнений (27) и подставлены в выражения (29) и (30). Затем выполнены обратные интегральные преобразования Лапласа и Бесселя. В результате всего этого получена совокупность расчетных формул для уравнений искривленных поверхностей раздела слоев у водозаборной трубы при $r=0$.

$$\eta_1(t) = -\frac{q}{\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 J_0^2(\mu_n)} \eta_{1,n}(t), \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \eta_{1,n}(t) = & -\frac{th\lambda_n H_1}{\gamma_{1,n}(\omega_{2,n}^2 - \omega_{1,n}^2)} \left\{ \left[\rho_2^2 th\lambda_n H_3 \left(J_0\left(\mu_n \frac{a}{2R}\right) \frac{sh\lambda_n z_0}{ch\lambda_n H_2} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{J_0(\mu_n) ch\lambda_n H_2 - 1}{H_2 \lambda_n} \right) + \rho_2 \rho_3 \left(J_0\left(\mu_n \frac{a}{2R}\right) \frac{ch\lambda_n z_0}{ch\lambda_n H_2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{J_0(\mu_n)}{H_2 \lambda_n} th\lambda_n H_2 \right) \right] \phi_{1,n}(t) + g \lambda_n \rho_2 (\rho_3 - \rho_2) th\lambda_n H_3 \left(J_0\left(\mu_n \frac{a}{2R}\right) \frac{ch\lambda_n z_0}{ch\lambda_n H_2} - \right. \\ & \left. \left. - \frac{J_0(\mu_n)}{H_2 \lambda_n} th\lambda_n H_2 \right) \phi_{2,n}(t) \right\} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\eta_2(t) = -\frac{q}{\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 J_0^2(\mu_n)} \eta_{2,n}(t), \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \eta_{2,n}(t) = & \frac{th\lambda_n H_3}{\gamma_{1,n}(\omega_{2,n}^2 - \omega_{1,n}^2)} \left\{ \left[\rho_2^2 th\lambda_n H_1 \left(J_0\left(\mu_n \frac{a}{2R}\right) \frac{sh\lambda_n (H_2 - z_0)}{ch\lambda_n H_2} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{J_0(\mu_n) ch\lambda_n H_2 - 1}{H_2 \lambda_n} \right) + \rho_1 \rho_2 \left(J_0\left(\mu_n \frac{a}{2R}\right) \frac{ch\lambda_n (H_2 - z_0)}{ch\lambda_n H_2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{J_0(\mu_n)}{H_2 \lambda_n} th\lambda_n H_2 \right) \right] \phi_{1,n}(t) - g \lambda_n \rho_2 (\rho_2 - \rho_1) th\lambda_n H_1 \left(J_0\left(\mu_n \frac{a}{2R}\right) \frac{ch\lambda_n (H_2 - z_0)}{ch\lambda_n H_2} - \right. \\ & \left. \left. - \frac{J_0(\mu_n)}{H_2 \lambda_n} th\lambda_n H_2 \right) \phi_{2,n}(t) \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{1,n} &= \rho_1 \rho_2 th\lambda_n H_3 + \rho_1 \rho_3 th\lambda_n H_2 + \rho_2^2 th\lambda_n H_1 th\lambda_n H_2 th\lambda_n H_3 + \rho_2 \rho_3 th\lambda_n H_1 \\ \gamma_{2,n} &= -\rho_1 \rho_2 th\lambda_n H_1 th\lambda_n H_3 + \rho_1 (\rho_3 - \rho_2) th\lambda_n H_2 th\lambda_n H_3 - \rho_1 \rho_3 th\lambda_n H_1 th\lambda_n H_2 + \\ & + \rho_2^2 th\lambda_n H_1 th\lambda_n H_3 + \rho_1 (\rho_3 - \rho_2) th\lambda_n H_1 th\lambda_n H_3 + \rho_2 \rho_3 th\lambda_n H_1 th\lambda_n H_2 \\ \gamma_{3,n} &= (\rho_2 - \rho_1)(\rho_3 - \rho_2) th\lambda_n H_1 th\lambda_n H_2 th\lambda_n H_3 \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \omega_{1,n} &= \sqrt{g \lambda_n \frac{\gamma_{2,n} + \sqrt{\gamma_{2,n}^2 - 4\gamma_{1,n}\gamma_{3,n}}}{2\gamma_{1,n}}} \\ \omega_{2,n} &= \sqrt{g \lambda_n \frac{\gamma_{2,n} - \sqrt{\gamma_{2,n}^2 - 4\gamma_{1,n}\gamma_{3,n}}}{2\gamma_{1,n}}} \end{aligned} \quad (37)$$

Если водозаборная труба открывается мгновенно (быстро), то функции $\phi_{1,n}(t)$ и $\phi_{2,n}(t)$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \phi_{1,n}(t) &= \omega_{2,n} \sin \omega_{2,n} t - \omega_{1,n} \sin \omega_{1,n} t \\ \phi_{2,n}(t) &= \frac{\sin \omega_{2,n} t}{\omega_{2,n}} - \frac{\sin \omega_{1,n} t}{\omega_{1,n}} \end{aligned} \quad (38)$$

Если водозаборная труба открывается медленно в течение промежутка времени t_0 по формуле:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 \frac{t}{t_0}, & \text{если } 0 < t < t_0 \\ q_0, & \text{если } t \geq t_0 \end{cases}$$

то функции $\phi_{1,n}(t)$ и $\phi_{2,n}(t)$ принимают следующий вид:

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

$$\phi_{2,n}(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_0} \left(\frac{1 - \cos \omega_{1,n} t}{\omega_{1,n}^2} - \frac{1 - \cos \omega_{2,n} t}{\omega_{2,n}^2} \right), & \text{если } 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{1}{t_0} \left[\frac{\cos \omega_{1,n} (t - t_0) - \cos \omega_{1,n} t}{\omega_{1,n}^2} - \frac{\cos \omega_{2,n} (t - t_0) - \cos \omega_{2,n} t}{\omega_{2,n}^2} \right], & \text{если } t > t_0 \end{cases}$$

После вычисления функций $\eta_1(t)$ и $\eta_2(t)$ становится возможным составить формулу для вычисления критического расхода селективного отбора воды из промежуточного слоя водоема.

$$q_{кр} = \min \left\{ \frac{H_2 - z_0}{\min \overline{\eta}_1(t)}; \frac{z_0}{\max \overline{\eta}_2(t)} \right\}$$

где $\overline{\eta}_1(t)$ и $\overline{\eta}_2(t)$ – те же функции $\eta_1(t)$ и $\eta_2(t)$, но без коэффициента q_0 .

Результаты исследования

Вышеизложенным способом поставлены и решены контактные начально-краевые задачи селективного отбора воды через трубу из двухслойного стратифицированного водоема. При заборе воды из верхнего слоя (рис. 3) для уравнения искривленной поверхности раздела слоев и, следовательно, для вычисления критического положения поверхности раздела слоев получается формула (32), в которой величина $\eta_{1,n}(t)$ определяется по формуле:

$$\eta_{1,n}(t) = - \frac{\rho_1 t h \lambda_n H_2}{\gamma_{1,n} (\omega_{2,n}^2 - \omega_{1,n}^2)} \left\{ \left[J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right) \frac{sh \lambda_n (H_1 - z_0)}{ch \lambda_n H_1} - \frac{J_0(\mu_n) ch \lambda_n H_1 - 1}{H_1 \lambda_n} \right] \phi_{1,n}(t) - g \lambda_n \left[J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right) \frac{ch \lambda_n (H_1 - z_0)}{ch \lambda_n H_1} - \frac{J_0(\mu_n) th \lambda_n H_1}{H_1 \lambda_n} \right] \phi_{2,n}(t) \right\}$$

При заборе воды из нижнего слоя через трубу (рис. 3) для уравнения поверхности раздела слоев и, следовательно, для вычисления критического расхода и критического положения поверхности раздела слоев получается та же формула (34) при условии, что величина $\eta_{2,n}(t)$ определяется по формуле:

$$\eta_{2,n}(t) = - \frac{\rho_2 [\phi_{1,n}(t) - g \lambda_n t h \lambda_n H_1 \phi_{2,n}(t)]}{\gamma_{1,n} (\omega_{2,n}^2 - \omega_{1,n}^2)} \cdot \left[J_0 \left(\mu_n \frac{a}{2R} \right) \frac{ch \lambda_n (H_2 - z_0)}{ch \lambda_n H_1} - \frac{J_0(\mu_n) th \lambda_n H_2}{H_2 \lambda_n} \right]$$

Для этих двух задач формулы (36) упрощаются и приводятся к следующему виду:

$$\gamma_{1,n} = \rho_2 + \rho_1 t h \lambda_n H_1 t h \lambda_n H_2; \quad \gamma_{2,n} = \rho_2 (t h \lambda_n H_1 + t h \lambda_n H_2);$$

$$\gamma_{3,n} = (\rho_2 - \rho_1) t h \lambda_n H_1 t h \lambda_n H_2.$$

Условие селективного отбора воды из верхнего слоя получится в следующем виде:

$$z_0 \geq \max \bar{\eta}_1(t).$$

Условие селективного отбора воды из нижнего слоя получится в следующем виде:

$$z_0 \geq -\min \eta_2(t).$$

Для критического расхода воды при отборе из верхнего и нижнего слоев получают следующие формулы:

$$q_{1 \text{ кр}} = \frac{z_0}{\max \bar{\eta}_1(t)}, q_{2 \text{ кр}} = \frac{z_0}{\min \bar{\eta}_2(t)},$$

где $\bar{\eta}_1(t)$ и $\bar{\eta}_2(t)$ – те же функции $\eta_1(t)$ и $\eta_2(t)$, но без коэффициента q_0 .

Выводы

В статье поставлена и решена пространственная начально-краевая задача, моделирующая селективный способ отбора воды из промежуточного слоя трехслойного стратифицированного водоема, когда вода отбирается из его внутреннего пространства. Вода забирается трубой, опущенной через свободную поверхность внутрь промежуточного слоя. Задача решена аналитическими методами математической физики. Получена совокупность расчетных формул для вычисления критических положений поверхностей раздела слоев, а также для вычисления критического расхода забираемой воды через водозаборные трубы. Расчет и проектирование селективных водозаборных устройств на основе, полученной в статье совокупности формул, всегда будет гарантировать селективный отбор воды из промежуточного слоя, где вода бывает на 8–10 °С холоднее, чем в поверхностном слое, и содержит меньше наносов, чем нижний слой водоема. Отобранная вода предназначена для охлаждения и отвода избыточного тепла от высокотемпературных тепловыделяющих устройств промышленных предприятий, в том числе тепловых и атомных электростанций.

Литература

1. Аверкиев А.Г., Макаров И.И., Синотин В.И. Бесплотинные водозаборные сооружения. – М.: Л.: Энергия, 1969. – 164 с.
2. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидродинамика. – М.: Недра, 1993. – 408 с.
3. Белолипецкий В.М., Костюк В.Ю., Шокин Ю.И. Математическое моделирование течений стратифицированной жидкости. – Новосибирск: Наука, 1991. – 176 с.
4. Букреев В.И. Способ управления селективным водозабором через отверстие в вертикальной стенке // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51. № 3. – С. 49–54.
5. Вазов В.В., Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. Перевод с английского. – М.: Изд. иностранной литературы, 1963. – 483 с.
6. Гавич И.К. Гидро-Геодинамика. – М.: Недра, 1988. – 246 с.
7. Гинзбург И.П. Теория сопротивления и теплопередачи. – Л.: Изд. Ленинградского университета, 1970. – 378 с.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1977. – 830 с.
10. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.
11. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: Л.: Гостехиздат, 1947. – 928 с.

12. Маскет М. Физические основы технологии добычи нефти. – М.: Л.: Гостехиздат, 1953. – 607 с.
13. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей. / Исполнители А.С. Соколов, И.И. Макаров, В.И. Кравец, З.Р. Филиппова. – СПб.: ВНИИГ, 2003. – 116 с.
14. Музаев И.Д. Математическое моделирование селективных водозаборных процессов в двухслойном стратифицированном водоеме // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 29–40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x.
15. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование одного эффективного способа забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема // *Вычислительные технологии*. – 2020. – Т. 25. № 5. – С. 4–16.
16. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование одного эффективного способа забора воды из определенного слоя двухслойного стратифицированного водоема // *Геология и геофизика Юга России*. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 21–32. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.22.002.
17. Справочник по гидравлике / под ред. В.А.Большакова. – Киев: Вища Школа, 1977. – С. 223–225.
18. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 815 с.
19. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: Недра, 1968. – 299 с.
20. Шокин Ю.И., Рычков А.Д., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. О численных методах решения задач наката волн на берег // *Вычислительные технологии*. – 2015. – Т. 20. № 5. – С. 214–232.
21. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Колос, 2004. – 480 с.
22. Craya A. Recherches theoriques sur lecoulement de couches superposes de fluides de densites defferents // *La Houille Blanche*. – 1949. – Vol. 35. Issue 1. – pp. 44–55. DOI: 10.1051/lhb/1949017.
23. Garabedian P.R. The mathematical theory of three-dimensional cavities and jets // *Bulletin of the American Mathematical Society*. – 1956. – Vol. 62. Issue 3. – pp. 219–235.
24. Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Fluid mechanics of heat disposal from power generation // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1972. – Vol. 4. – pp. 7–32.
25. Karplus W.J. Water coning before breakthrough an electronic analog treatment // *Petroleum Trans. Society*. – 1956. – Vol. 207. Art. No. 240.

References

1. Averkiev A.G., Makarov I.I., Sinotin V.I. Damless water intake structures. Moscow. Leningrad. Energiya. 1969. 164 p. (In Russ.)
2. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. Underground hydrodynamics. Moscow. Nedra. 1993. 408 p. (In Russ.)
3. Belolipetskiy V.M., Kostyuk V.Yu., Shokin Yu.I. Mathematical modelling of stratified fluid flows. Novosibirsk. Nauka. 1991. 176 p. (In Russ.)
4. Bukreev V.I. A method for controlling selective water intake through a hole in a vertical wall. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 2010. Vol. 51. No. 3. pp. 49–54. (In Russ.)
5. Vazov V.V., Forsyth J. Difference methods for solving partial differential equations. Translation from English. Moscow. Publishing house Foreign Literature. 1963. 483 p. (In Russ.)
6. Gavich I.K. Hydro-Geodynamics. Moscow. Nedra. 1988. 246 p. (In Russ.)
7. Ginzburg I.P. The theory of resistance and heat transfer. Leningrad. Leningrad University Publishing House. 1970. 378 p. (In Russ.)
8. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. On the issue of converting the seismic intensity of the Japan Meteorological Agency (JMA) scale into the MSK macroseismic scale. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002. (In Russ.)
9. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers. Moscow. Nauka. 1977. 830 p. (In Russ.)
10. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Partial differential equation in mathematical physics. Moscow. Vysshaya Shkola. 1970. 710 p. (In Russ.)
11. Lamb G. Hydrodynamics. Moscow. Leningrad. Gostekhizdat. 1947. 928 p. (In Russ.)
12. Masket M. Physical bases of oil production technology. Moscow. Leningrad. Gostekhizdat. 1953. 607 p. (In Russ.)

13. Methodological guidelines for technological calculations of cooling ponds. Eds. A.S. Sokolov, I.I. Makarov, V.I. Kravets, Z.R. Filippova. Saint Petersburg. VNIIG. 2003. 116 p. (In Russ.)
14. Muzaev I.D. Mathematical modeling of selective water intake processes in a two-layer stratified reservoir. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 29–40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x. (In Russ.)
15. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of an efficient method for water intake from a specific layer of a two-layer stratified reservoir. *Computational Technologies*. 2020. Vol. 25. No. 5. pp. 4–16. (In Russ.)
16. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of one effective method of water intake from a certain layer of a two-layered stratified reservoir. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 21–32. DOI: 10.46698/VNC.2025.68.22.002. (In Russ.)
17. Reference book on hydraulics. Ed. V.A. Bolshakov. Kiev. Vyshcha Shkola. 1977. pp. 223–225. (In Russ.)
18. Sretenski L.N. Theory of wave motions of a fluid. Moscow. Nauka. 1977. 815 p. (In Russ.)
19. Charny I.A. Underground hydro-gas dynamics. Moscow. Nedra. 1968. 299 p. (In Russ.)
20. Shokin Yu.I., Rychkov A.D., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. On numerical methods for solving problems of wave runup on the shore. *Computational Technologies*. 2015. Vol. 20. No. 5. pp. 214–232. (In Russ.)
21. Shterenlicht D.V. Hydraulics. Moscow. Kolos. 2004. 480 p. (In Russ.)
22. Craya A. Recherches theoriques sur lecoulement de couches superposes de fluides de densites defferents. *La Houille Blanche*. 1949. Vol. 35. Issue 1. pp. 44–55. DOI: 10.1051/lhb/1949017.
23. Garabedian P.R. The mathematical theory of three-dimensional cavities and jets. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1956. Vol. 62. Issue 3. pp. 219–235.
24. Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Fluid mechanics of heat disposal from power generation. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1972. Vol. 4. pp. 7–32.
25. Karplus W.J. Water coning before breakthrough an electronic analog treatment. *Petroleum Trans. Society*. 1956. Vol. 207. Art. No. 240.

УДК 550.452(477)

DOI: 10.46698/VNC.2026.49.12.002

Оригинальная статья

Радионуклидный состав природных вод Крымского полуострова

Д.А. Новиков^{1,2}, В.В. Черных^{1,2}, Н.И. Яндола^{1,2}, Ф.Ф. Дульцев^{1,2}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия,
630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3,
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru;

² Севастопольский государственный университет, Россия, 299053,
г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила: 22.04.2026, доработана: 11.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: в работе представлены новые сведения о концентрациях урана и тория в различных гидрогеологических структурах Крыма. **Актуальность исследований:** в условиях климатических изменений и усиливающегося антропогенного воздействия оценка состояния водных ресурсов становится важной, что особенно актуально в отношении водных ресурсов Крымского полуострова. Этот регион обладает значительным туристско-рекреационным потенциалом, в связи с чем определяется важность сохранения и рационального использования природных вод, применяемых в питьевых целях, санаторно-курортном лечении и сельском хозяйстве. **Цель исследований:** обобщение собственных данных по распределению урана и тория в разных типах природных вод Крымского полуострова. **Материал и методы исследований:** замер быстроизменяющихся параметров проб подземных вод выполнен на месте отбора; лабораторное изучение ионно-солевого и микрокомпонентного состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и другими проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. **Результаты:** воды характеризуются преимущественно $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ составом с величиной общей минерализации от 40 до 330519 мг/дм³. Преобладают нейтральные и щелочные воды с вариацией значений pH от 6 до 10 (в среднем 8). Обстановки изменяются от восстановительных с $Eh = -183$ мВ до окислительных с $Eh = +507$ мВ; содержание растворенного кислорода достигает 27,7 мг/дм³ (в среднем 6,6 мг/дм³). Концентрации радионуклидов в природных водах Крымского полуострова изменяются в следующих диапазонах: ^{238}U от $3,10 \cdot 10^{-7}$ до $0,12$ мг/дм³ и ^{232}Th от $1,92 \cdot 10^{-7}$ до $1,20 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ варьирует в интервале $5,26 \cdot 10^{-5}$ –9,51.

Ключевые слова: природные воды, гидрогеохимия, уран, торий, Крымский полуостров.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 25-43-02207 «Сравнительное исследование радиологической опасности подземных вод в прибрежной зоне Крымского полуострова и Бэйхая».

Для цитирования: Новиков Д.А., Черных В.В., Яндола Н.И., Дульцев Ф.Ф. Радионуклидный состав природных вод Крымского полуострова. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.49.12.002

DOI: 10.46698/VNC.2026.49.12.002

Original paper

Radionuclide composition of natural waters of the Crimean Peninsula

D.A. Novikov^{1,2}, V.V. Chernykh^{1,2}, N.I. Yandola^{1,2}, F.F. Dultsev^{1,2}

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 3 Acad. Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru;

² Sevastopol State University, 33 Universitetskaya Str., Sevastopol 299053, Russian Federation

Received: 22.04.2026, revised: 11.09.2026, accepted:2026

Abstract: This study presents new data on uranium and thorium concentrations in various hydrogeological structures of Crimea. **Relevance of the study:** under conditions of climate change and increasing anthropogenic pressure, assessment of the state of water resources is becoming increasingly important, particularly with regard to the water resources of the Crimean Peninsula. The region has considerable tourism and recreational potential, which highlights the importance of preserving and ensuring the rational use of natural waters utilized for drinking purposes, health-resort treatment, and agriculture. **Objective:** to summarize the authors' data on the distribution of uranium and thorium in different types of natural waters of the Crimean Peninsula. **Materials and methods:** rapidly changing physicochemical parameters of groundwater samples were measured in situ at the sampling sites. Laboratory analyses of the ionic composition and trace-element content were performed using titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry, and other analytical methods at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry, School of Earth Sciences and Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University. **Results:** the waters are predominantly of the $\text{HCO}_3\text{--Ca}$ type, with total dissolved solids ranging from 40 to 330,519 mg/dm³. Neutral and alkaline waters predominate, with pH values ranging from 6 to 10 (mean 8). Redox conditions vary from reducing, with $E_h = -183$ mV, to oxidizing, with $E_h = +507$ mV. Dissolved oxygen concentrations reach 27.7 mg/dm³, with a mean value of 6.6 mg/dm³. Radionuclide concentrations in the natural waters of the Crimean Peninsula vary within the following ranges: ^{238}U from 3.10×10^{-7} to 0.12 mg/dm³ and ^{232}Th from 1.92×10^{-7} to 1.20×10^{-3} mg/dm³. The $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ratio ranges from 5.26×10^{-5} to 9.51.

Keywords: natural waters, hydrogeochemistry, uranium, thorium, Crimean Peninsula.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 25-43-02207, "Comparative study of the radiological hazards of groundwater in the coastal zones of the Crimean peninsula and Beihai".

For citation: Novikov D.A., Chernykh V.V., Yandola N.I., Dultsev F.F. Radionuclide composition of natural waters of the Crimean Peninsula. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.49.12.002

Введение

Регламентирование содержания радионуклидов в питьевых источниках на территории РФ осуществляется согласно СанПиН 2.1.4.1074-01 (ред. от 02.04.2018), ГОСТ Р 51232-98 и ГН 2.1.5.1315-0. Данные нормативы устанавливают порог для урана (^{238}U) на уровне 0,015 мг/дм³, при этом ПДК для тория (^{232}Th) в отечественной законодательной базе не существует. Согласно экспертным оценкам НКДАР ООН (UNSCEAR), свыше 98% совокупной дозы на население формируется за счет природных радиоактивных источников. В связи с этим изучение естественной радиоактивности гидросферы оста-

ется одной из приоритетных задач глобального мониторинга. Для Крыма, обладающего уникальным потенциалом в сфере санаторно-курортного и рекреационного комплекса, рациональное недропользование имеет критически важное значение. Продление государственной программы «Социально-экономическое развитие Республики Крым и г. Севастополя» до 2030 года (Постановление Правительства РФ № 2181 от 27.12.2025 г.) подчеркивает необходимость обеспечения региона качественными водными ресурсами для нужд здравоохранения, агропромышленного сектора и питьевого обеспечения населения.

Первый систематический обзор по радиоактивности гидросферы был представлен В.И. Вернадским в фундаментальном труде «Очерки геохимии», впервые опубликованном в Париже в 1924 году. В своих исследованиях [Вернадский, 1997] ученый выделял работы таких первопроходцев в области изучения радиоактивных свойств воды, как Е.С. Бурксер, В.Г. Хлопин, А.Н. Огильви, И.А. Бергман, А.П. Соколов и др. Согласно современной классификации [Геологический словарь..., 2012], среди подземных вод с аномальным содержанием радионуклидов выделяют следующие классы: радоновые (активность Rn достигает $7,5 \cdot 10^5$ Бк/дм³); радиевые (концентрация Ra варьируется от $n \cdot 10^{-11}$ до $n \cdot 10^{-9}$ г/дм³); урановые (содержание U от $n \cdot 10^{-5}$ до $n \cdot 10^{-2}$ г/дм³); смешанные. Примечательно, что в контексте изучения радиоактивности природных вод ториевая составляющая традиционно оставалась вне поля зрения исследователей. Со времен В.И. Вернадского доминировало убеждение, что концентрации ²³²Th и его производных в гидросфере настолько мизерны, что находятся за пределами чувствительности методов анализа. Великий естествоиспытатель полагал, что «торий стоит вне геохимии воды» и фактически не участвует в глобальном водном цикле [Вернадский, 1997]. Однако накопленный к настоящему времени массив данных указывает на необходимость пересмотра и уточнения данного классического постулата.

Современные комплексные исследования, представленные в мировой научной периодике, акцентируют внимание на закономерностях распределения радионуклидов в источниках питьевого водоснабжения и оценке их воздействия на здоровье населения [Kochhann et al., 2013; Lytle et al., 2014; Abdurabu et al., 2016; Seddique et al., 2020]. Значительный массив публикаций сфокусирован на анализе геохимических, гидрогеологических и литологических факторов, обуславливающих миграцию естественных радионуклидов в гидрогеологических системах [Madi et al., 2014; Dzaugis et al., 2016; Guo et al., 2018; Zhao et al., 2020; Novikov et al., 2021]. Отдельный пласт научных работ посвящен проблемам техногенного радиоактивного загрязнения гидросферы и почвенного покрова в районах освоения месторождений полезных ископаемых [Ivanova et al., 2015; Desbarats et al., 2016; He et al., 2018; Yi et al., 2020].

В современной научной повестке возрастает число работ, посвященных мониторингу качества источников питьевых вод в условиях глобальной климатической повестки. Особое внимание уделяется экологической экспертизе водных систем в регионах с различной интенсивностью техногенного воздействия, вопросам водообеспечения крупных агломераций и долгосрочному прогнозированию водопотребления [Raftery et al., 2017; Sultan et al., 2025; Guo et al., 2025]. Согласно наиболее консервативным климатическим моделям, к началу XXII века неизбежен рост температуры на планете минимум на 2 °С. Данный процесс, протекающий независимо от сдерживания эмиссии парниковых газов, приведет к необратимым трансформациям биосферы. Экстремальные гидрометеорологические явления – участившиеся засухи, аномальные температурные пики и подъем уровня Мирового океана – приобретут критический характер при преодолении двухградусного порога, создавая новые вызовы для экологической безопасности [Raftery et al., 2017].

Проблема дефицита и качества водных ресурсов наиболее активно обсуждается в странах Латинской Америки, Азии и Африки, где ситуация с водообеспечением населения стоит наиболее остро, что во многом сопоставимо с существующими проблема-

ми Крымского полуострова. В последние годы значительное внимание уделяется мониторингу подземных вод в урбанизированных районах Китая, Алжира, Индии, Израиля, Камеруна, Бангладеш, Нигера, США, Словении и ряда других государств [Mahmoudi et al., 2015; Benrabah et al., 2016; Aloni, Brenner, 2017; Yepu et al., 2025; Liu et al., 2025; Li et al., 2025; Yang et al., 2025]. Комплексные вопросы организации хозяйственно-питьевого водоснабжения городских агломераций, включая риски техногенного загрязнения и истощения запасов, детально проанализированы в многочисленных региональных исследованиях зарубежных авторов [Singh et al., 2015; Foto et al., 2016; Zhang et al., 2017; Castiglioni et al., 2018; Kumar et al., 2025; Medhi et al., 2025; Thakur, 2025; Mantashloo et al., 2025].

Гидрогеологическое изучение Крымского полуострова охватывает более чем вековой период и неразрывно связано с фундаментальными трудами С.В. Альбова, В.Н. Дублянского, Н.С. Огняника, В.М. Шестопалова, М.В. Чуринова, О.Е. Фесюнова и ряда других выдающихся ученых. Современный этап развития региональной гидрогеологии представлен работами Е.П. Каюковой, Д.А. Новикова, С.В. Токарева, А.В. Лущика, А.А. Маслова, Д.Н. Горбцова, В.Н. Самарцева и других. Несмотря на значительную изученность гидродинамических и гидрохимических процессов, специфика радионуклидного состава природных вод в данных работах оставалась практически не затронутой. Существующий пробел в знаниях определяет цель настоящей статьи, которая заключается в систематизации и обобщении авторских данных о закономерностях распределения урана и тория в различных типах водных объектов Крыма.

Материал и методы исследования

Фундаментом настоящей работы послужили результаты полевых экспедиций и аналитических исследований, проведенных в период с 2018 по 2025 гг. За указанный промежуток времени было отобрано и подвергнуто детальному анализу 738 проб природных вод, характеризующихся значительным изотопно-геохимическим разнообразием – от ультрапресных типов до предельно насыщенных рассолов. Пространственное распределение точек мониторинга отражено на фрагменте карты фактического материала (рис. 1).

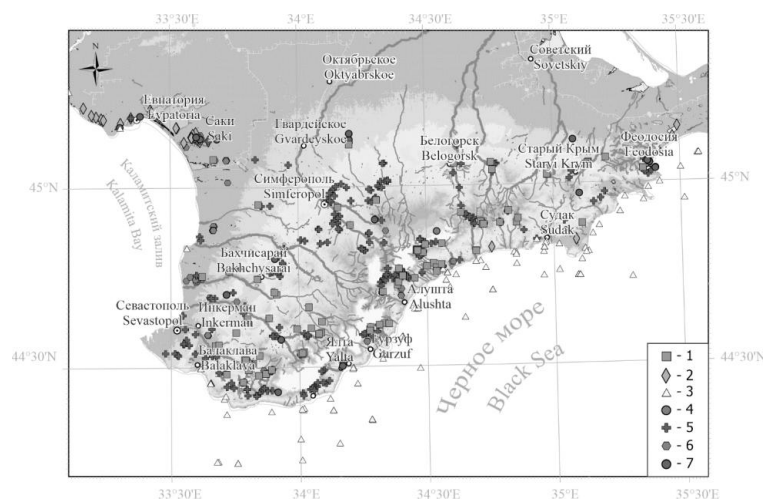


Рис. 1. Местоположение изученных природных вод Крымского полуострова

Поверхностные воды: 1 – речные и озерные (преимущественно пресные),
2 – речные и озерные (от солоноватых до рассолов), 3 – морские; подземные воды:
4 – конденсационные (пещеры), 5 – грунтовые,
6 – артезианские (преимущественно пресные), 7 – артезианские (минеральные) /

Fig. 1. Location of the studied natural waters of the Crimean Peninsula Surface waters:
1 – river and lake (mostly fresh), 2 – river and lake (from brackish to brine), 3 – marine; groundwater:
4 – condensation (caves), 5 – groundwater, 6 – artesian (mostly fresh), 7 – artesian (mineral)

На 2026 год запланировано расширение исследовательской программы в рамках гранта Российского научного фонда (№ 25-43-02207) с акцентом на изучение гидрогеологических структур юго-западного Крыма. Ранее авторским коллективом были опубликованы данные по радионуклидному составу ряда водных объектов Крымского полуострова [Новиков и др., 2021]. Морские экспедиционные работы для поиска субмаринных источников подземных вод по прибрежным районам Крыма и их детального изучения выполнялись на научно-исследовательском судне «Пионер-М». Пробы морской воды отбирались на глубинах от 12,5 до 120 м.

Определение нестабильных параметров, таких как величина рН, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), температура, а также концентрация растворенного кислорода и гидрокарбонат-иона (HCO_3^-), осуществлялось непосредственно в полевых условиях методом титриметрии. Для этих целей применялся портативный мультипараметровый комплекс Hanna HI98195, оксиметр Hanna HI98198 и специализированная полевая гидрогеохимическая лаборатория. Детальное изучение микрокомпонентного и ионно-солевого состава проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии Томского политехнического университета. Аналитический комплекс работ включал использование методов титриметрии, ионной хроматографии, а также масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Аналитические измерения выполнены специалистами В.В. Куровской, А.С. Погуца и Э.С. Бирко.

Полученные результаты и их обсуждение

В структурно-гидрогеологическом отношении район исследований включает в себя Азово-Кубанский и Равнинно-Крымский артезианские бассейны, а также складчатую область, приуроченную к мегаантиклинорию Горного Крыма (рис. 2).

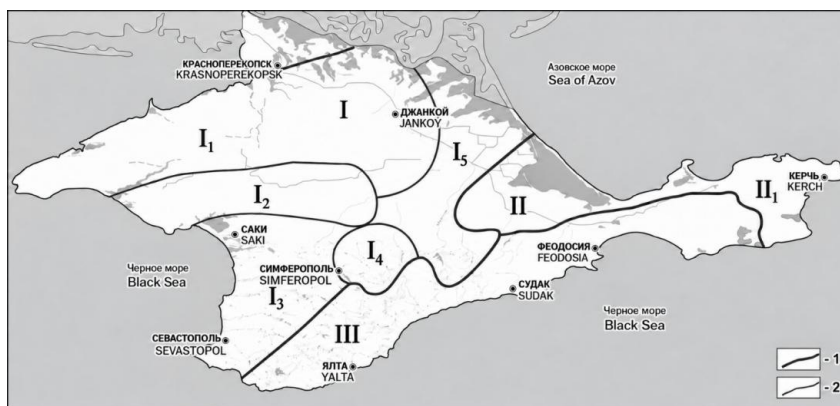


Рис. 2. Схема гидрогеологического районирования Крымского полуострова (согласно «Карта подземных вод, L-(36), (37)», 1983).

Границы: I – I – Равнинно-Крымский артезианский бассейн, II – Азово-Кубанский артезианский бассейн, III – Гидрогеологическая складчатая область мегаантиклинория Горного Крыма; 2 – I₁ – Северо-Сивашский артезианский бассейн, I₂ – Новоселовское поднятие, I₃ – Альминский артезианский бассейн, I₄ – Симферопольское поднятие, I₅ – Белогорский артезианский бассейн, II₁ – Керченско-Таманская система малых артезианских бассейнов /

Fig. 2. Scheme of hydrogeological zoning of the Crimean Peninsula (according to the “Map of groundwater, L-(36), (37)”, 1983) Boundaries: I – I – Lowland-Crimean Artesian basin, II – Azov-Kuban Artesian basin, III – Hydrogeological folded area of the megaanticlinory of the Mountainous Crimea; 2 – I₁ – North Sivash Artesian basin, I₂ – Novoselov uplift, I₃ – Alminsky Artesian basin, I₄ – Simferopol uplift, I₅ – Belogorsky Artesian basin III is the Kerch–Taman system of small artesian basins

Большая часть территории полуострова относится к Равнинно-Крымскому артезианскому бассейну, структурными элементами которого выступают Симферопольское

и Новоселовское поднятия, а также Белогорский, Альминский и Северо-Сивашский бассейны второго порядка. Новоселовское поднятие морфологически выражено в виде приподнятого блока фундамента герцинского возраста, вмещающее напорные термальные и минеральные воды. В свою очередь, Симферопольское поднятие представляет собой антеклизу, сложенную палеоген-неогеновыми толщами; его северный сегмент выполняет роль области питания напорных горизонтов, тогда как южный сложен преимущественно слабопроницаемыми и водоупорными меловыми фациями. Северо-Сивашский бассейн, генетически связанный с одноименным прогибом, отличается замедленным водообменом: скорость миграции подземных вод снижается в 10–20 раз при движении с юга на север. При этом южная окраина бассейна служит зоной питания для неогеновых комплексов, в то время как северная, погруженная область обеспечивает транзит и формирование напоров в отложениях мела и неогена.

В западной части полуострова выделяется Альминский бассейн, локализованный в границах одноименной депрессии; его южный фланг геоморфологически совпадает с внешней и предгорной грядами Крымских гор. Северо-восточный сектор региона занимает Белогорский бассейн, генетически связанный с соответствующим прогибом. Вдоль восточного и северо-восточного побережья прослеживается Азово-Кубанский артезианский бассейн. В его структуру входит Керченско-Таманская система малых артезианских бассейнов, приуроченных к плиоцен-верхнемиоценовым толщам и содержащих высокоминерализованные воды. Складчатая область мегаантиклинория Горного Крыма охватывает южную и юго-восточную окраины полуострова – от мыса Форос до центральной части Керченского полуострова (рис. 2). Данная структура объединяет ряд тектонических элементов, включая Восточно- и Западно-Крымский синклиории, антиклинальные ядра (Туакское и Качинское), а также Агармышское поднятие, Судакско-Феодосийскую зону складчатости и юго-западное окончание мегаантиклинория.

Исследованные объекты весьма разнообразны по ионно-солевому составу и минерализации. Всю совокупность проб можно классифицировать на две основные группы: поверхностные и подземные воды. К первой группе отнесены речные, пресные и соленые озера (вплоть до крепких рассолов), а также морские акватории. Вторая группа представлена конденсационными (пещерными), грунтовыми и артезианскими (как пресными, так и минеральными) водами. С геохимической точки зрения изученные воды характеризуются преимущественно $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ составом (рис. 3) с величиной общей минерализации от 40 до 330519 мг/дм³ (табл. 1). Преобладают нейтральные и щелочные воды с вариацией значений pH от 6 до 10 (в среднем 8).

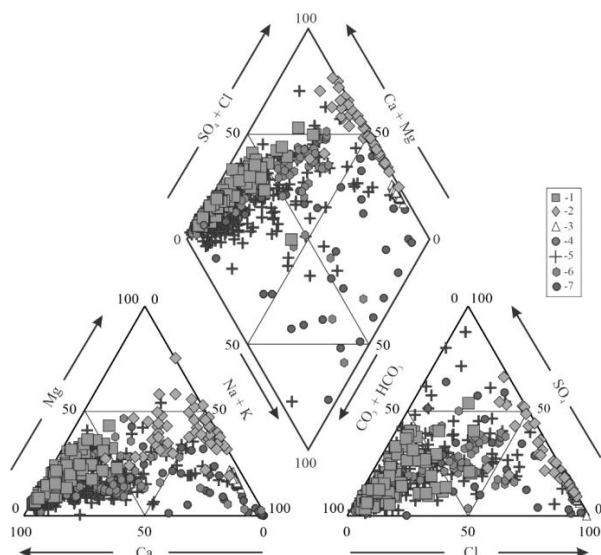


Рис. 3. Диаграмма Пайпера состава природных вод Крымского полуострова.

Поверхностные воды: 1 – речные и озерные (преимущественно пресные),

2 – речные и озерные (от солоноватых до рассолов), 3 – морские; подземные воды:

4 – конденсационные (пещеры), 5 – грунтовые, 6 – артезианские (преимущественно пресные),

7 – артезианские (минеральные) /

Fig. 3. Piper diagram of the composition of the natural waters of the Crimean Peninsula.

Surface waters: 1 – river and lake (mostly fresh),

2 – river and lake (from brackish to brine),

3 – marine; groundwater: 4 – condensation (caves),

5 – groundwater, 6 – artesian (mostly fresh),

7 – artesian (mineral)

Таблица 1 / Table 1

**Распределение ^{234}U , ^{232}Th , $^{232}\text{Th}/^{234}\text{U}$ в природных водах
Крымского полуострова / Distribution of ^{234}U , ^{232}Th , $^{232}\text{Th}/^{234}\text{U}$
in the natural waters of the Crimean Peninsula**

Группа вод / Water group	M*, мг/дм ³ / TDS*, mg/dm ³	Преобладающий хим. тип / Dominant chemical type	^{234}U , мкг/дм ³ / ^{234}U , µg/dm ³	^{232}Th , мкг/дм ³ / ^{232}Th , µg/dm ³	$^{232}\text{Th}/$ ^{234}U
Поверхностные воды / Surface waters					
Речные и озёрные (преимущественно пресные) / River and lake (primarily freshwater)	<u>160-1000</u> 401 (105)	HCO ₃ -Ca HCO ₃ -Ca-Mg	<u>0,05-40,00</u> 0,57(105)	<u>сл./trace-1,20</u> 0,03(98)	<u>сл./</u> <u>trace-2,26</u> 0,06(98)
Речные и озёрные (от соленоватых до рассолов) / Lakes (from saltwater to brine)	<u>1400-330519</u> 148285(50)	Cl-Na HCO ₃ -Ca	<u>0,47-82,13</u> 12,24(50)	<u>0,01-1,03</u> 0,12(15)	<u>сл./</u> <u>trace-0,52</u> 0,11(15)
Морские / Seawater	<u>8541-21108</u> 17904(139)	Cl-Na	<u>0,30-2,69</u> 1,65(139)	<u>сл./trace-0,24</u> 0,06(38)	<u>сл./</u> <u>trace-0,14</u> 0,03(38)
Подземные воды / Groundwater					
Конденсационные (пещеры) / Condensation (caves)	40	HCO ₃ -Ca	0,03	0,006	0,23
Грунтовые / Groundwater	<u>214-6107</u> 707(330)	HCO ₃ -Ca HCO ₃ -Ca-Mg	<u>0,02-120</u> 1,99(330)	<u>сл./trace-0,10</u> 0,01(238)	<u>сл./</u> <u>trace-0,71</u> 0,01(238)
Артезианские (преимущественно пресные) / Artesian (primarily fresh)	<u>359-2306</u> 904(74)	HCO ₃ -Ca Cl-HCO ₃ -Ca-Na	<u>сл./trace-3,06</u> 1,11(75)	<u>сл./trace-0,09</u> 0,01(47)	<u>сл./</u> <u>trace-0,14</u> 0,02(47)
Артезианские (минеральные) / Artesian (mineral)	<u>427-25411</u> 2638(34)	HCO ₃ со смешанным катионным составом / HCO ₃ with mixed cationic composition	<u>сл./trace-14,55</u> 0,78(28)	<u>сл./trace-0,47</u> 0,03(27)	<u>сл./</u> <u>trace-9,51</u> 1,59(22)

Примечание: в числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее, в скобках – количество определений. M* – величина общей минерализации вод; сл. – следовые концентрации /

Note: the numerator contains the range of values, the denominator contains the average, and the number of definitions in parentheses. M* is the value of the total mineralization of waters; sl. is the trace concentrations.

Значения окислительно-восстановительного потенциала Eh изменяются от восстановительных -183 мВ до окислительных +507 мВ, содержание растворенного кислорода достигает 27,7 мг/дм³ (в среднем 6,6 мг/дм³). Современные химико-аналитические исследования природных вод исследуемой территории выявили широкую вариацию содержаний урана, тория и отношений $^{232}\text{Th}/^{234}\text{U}$, что указывает на их неравновесное состояние в пределах изученных водоносных горизонтов (рис. 4).

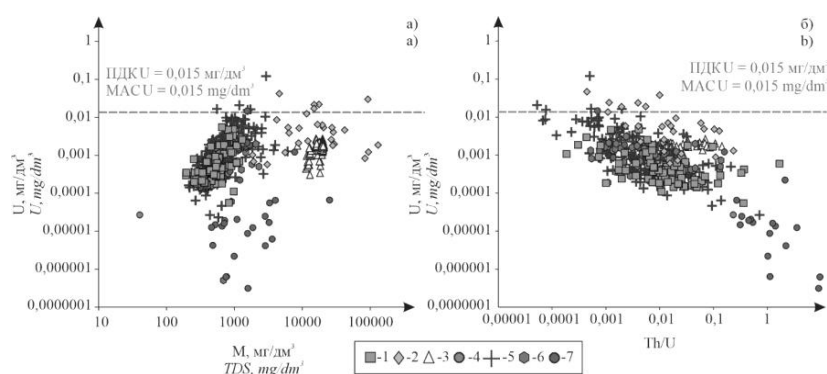


Рис. 4. Зависимость содержания урана в природных водах Крымского полуострова от величины их общей минерализации (а) и отношения Th/U (б).

Поверхностные воды: 1 – речные и озерные (преимущественно пресные), 2 – речные и озерные (от солоноватых до рассолов), 3 – морские; подземные воды: 4 – конденсационные (пещеры), 5 – грунтовые, 6 – артезианские (преимущественно пресные), 7 – артезианские (минеральные) /

Fig. 4. Dependence of the uranium content in the natural waters of the Crimean Peninsula on the value of their total mineralization (a) and Th/U ratio (b). Surface waters: 1 – river and lake (mostly fresh), 2 – lake (from brackish to brine), 3 – marine; groundwater: 4 – condensation (caves), 5 – underground, 6 – artesian (mostly fresh), 7 – artesian (mineral)

Поверхностные воды, объединенные в класс речных и озерных (преимущественно пресных) (105 проб), характеризуются pH от 7,5 до 9,6 (среднее 8,3), преимущественно окислительной средой с Eh от +19,4 до +293,5 мВ (среднее +179 мВ) и средним содержанием O_2 раств. 8,0 мг/дм³. Общая минерализация изменяется в широких пределах – от 160 до 1000 мг/дм³ (в среднем 401 мг/дм³). Среднее содержание кремния – 3 мг/дм³. Состав также весьма разнообразен при доминировании гидрокарбонатного кальциевого типа. Содержание ^{238}U составляет $5,06 \cdot 10^{-5}$ – $0,04$ мг/дм³ (в среднем $5,72 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³); содержание ^{232}Th – от $1,92 \cdot 10^{-7}$ до $1,20 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ (в среднем $2,85 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³); отношение Th/U варьирует в интервале от $2,04 \cdot 10^{-4}$ до 2,26 (среднее $6,21 \cdot 10^{-2}$).

Класс речных и озерных вод (от солоноватых до рассолов) (50 проб) объединяет воды со средним значением pH равным 8,4 (7,4–10,0), Eh равным 69 мВ (разброс от -385 до +232,5 мВ) и средним содержанием O_2 раств. 5,8 мг/дм³. Уровень минерализации объектов данного класса колеблется в широком интервале – от 1,4 до 330,5 г/дм³ (при средней величине 107,7 г/дм³). Химический облик вод характеризуется большим разнообразием: доминируют воды хлоридно-натриевого типа (68%), существенную долю составляют гидрокарбонатно-кальциевые воды (27%), в то время как на сульфатно-хлоридные разновидности со смешанным катионным составом приходится около 5%. Содержание ^{232}Th изменяется в диапазоне от $1,43 \cdot 10^{-5}$ до $1,03 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ (среднее значение $2,24 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³); содержание ^{238}U составляет от $4,7 \cdot 10^{-4}$ до $8,21 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³ (в среднем $1,22 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³); отношение Th/U варьирует в интервале от $1,58 \cdot 10^{-3}$ до 0,52 (среднее значение 0,11).

Пробы, относящиеся к классу морских вод (140 проб), характеризуются следующими средними значениями: Eh = +101 мВ, pH = 9, O_2 раств. = 7 мг/дм³. По химическому типу воды относятся к хлоридным натриевым со средним значением минерализации 17,9 г/дм³ (8,5–21,1 г/дм³). Пробы этого класса отбирались на разном удалении от береговой линии и с разной глубины, которая варьировала от поверхности до 120 метров. Концентрации ^{232}Th и ^{238}U лежат в диапазонах $6,73 \cdot 10^{-6}$ – $2,41 \cdot 10^{-4}$ и $3,03 \cdot 10^{-4}$ – $2,69 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ соответственно. Отношение Th/U варьирует в диапазоне $5,68 \cdot 10^{-3}$ –0,14 (в среднем $3,54 \cdot 10^{-2}$).

К подземным водам, а именно к *классу конденсационных вод*, относится одна проба, отобранная в пещере Большой Бузлук, со следующими показателями: $E_h = +122,6$ мВ, $pH = 8,56$, содержание $O_{2 \text{ раств.}}$ – $5,0$ мг/дм³. По химическому типу проба соответствует гидрокарбонатному кальциевому составу с величиной общей минерализации 40 мг/дм³; содержание ^{232}Th и ^{238}U составляет $6,19 \cdot 10^{-6}$ и $2,66 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³ соответственно, а их отношение – $0,23$.

Класс грунтовых вод объединяет 336 проб, характеризующихся значениями E_h от -62 до $+307$ мВ, pH от 6 до 9 , при средних величинах $+189$ мВ и 8 соответственно. Среднее содержание $O_{2 \text{ раств.}}$ оценивается в 7 мг/дм³. По составу воды этого класса относятся преимущественно к гидрокарбонатному кальциевому типу (64%). Величина общей минерализации грунтовых вод изменяется от 214 мг/дм³ до $6,1$ г/дм³ (среднее значение 707 мг/дм³). Вариация содержаний ^{232}Th составляет $4,01 \cdot 10^{-7}$ – $1,04 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³, а ^{238}U $2,30 \cdot 10^{-5}$ – $0,12$ мг/дм³; отношение Th/U изменяется от $5,26 \cdot 10^{-5}$ до $0,71$ (среднее $1,57 \cdot 10^{-2}$).

Для *класса пресных артезианских вод* (75 проб) характерны следующие значения показателей: E_h от -178 до $+297$ мВ, pH от 7 до 9 , среднее содержание $O_{2 \text{ раств.}}$ – $5,2$ мг/дм³. В этой группе доминирующее положение занимают гидрокарбонатно-кальциевые воды (24% выборки), а также смешанные типы: хлоридно-гидрокарбонатные и хлоридно-сульфатные кальциево-натриевого состава, на долю которых приходится по 11% . Величина общей минерализации составляет от 359 до 2306 мг/дм³, среднее значение – 904 мг/дм³. Содержание ^{232}Th и ^{238}U изменяется в пределах $2,04 \cdot 10^{-7}$ – $9,95 \cdot 10^{-5}$ и $5,04 \cdot 10^{-7}$ – $3,06 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ соответственно; среднее значение их отношения равно $1,75 \cdot 10^{-2}$ (интервал $5,20 \cdot 10^{-4}$ – $0,14$).

Воды, объединенные в *класс артезианских (минеральных)* (34 пробы), характеризуются pH от 7 до 10 (в среднем $8,0$), E_h от $-351,0$ до $+149$ мВ (в среднем $-103,0$) и средним содержанием $O_{2 \text{ раств.}}$ $3,0$ мг/дм³. Величина общей минерализации изменяется в широком диапазоне от 426 мг/дм³ до $25,4$ г/дм³ (в среднем 2638 мг/дм³). Химический состав вод разнообразен, однако доминирует гидрокарбонатный тип со смешанным катионным составом (50%). Содержание ^{238}U составляет $3,10 \cdot 10^{-7}$ – $1,46 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³ (в среднем $7,8 \cdot 10^{-4}$); содержание ^{232}Th – $7,06 \cdot 10^{-7}$ – $4,69 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³ (в среднем $3,56 \cdot 10^{-5}$); отношение Th/U варьирует в интервале $7,00 \cdot 10^{-4}$ – $9,51$ (в среднем $1,59$). Значения отношения Th/U более единицы связаны с интенсивной миграционной способностью Th в бескислородной среде при повышенных температурах и высокой гидрогеологической закрытости недр.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований региональных гидрогеохимических исследований. Установлено, что природные воды в основном имеют HCO_3 – Ca состав, с величиной общей минерализации от $40,5$ до 330519 мг/дм³. Преобладают нейтральные и щелочные воды с вариацией значений pH от 6 до 10 (в среднем 8). Значения окислительно-восстановительного потенциала E_h изменяются от восстановительных -183 мВ до окислительных $+507$ мВ, содержание растворенного кислорода достигает $27,7$ мг/дм³ (в среднем $6,6$ мг/дм³).

2. Концентрации урана (^{238}U) изменяются в широком диапазоне – от $3,10 \cdot 10^{-7}$ до $0,12$ мг/дм³, тория (^{232}Th) – от $1,92 \cdot 10^{-7}$ до $1,20 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ составляет $5,26 \cdot 10^{-5}$ – $9,51$. Природа радиоактивности большинства изученных вод связана с ураном. В наибольшей степени обогащены ураном воды соленых озер и нескольких родников, где его содержание составляет $0,015$ – $0,12$ мг/дм³, при среднем значении $0,032$ мг/дм³.

3. Результаты выполненных исследований будут использованы при оценке радиологической опасности природных вод Крымского полуострова при создании необходимой туристической инфраструктуры.

Литература

1. Вернадский В.И. Труды по радиогеологии. – М.: Наука, 1997. – 319 с.
2. Геологический словарь: в 3 т. / гл. ред. О.В. Петров. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. – Т. 3: Р–Я. – 440 с.
3. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Пыряев А.Н., Хващевская А.А., Ничкова Л.А., Сигора Г.А., Яхин Т.А. Новые изотопно-гидрогеохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (крымский полуостров) // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. № 12. – С. 1705–1726.
4. Abdurabu W.A., Saleh M.A., Ramli A.T., Heryansyah A. Occurrence of natural radioactivity and corresponding health risk in groundwater with an elevated radiation background in Juban District, Yemen // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 75. – 1360. DOI: 10.1007/s12665-016-6142-z.
5. Aloni A., Brenner A. Use of Cotton as a Carbon Source for Denitrification in Biofilters for Groundwater Remediation // *Water*. – 2017. – Vol. 9. – pp. 714–725. DOI: 10.3390/w9090714.
6. Benrabah S., Attoui B., Hannouche M. Characterization of groundwater quality destined for drinking water supply of Khenchela City (eastern Algeria) // *Journal of Water and Land Development*. – 2016. – Vol. 30. – pp. 13–20. DOI: 10.1515/JWLD-2016-0016.
7. Castiglioni S., Davoli E., Riva F., Palmiotto M., Camporini P., Manenti A., Zuccato E. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy // *Water Research*. – 2018. – Vol. 131. – pp. 287–298. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.047.
8. Desbarats A.J., Percival J.B., Venance K.E. Trace element mobility in mine waters from granitic pegmatite U–Th–REE deposits, Bancroft area, Ontario // *Applied Geochemistry*. – 2016. – Vol. 67. – pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.02.010.
9. Dzaugis M.E., Spivack A.J., Dunlea A.G., Murray R.W., D'Hondt S. Radiolytic Hydrogen Production in the Subseafloor Basaltic Aquifer // *Frontiers in Microbiology*. – 2016. – Vol. 7. – 76. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00076.
10. Foto E., Ouoko Delombaut F.C.S., Djebebe Ndjiguim C.L., Songuele Bomagayen J., Poumaye N., Mabingui J. Sanitary mapping of well waters in the commune of Bimbo in the Central African Republic (CAR) // *Field Actions Science Reports*. – 2016. – Vol. 9. – pp. 1–21.
11. Guo J., Cao W., Li X., Ren Y., Lu C., Wang Y., Song L., Liu Y., Sun X. Comparative study on genesis mechanism of high arsenic groundwater in typical alluvial plain of the Upper and lower Yellow River, China // *Science of the Total Environment*. – 2025. – Vol. 957. – 177694. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177694.
12. Guo H., Zhao W., Li H., Xiu W., Shen J. High radionuclides in groundwater of an inland basin from Northwest China: Origin and fate // *ACS Earth and Space Chemistry*. – 2018. – Vol. 25. – 33. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.8b00108.
13. He L., Gao B., Luo X., Jiao J., Qin H., Zhang C., Dong Y. Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water near a Uranium Tailing Pond in Jiangxi Province, South China // *Sustainability*. – 2018. – Vol. 10. – 1113. DOI: 10.3390/su10041113.
14. Ivanova K., Stojanovska Z., Badulin V., Kunovska B., Yovcheva M. Radiological impact of surface water and sediment near uranium mining sites // *Journal of Radiological Protection*. – 2015. – Vol. 35. – pp. 819–834. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/819.
15. Kochhann D., Behr E.R., Chaves A., Mesko M.F., Dressler V.L., Flores E.M.M., Baldisserotto B. Environmental quality evaluation of the Vacacai River, Rio Grande do Sul, Brazil // *Environmental Earth Sciences*. – 2013. – Vol. 70. – pp. 1727–1733. DOI: 10.1007/s12665-013-2260-z.
16. Kumar P., Khan P.K., Kumar A. Health risk assessment upon exposure to groundwater arsenic among individuals of different sex and age groups of Vaishali district, Bihar (India) // *Toxicology Reports*. – 2025. – Vol. 14. – 102024. DOI: 10.1016/j.toxrep.2025.102024.
17. Li Y., Xiao L., Zeng X.C. Hydrogen gas oxidation-driven reductive mobilization of arsenic in solid phase contributing to arsenite contamination in groundwater: Insights from metagenomic and microcosm analyses // *Journal of Hazardous Materials*. – 2025. – Vol. 488. – 137444. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137444.
18. Liu X., Yue F.J., Wong W.W., Lin S.C., Guo T.L., Li S.L. Arsenic toxicity exacerbates China's groundwater and health crisis // *Environment International*. – 2025. – Vol. 198. – 109435. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109435.
19. Lytle D.A., Sorg T., Wang L., Chen A. The accumulation of radioactive contaminants in drinking water distribution systems // *Water Research*. – 2014. – Vol. 50. – pp. 396–407. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.050.

20. Madi K., Nyabeze P., Gwavava O., Sekiba M., Zhao B. Uranium, thorium and potassium occurrences in the vicinity of hot springs in the northern neotectonic belt in the Eastern Cape Province, South Africa // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2014. – Vol. 301. – pp. 351–363. DOI: 10.1007/s10967-014-3183-1.
21. Mahmoudi N., Nakhaei M., Porhemmat J. Assessment of hydrogeochemistry and contamination of Varamin deep aquifer, Tehran Province, Iran // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 76. – 370. DOI: 10.1007/s12665-017-6698-2.
22. Mantashloo A., Shokoohi R., Torkshavand Z., Chavoshi E., Khazaei S., Khazaei M., Shabanloo A. Monte Carlo simulation for human health risk assessment of groundwater contaminated with arsenic at an Iranian semi-arid region // *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. – 2025. – Vol. 23. – 101069. DOI: 10.1016/j.enmm.2025.101069.
23. Medhi S., Choudhury R. Spatial and temporal distribution of arsenic in groundwater of the Brahmaputra River floodplains in Assam, India // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2025. – Vol. 28. – 101400. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101400.
24. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2021. – Vol. 15. – pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.
25. Raftery A.E., Zimmer A., Frierson D.M.V., Startz R., Liu P. Less than 2 °C warming by 2100 unlikely // *Nature Climate Change*. – 2017. – Vol. 7. – pp. 637–641. DOI: 10.1038/nclimate3352.
26. Seddique A.A., Kon Y., Anma R., Masuda H., Bhattacharya P., Yokoo Y., Basak S.B., Shinoda K. Sources of U and Th in groundwater of the paleobeach aquifer at Cox's Bazar, Southeast Bangladesh // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2020. – Vol. 10. – 100332. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100332.
27. Singh A., Srivastav S.K., Kumar S., Chakrapani G.J. A modified – DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 74. – pp. 5475–5490. DOI: 10.1007/s12665-015-4558-5.
28. Sultan M.W., Qureshi F., Ahmed S., Kamyab H., Rajendran S., Ibrahim H., Yusuf M. A comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: Sources, detection, mitigation strategies and cost analysis // *Environmental Research*. – 2025. – Vol. 265. – 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.
29. Thakur B.K. Welfare estimation of groundwater arsenic contamination in India: Insights for water policy // *Journal of Cleaner Production*. – 2025. – Vol. 497. – 145107. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145107.
30. Yang C., Xu Y., Yu T., Li Y., Zeng X.C. Microbial reductive mobilization of As(V) in solid phase coupled with the oxidation of sulfur compounds: An overlooked biogeochemical reaction affecting the formation of arsenic-contaminated groundwater // *Journal of Hazardous Materials*. – 2025. – Vol. 492. – 138234. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138234.
31. Yepu L., Guobing W., Tao J., Ying Y., Hongyan G. Enhanced sustainable remediation of co-contaminated soil and groundwater with lead and arsenic utilizing the willow-vetiver-permeable reactive barrier system // *Science of the Total Environment*. – 2025. – Vol. 977. – 179343. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179343.
32. Yi L., Gao B., Liu H., Zhang Y., Du C., Li Y. Characteristics and Assessment of Toxic Metal Contamination in Surface Water and Sediments Near a Uranium Mining Area // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2020. – Vol. 17. – 548. DOI: 10.3390/ijerph17020548.
33. Zhang Y., Li H., Xiao K., Wang Xuejing, Lu X., Zhang M., An A., Qu W., Wan L., Zheng C., Wang Xusheng, Jiang X. Improving Estimation of Submarine Groundwater Discharge Using Radium and Radon Tracers: Application in Jiaozhou Bay, China // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2017. – Vol. 122. – pp. 8263–8277. DOI: 10.1002/2017JC013237.
34. Zhao C., Zhang P., Li X., Ning Y., Tan L., Edwards R.L., Yao X., Cheng H. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Uranium Isotopes in Saline Lake Waters in the Northeast of Qaidam Basin // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – 74. DOI: 10.3390/min10010074.

References

1. Vernadsky V.I. Works on Radiogeology. Moscow. Nauka. 1997. 319 p. (In: Russ.)
2. Geological Dictionary: in 3 Volumes. Ed. O.V. Petrov. 3rd ed., revised and enlarged. Saint Petersburg. VSEGEI. 2012. Vol. 3. R–Ya. 440 p. (In: Russ.)

3. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Pyryaev A.N., Khvashchevskaya A.A., Nishkova L.A., Sigora G.A., Yakhin T.A. New isotope-hydrogeochemical data on the composition of natural waters of the Baydar Valley, Crimean Peninsula. *Russian Geology and Geophysics*. 2021. Vol. 62. No. 12. pp. 1705–1726. (In: Russ.)
4. Abdurabu W.A., Saleh M.A., Ramli A.T., Heryansyah A. Occurrence of natural radioactivity and corresponding health risk in groundwater with an elevated radiation background in Juban District, Yemen. *Environmental Earth Sciences*. 2016. Vol. 75. 1360. DOI: 10.1007/s12665-016-6142-z.
5. Aloni A., Brenner A. Use of Cotton as a Carbon Source for Denitrification in Biofilters for Groundwater Remediation. *Water*. 2017. Vol. 9. pp. 714–725. DOI: 10.3390/w9090714.
6. Benrabah S., Attoui B., Hannouche M. Characterization of groundwater quality destined for drinking water supply of Khenchela City (eastern Algeria). *Journal of Water and Land Development*. 2016. Vol. 30. pp. 13–20. DOI: 10.1515/JWLD-2016-0016.
7. Castiglioni S., Davoli E., Riva F., Palmiotto M., Camporini P., Manenti A., Zuccato E. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy. *Water Research*. 2018. Vol. 131. pp. 287–298. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.047.
8. Desbarats A.J., Percival J.B., Venance K.E. Trace element mobility in mine waters from granitic pegmatite U–Th–REE deposits, Bancroft area, Ontario. *Applied Geochemistry*. 2016. Vol. 67. pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.02.010.
9. Dzaugis M.E., Spivack A.J., Dunlea A.G., Murray R.W., D'Hondt S. Radiolytic Hydrogen Production in the Subseafloor Basaltic Aquifer. *Frontiers in Microbiology*. 2016. Vol. 7. 76. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00076.
10. Foto E., Ouoko Delombaut F.C.S., Djebebe Ndjiguim C.L., Songuele Bomagayen J., Poumaye N., Mabingui J. Sanitary mapping of well waters in the commune of Bimbo in the Central African Republic (CAR). *Field Actions Science Reports*. 2016. Vol. 9. pp. 1–21.
11. Guo J., Cao W., Li X., Ren Y., Lu C., Wang Y., Song L., Liu Y., Sun X. Comparative study on genesis mechanism of high arsenic groundwater in typical alluvial plain of the Upper and lower Yellow River, China. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 957. 177694. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177694.
12. Guo H., Zhao W., Li H., Xiu W., Shen J. High radionuclides in groundwater of an inland basin from Northwest China: Origin and fate. *ACS Earth and Space Chemistry*. 2018. Vol. 25. 33. – DOI: 10.1021/acsearthspacechem.8b00108.
13. He L., Gao B., Luo X., Jiao J., Qin H., Zhang C., Dong Y. Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water near a Uranium Tailing Pond in Jiangxi Province, South China. *Sustainability*. 2018. Vol. 10. 1113. DOI: 10.3390/su10041113.
14. Ivanova K., Stojanovska Z., Badulin V., Kunovska B., Yovcheva M. Radiological impact of surface water and sediment near uranium mining sites. *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35. pp. 819–834. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/819.
15. Kochhann D., Behr E.R., Chaves A., Mesko M.F., Dressler V.L., Flores E.M.M., Baldisserotto B. Environmental quality evaluation of the Vacacai River, Rio Grande do Sul, Brazil. *Environmental Earth Sciences*. 2013. Vol. 70. pp. 1727–1733. DOI: 10.1007/s12665-013-2260-z.
16. Kumar P., Khan P.K., Kumar A. Health risk assessment upon exposure to groundwater arsenic among individuals of different sex and age groups of Vaishali district, Bihar (India). *Toxicology Reports*. 2025. Vol. 14. 102024. DOI: 10.1016/j.toxrep.2025.102024.
17. Li Y., Xiao L., Zeng X.C. Hydrogen gas oxidation-driven reductive mobilization of arsenic in solid phase contributing to arsenite contamination in groundwater: Insights from metagenomic and microcosm analyses. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 488. 137444. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137444.
18. Liu X., Yue F.J., Wong W.W., Lin S.C., Guo T.L., Li S.L. Arsenic toxicity exacerbates China's groundwater and health crisis. *Environment International*. 2025. Vol. 198. 109435. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109435.
19. Lytle D.A., Sorg T., Wang L., Chen A. The accumulation of radioactive contaminants in drinking water distribution systems. *Water Research*. 2014. Vol. 50. pp. 396–407. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.050.
20. Madi K., Nyabeze P., Gwavava O., Sekiba M., Zhao B. Uranium, thorium and potassium occurrences in the vicinity of hot springs in the northern neotectonic belt in the Eastern Cape Province, South Africa. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 301. pp. 351–363. DOI: 10.1007/s10967-014-3183-1.

21. Mahmoudi N., Nakhaei M., Porhemmat J. Assessment of hydrogeochemistry and contamination of Varamin deep aquifer, Tehran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 76. 370. DOI: 10.1007/s12665-017-6698-2.
22. Mantashloo A., Shokoohi R., Torkshavand Z., Chavoshi E., Khazaei S., Khazaei M., Shabanloo A. Monte Carlo simulation for human health risk assessment of groundwater contaminated with arsenic at an Iranian semi-arid region. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 2025. Vol. 23. 101069. DOI: 10.1016/j.enmm.2025.101069.
23. Medhi S., Choudhury R. Spatial and temporal distribution of arsenic in groundwater of the Brahmaputra River floodplains in Assam, India. *Groundwater for Sustainable Development*. 2025. Vol. 28. 101400. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101400.
24. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*. 2021. Vol. 15. pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.
25. Raftery A.E., Zimmer A., Frierson D.M.V., Startz R., Liu P. Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7. pp. 637–641. DOI: 10.1038/nclimate3352.
26. Seddique A.A., Kon Y., Anma R., Masuda H., Bhattacharya P., Yokoo Y., Basak S.B., Shinoda K. Sources of U and Th in groundwater of the paleobeach aquifer at Cox's Bazar, Southeast Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*. 2020. Vol. 10. 100332. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100332.
27. Singh A., Srivastav S.K., Kumar S., Chakrapani G.J. A modified – DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India. *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74. pp. 5475–5490. DOI: 10.1007/s12665-015-4558-5.
28. Sultan M.W., Qureshi F., Ahmed S., Kamyab H., Rajendran S., Ibrahim H., Yusuf M. A comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: Sources, detection, mitigation strategies and cost analysis. *Environmental Research*. 2025. Vol. 265. 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.
29. Thakur B.K. Welfare estimation of groundwater arsenic contamination in India: Insights for water policy. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 497. 145107. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145107.
30. Yang C., Xu Y., Yu T., Li Y., Zeng X.C. Microbial reductive mobilization of As(V) in solid phase coupled with the oxidation of sulfur compounds: An overlooked biogeochemical reaction affecting the formation of arsenic-contaminated groundwater. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 492. 138234. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138234.
31. Yepu L., Guobing W., Tao J., Ying Y., Hongyan G. Enhanced sustainable remediation of co-contaminated soil and groundwater with lead and arsenic utilizing the willow-vetiver-permeable reactive barrier system. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 977. 179343. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179343.
32. Yi L., Gao B., Liu H., Zhang Y., Du C., Li Y. Characteristics and Assessment of Toxic Metal Contamination in Surface Water and Sediments Near a Uranium Mining Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. 548. DOI: 10.3390/ijerph17020548.
33. Zhang Y., Li H., Xiao K., Wang Xuejing, Lu X., Zhang M., An A., Qu W., Wan L., Zheng C., Wang Xusheng, Jiang X. Improving Estimation of Submarine Groundwater Discharge Using Radium and Radon Tracers: Application in Jiaozhou Bay, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. pp. 8263–8277. DOI: 10.1002/2017JC013237.
34. Zhao C., Zhang P., Li X., Ning Y., Tan L., Edwards R.L., Yao X., Cheng H. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Uranium Isotopes in Saline Lake Waters in the Northeast of Qaidam Basin. *Minerals*. 2020. Vol. 10. 74. DOI: 10.3390/min10010074.

УДК 551.242.1

DOI: 10.46698/VNC.2026.41.47.001

Оригинальная статья

Пространственно-временной анализ современных движений земной коры Западного Кавказа на основе ГНСС-измерений и оценка конфигурации региональной геодинамической сети

П.А. Докукин[✉], А.И. Маневич[✉], Р.В. Шевчук[✉], А.Н. Байрамов[✉]

Российский университет дружбы народов, Россия, 117198, г. Москва,
ул. Миклухо-Маклая, 6, e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Статья поступила: 21.04.2026, доработана: 18.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Западный Кавказ характеризуется пространственно неоднородными современными движениями земной коры и активной разломно-блоковой структурой. Опубликованные оценки скоростей ГНСС-пунктов получены на разных временных интервалах и представлены как в табличной, так и в картографической форме, что затрудняет их совместный деформационный анализ. Особое практическое значение задача имеет для Туапсе–Сочинского сегмента, где геодинамически активные структуры пересекают плотно освоенную прибрежно-горную территорию. **Цель работы** – обобщить опубликованные данные о горизонтальных движениях Западного Кавказа, оценить параметры современного деформационного поля и проверить пригодность конфигурации объединённой сети для конечно-элементного анализа. **Методы.** Сформирован массив из 54 ГНСС-пунктов по трём опубликованным наборам. Отсутствующие численные значения восстановлены по геопривязанным в QGIS картографическим схемам посредством оцифровки начала и конца векторов с учётом масштаба источника. По компонентам скорости рассчитаны главные деформации, дилатация и полный сдвиг. Сеть построена методом триангуляции Делоне; геометрия конечных элементов оценена отношением радиусов описанной и вписанной окружностей R/r . **Результаты.** Региональный фон соответствует согласованному движению на северо-северо-восток, однако внутри региона выделяются локальные зоны сжатия, растяжения и сдвиговой локализации. В Туапсе–Сочинском сегменте деформационное поле асимметрично и мозаично; контрасты тяготеют к разломным границам и узлам их пересечения. Большинство треугольников имеет оптимальную или приемлемую форму, а неблагоприятные элементы сосредоточены преимущественно на периферии сети. Впервые для объединённой выборки одновременно сопоставлены инварианты деформации и количественный критерий качества геометрии каждого треугольного элемента. **Выводы.** Объединение разнородных опубликованных скоростей позволяет выявить устойчивые региональные закономерности, но амплитуды локальных аномалий следует интерпретировать с учётом различий систем отсчёта, продолжительности наблюдений и погрешности графической оцифровки. Предложенная классификация R/r задаёт явные условия отбора элементов и обосновывает развитие сети непрерывных наблюдений в районе Большого Сочи.

Ключевые слова: современные движения земной коры, ГНСС, деформационный анализ, дилатация, полный сдвиг, триангуляция Делоне, Западный Кавказ, геодинамический мониторинг.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FSSF-2026-0077).

Для цитирования: Докукин П.А., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Байрамов А.Н. Пространственно-временной анализ современных движений земной коры Западного Кавказа на основе ГНСС-измерений и оценка конфигурации региональной геодинамической сети. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): ...–.... DOI: 10.46698/VNC.2026.41.47.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.41.47.001

Original paper

Present-day crustal movements in the Western Caucasus region from GNSS data and analysis of the regional geodynamic network configuration

P.A. Dokukin^{ORCID}, A.I. Manevich^{ORCID}, R.V. Shevchuk^{ORCID}, A.N. Bayramov^{ORCID}RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation,
e-mail: ai.manevich@yandex.ru*Received: 21.04.2026, revised: 18.09.2026, accepted:2026*

Abstract: Relevance. The Western Caucasus is characterized by spatially heterogeneous present-day crustal motions and an active fault-block structure. Published GNSS site velocities cover different time intervals and are reported in both tabular and map form, which complicates their joint deformation analysis. The problem is especially important for the Tuapse–Sochi segment, where active structures cross a densely developed coastal and mountain area. **Aim.** This study compiles published horizontal velocity estimates for the Western Caucasus, evaluates the present-day strain field, and tests whether the geometry of the combined network is suitable for finite-element analysis. **Methods.** A data set of 54 GNSS sites was assembled from three published sources. Where numerical values were unavailable, maps were georeferenced in QGIS and the start and end of each velocity vector were digitized; vector magnitude, azimuth, and east and north components were then derived using the source scale. Principal strain rates, dilatation, and total shear strain rate were calculated. The network was triangulated using the Delaunay algorithm, and element geometry was assessed by the circumradius-to-inradius ratio R/r . **Results.** The regional field confirms coherent north-northeastward motion, while local domains of contraction, extension, and shear localization occur within the study area. The Tuapse–Sochi strain field is asymmetric and mosaic-like, with major contrasts spatially associated with fault boundaries and fault-intersection zones. Most triangles have optimal or acceptable geometry, whereas unfavorable elements occur mainly along the network margins. **Conclusions.** Combining heterogeneous published velocities reveals robust regional patterns, but the amplitudes of local anomalies must be interpreted with regard to reference-frame differences, observation-span variability, and graphical digitization uncertainty. The proposed R/r classes provide explicit element-selection rules and support further development of continuous GNSS monitoring in the Greater Sochi area.

Keywords: present-day crustal movements, GNSS, strain analysis, dilatation, total shear strain, Delaunay triangulation, Western Caucasus, geodynamic monitoring.

Acknowledgements: *This work was funded by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSF-2026-0077).*

For citation: Dokukin P.A., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Bayramov A.N. Present-day crustal movements in the Western Caucasus region from GNSS data and analysis of the regional geodynamic network configuration. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.41.47.001

Введение

Современные движения земной коры Западного Кавказа важны для изучения активной тектоники и для мониторинга плотно освоенной прибрежно-горной территории, включая участки размещения ответственных сооружений [Бабешко и др., 2012; Рогожин и др., 2014]. Современные ГНСС-исследования подтверждают распределённый характер деформаций Кавказского сегмента Альпийско-Гималайского пояса и их связь с блоковыми движениями и активными разломами [Milyukov et al., 2022; Steblov et al., 2023; Kaftan et al., 2024; Castro-Perdomo et al., 2025; Kazimov et al., 2026]. Наблюдаемая

космической геодезией дальнеполюная реакция коры на крупные события в Восточной Анатолии дополнительно показывает региональную значимость согласованного анализа геодезических данных [Ergintav et al., 2024].

Для Западного Кавказа установлено согласованное северо-северо-восточное движение в глобальной системе отсчёта и выделены внутрипоясные зоны сжатия, растяжения и сдвига [Milyukov et al., 2022; Steblov et al., 2023; Гурбанов и др., 2023]. В Туапсе–Сочинском сегменте локальные наблюдения указывают на активность Мзымтинского разлома и поперечных нарушений, однако опубликованные скорости относятся к разным периодам, системам отсчёта и форматам представления [Бабешко и др., 2019; Шестопалов и др., 2021]. Единого массива, пригодного одновременно для деформационного анализа и проверки геометрии сети, ранее не формировалось.

Цель работы – обобщить опубликованные сведения о горизонтальных движениях земной коры Западного Кавказа, рассчитать по унифицированному набору скоростей параметры деформационного поля и оценить конфигурацию объединённой региональной сети. Для этого сопоставлены табличные и оцифрованные данные, рассчитаны инвариантные характеристики тензора деформации и выполнена триангуляция Делоне с количественной оценкой формы конечных элементов.

Геологические и геодинамические условия района

Район исследования охватывает западную часть горного сооружения Большого Кавказа, прилегающие структуры Западного Предкавказья и северо-восточного побережья Чёрного моря. В направлении от моря к северо-востоку прослеживаются Туапсинский прогиб, зоны Южного и Северного склонов, Осевая зона, Западно-Кубанский передовой прогиб и Скифская плита. Их строение и молодые деформации определяют пространственную неоднородность современного рельефа и поля движений [Рогожин и др., 2014; Макеев и др., 2024; Kaftan et al., 2024] (рис. 1).

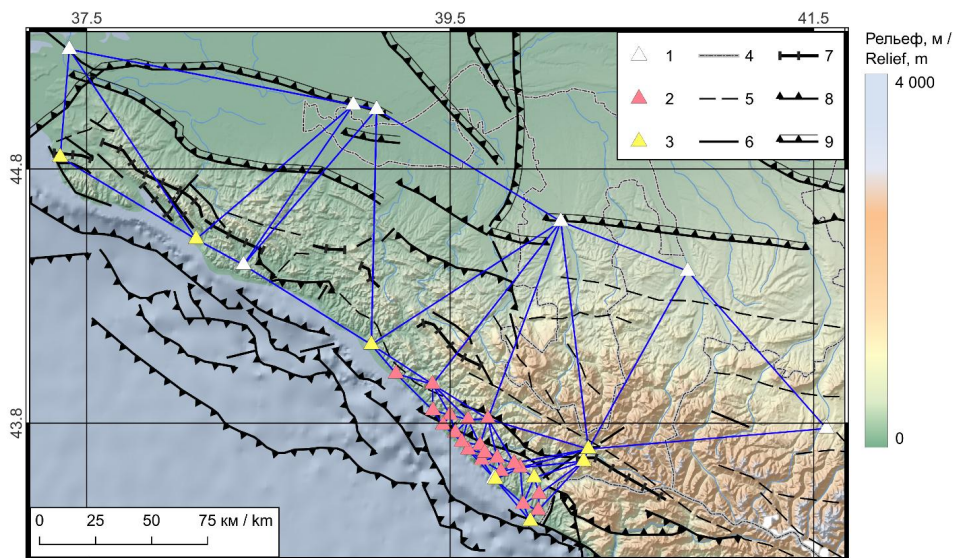


Рис. 1. Тектоническая схема района и пункты ГНСС-наблюдений, использованные в анализе. ГНСС-пункты: 1 – по данным [Milyukov et al., 2022]; 2 – по данным [Шестопалов и др., 2021]; 3 – по данным [Серебрякова, Басманов, 2014]; 4 – административные границы.

Разломы: 1 – сбросо-сдвиги и сбросы; 2 – преимущественно сдвиги; 3 – взбросы и надвиги; 4 – разломы по структурно-геоморфологическим данным; 5 – флексурно-разрывные зоны /

Fig. 1. Tectonic scheme of the study area and GNSS observation sites used in the analysis.

GNSS sites: 1 – from [Milyukov et al., 2022]; 2 – from [Shestopalov et al., 2021]; 3 – from [Serebryakova, Basmanov, 2014]; 4 – administrative boundaries. Faults:

1 – normal-slip strike-slip and normal faults; 2 – predominantly strike-slip faults;

3 – reverse faults and thrusts; 4 – faults identified from structural and geomorphological data;

5 – flexure-fault zones

Продольная зональность осложнена поперечной разломно-блоковой сегментацией. Для интерпретации деформаций особенно важны Пшехско-Адлерская, Туапсинская и Анапская ступени, а в районе Большого Сочи – Мзымтинский, Пластунский, Монастырский, Краснополянский и Бекишейский разломы. Сочи–Краснополянский узел относится к участкам повышенной структурной неоднородности и сейсмотектонической активности [Горбатиков и др., 2015; Стогний и др., 2022; Свалова, Заалишвили, 2024; Шестопалов и др., 2021]. На более широком Кавказском профиле современные деформации согласуются с активным сокращением и блоковым перераспределением движений [Kadirov et al., 2024; Yuseubov et al., 2025].

Методы исследования

Исходный массив составили опубликованные горизонтальные скорости ГНСС-пунктов Западного Кавказа и сопредельных территорий [Серебрякова, Басманов, 2014; Шестопалов и др., 2021; Milyukov et al., 2022]. В анализ включены 54 пункта: 21, 8 и 25 пунктов соответственно. Использовались решения постоянных станций и кампаний наблюдений, если источник содержал компоненты скорости, модуль и азимут либо графическое представление, допускающее восстановление вектора.

Первичные ГНСС-наблюдения повторно не обрабатывались. Картографические схемы геопривязывались в среде QGIS. Для каждого вектора оцифровывались его начало и конец; с учётом приведённого в источнике масштаба определялись модуль, азимут и компоненты скорости V_E и V_N . Координаты и атрибуты проверялись сопоставлением с исходной схемой. Графическая оцифровка вносит дополнительную неопределённость, зависящую от масштаба, разрешения и толщины условных знаков, поэтому локальные амплитуды интерпретировались осторожно.

Деформационный анализ выполнялся по объединённому набору горизонтальных скоростей в конечно-элементном приближении [Есиков, 1991; Кафтан и др., 2019; Маневич и др., 2023]. Оси n и e направлены соответственно на север и восток. Для каждого элемента определялись компоненты тензора горизонтальной деформации и рассчитывались главные деформации, дилатация и полный сдвиг:

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix}, \# \quad (1)$$

где элементы тензора равны $\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$, $\varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$ и $\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right)$, соответственно, а $\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en}$ – относительный сдвиг.

Рассчитывались следующие инвариантные деформационные характеристики:

– Главные деформации ε_1 и ε_2 :

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_n + \varepsilon_e \pm \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2} \right], \# \quad (2)$$

– Дилатация:

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \# \quad (3)$$

– Полный сдвиг:

$$\gamma = \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2}, \# \quad (4)$$

Набор [Серебрякова, Басманов, 2014] основан на четырёх циклах повторных измерений 2009–2012 гг. и опубликован в локальной системе ΔX – ΔY . Данные [Шестопалов и др., 2021] получены по рядам длительностью 4,2–9,1 года и приведены в ITRF2014. Региональный набор [Milyukov et al., 2022] охватывает 2016–2021 гг.; из него использованы 25 решений в ITRF2014. Методическая основа локального мониторинга Кавказа

и требования к геодезическим сетям рассмотрены также в работах [Ященко, Ямбаев, 2007; Савиных и др., 2010].

Различия длительности рядов, плотности сети, систем отсчёта и способа публикации данных ограничивают прямое сравнение абсолютных скоростей. Поэтому совместная интерпретация сосредоточена на пространственных градиентах и инвариантных характеристиках деформации, не изменяющихся при добавлении единого жёсткого переноса. Подобные задачи объединения разнородных полей скоростей требуют контроля преобразований и неопределённостей [Rastbood et al., 2024; Castro-Perdomo et al., 2025]. Полученные локальные экстремумы следует рассматривать как модельные оценки, а не как независимые измерения напряжений.

Результаты исследования

В ITRF2014 опубликованное поле Западного Кавказа характеризуется преимущественным движением на северо-северо-восток со скоростями около 27–28 мм/год [Milyukov et al., 2022]. Относительно стабильной Евразии проявляются внутривосьные различия: в пределах Большого Кавказа и Западно-Кубанского прогиба преобладает поперечное сжатие, в Предкавказье заметнее сдвиговая компонента, а восточнее Туапсинской зоны разломов отмечено локальное продольное растяжение [Steblov et al., 2023; Гурбанов и др., 2023].

В Сочи–Краснополянском районе наблюдения на пунктах Сочи, Адлер, Лесное, Эсто-Садок и Айбга согласуются с активностью Мзымтинского разлома и левосдвиговой составляющей движений; на западном фланге Туапсинско-Сочинской зоны выявлена роль поперечных нарушений [Бабешко и др., 2019; Шестопапов и др., 2021]. Эти результаты задают структурный контекст для моделей, рассчитанных по объединённому массиву.

Поле скорости дилатации имеет мозаично-блоковый характер и в целом вытянуто в северо-западном направлении (рис. 2). Положительные значения, соответствующие площадному растяжению, образуют локальные максимумы в северо-западном, центрально-западном и центрально-южном секторах. Отрицательные значения выделяются в западно-центральной части и на юго-восточном фланге. Узкие переходы между областями разного знака тяготеют к разломным границам и узлам пересечения нарушений.

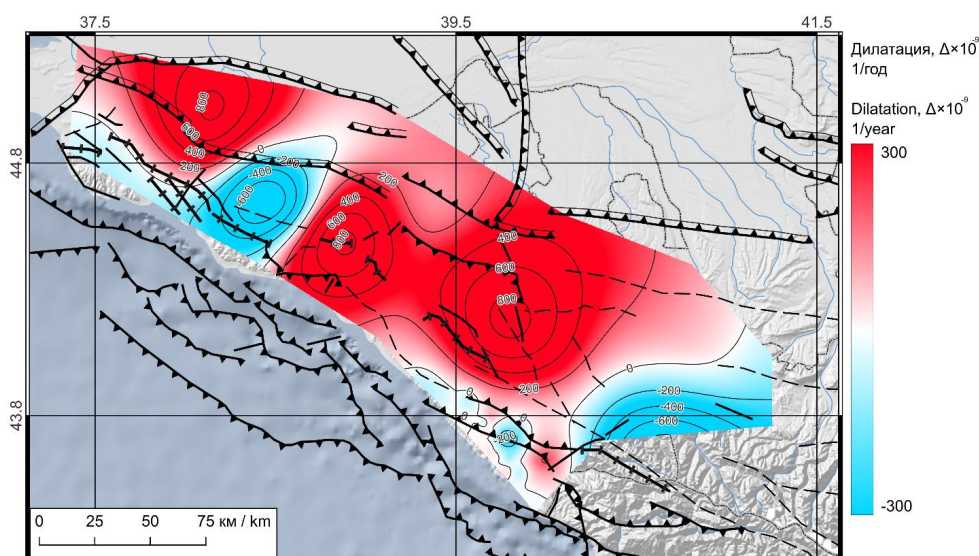


Рис. 2. Распределение скорости дилатации земной поверхности, Δ , 10^{-9} год^{-1} /

Fig. 2. Distribution of surface dilatation rate, Δ , 10^{-9} yr^{-1}

Скорость полного сдвига γ сильнее локализована в линейных и узловых зонах (рис. 3). Наиболее высокие значения наблюдаются на северо-западе и в централь-

ной части поля; повышенный уровень сохраняется также на юго-восточном фланге. Минимумы приурочены к северо-центральному участку и узкой прибрежной полосе. Частичное совпадение максимумов полного сдвига с границами смены знака дилатации указывает на разделение соседних кинематических режимов, однако количественная оценка локальных амплитуд ограничена неоднородностью исходных данных.

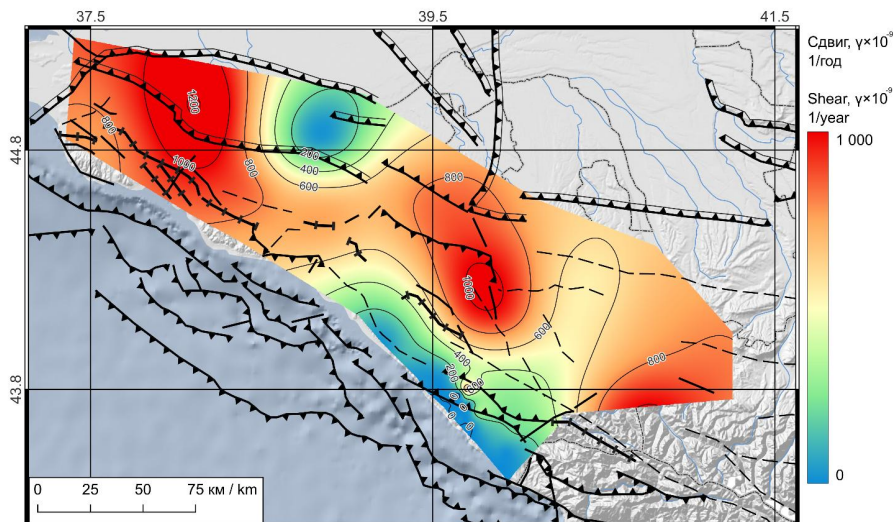


Рис. 3. Распределение скорости полного сдвига земной поверхности, γ , 10^{-9} год^{-1} /
Fig. 3. Distribution of total shear strain rate, γ , 10^{-9} yr^{-1}

Ориентации главных деформаций подтверждают анизотропный и сегментированный характер поля (рис. 4). В северной и западной частях оси относительно упорядочены, тогда как в сочинском прибрежно-горном узле их азимут быстро меняется на малых расстояниях. Такое сочетание согласуется с наложением продольного сжатия, локального растяжения и сдвиговой переработки по поперечным и косесекущим нарушениям.

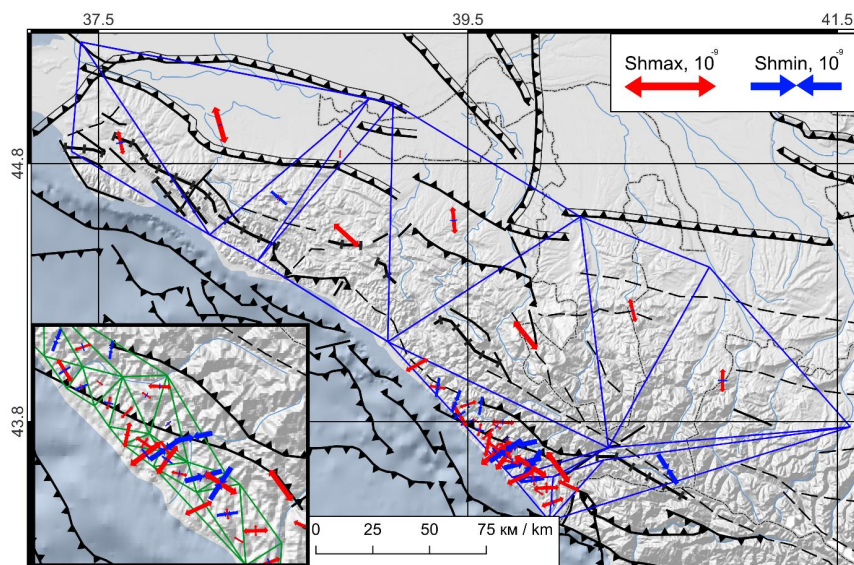


Рис. 4. Распределение скоростей главных деформаций и ориентации их осей, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, 10^{-9} год^{-1} /
Fig. 4. Distribution of principal strain rates and orientations of their axes, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, 10^{-9} yr^{-1}

Совместный анализ моделей показывает, что деформационное поле Туапсе–Сочинского сегмента асимметрично и пространственно неоднородно. Контрасты приурочены к линейным нарушениям и их пересечениям, а наиболее сложная смена режимов наблюдается в сочинском узле. Эта картина согласуется с региональным разделением

деформаций, установленным по независимым ГНСС-решениям Кавказа [Kadirov et al., 2024; Kazimov et al., 2026]. Вместе с тем карты описывают кинематику поверхности; выводы о поврежденности или неупругом поведении пород требуют независимых геологических и геофизических данных.

Анализ конфигурации региональной геодинамической сети

Локальная сеть мониторинга развивает ранее предложенный подход к наблюдениям в Сочи–Краснополянском районе [Ященко, Ямбаев, 2007; Савиных и др., 2010]. Опубликованные решения охватывают ключевые узлы, но плотность пунктов уменьшается на западном, северо-западном и периферийных участках, поэтому часть межблоковых границ разрешена хуже [Шестопалов и др., 2021].

Тензор деформации можно оценивать по конечным элементам, вершинами которых служат пункты наблюдений, либо по интерполированному полю скоростей. Интерполяционные методы используют расстояния и веса [Shen et al., 1996; Teza et al., 2008; Rastbood et al., 2024], но получают модельные значения в узлах регулярной сетки. Треугольный подход сохраняет прямую связь с измеренными скоростями, однако его устойчивость существенно зависит от геометрии элемента.

Отклонение треугольника от равносторонней формы увеличивает погрешность компонентов деформации [Докукин и др., 2010; Маркович, 2019]. Для количественной оценки использовано отношение радиуса описанной окружности R к радиусу вписанной окружности r [Wu et al., 2003]. Теоретический минимум R/r равен 2 и соответствует равностороннему треугольнику.

В настоящей работе приняты следующие классы: $2 \leq R/r < 3$ – оптимальная форма; $3 \leq R/r < 5$ – приемлемая; $5 \leq R/r \leq 10$ – условно приемлемая, с пониженной устойчивостью решения; $R/r > 10$ – неблагоприятная форма. Последний класс исключается из количественной интерпретации деформаций либо используется только как качественный индикатор при явном указании ограничения.

Объединённая сеть построена методом триангуляции Делоне [Делоне, 1934] после преобразования геодезических координат в проекцию UTM. Алгоритм максимизирует минимальные углы и тем самым ограничивает появление вытянутых элементов. Для каждого треугольника рассчитано R/r ; результат представлен на рис. 5.

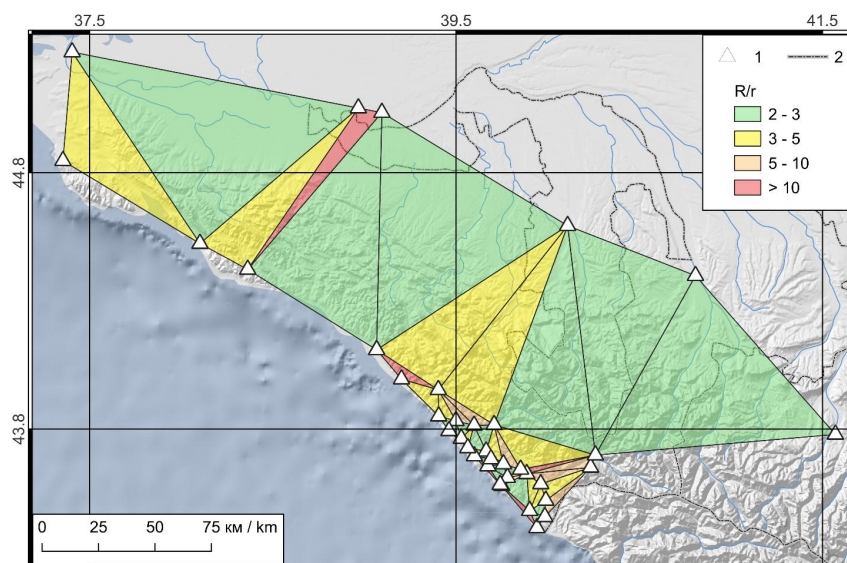


Рис. 5. Триангуляция Делоне объединённой сети Западного Кавказа и классификация конечных элементов по критерию R/r : 2–3 – оптимальные; 3–5 – приемлемые; 5–10 – условно приемлемые; >10 – неблагоприятные /

Fig. 5. Delaunay triangulation of the combined Western Caucasus network and finite-element classes based on R/r : 2–3, optimal; 3–5, acceptable; 5–10, conditionally acceptable; >10, unfavorable

Большинство внутренних элементов относится к оптимальному и приемлемому классам; условно приемлемые и неблагоприятные треугольники сосредоточены преимущественно у границ сети и в разреженных участках (рис. 5). Их автоматическое удаление без проверки может сократить область анализа и скрыть реальные периферийные градиенты, поэтому элементы с $R/r > 10$ следует исключать именно из количественной деформационной интерпретации, сохраняя сведения об исходных скоростях пунктов.

Создание постоянно действующей ГНСС-станции на базе Сочинского института РУДН само по себе лишь умеренно изменит геометрию региональной триангуляции, но обеспечит устойчивую опорную точку для приведения локальных кампаний к единой системе отсчёта и повысит временную непрерывность мониторинга. Наибольший геометрический эффект даст последующее сгущение сети в разреженных западных и северо-западных секторах.

Выводы

1. Объединённый массив из 54 опубликованных и оцифрованных ГНСС-решений подтверждает северо-северо-восточный региональный фон движений и выявляет наложенные зоны сжатия, растяжения и сдвига. В Туапсе–Сочинском сегменте поле асимметрично и мозаично, а основные контрасты тяготеют к разломным границам.

2. Явная классификация R/r показывает, что основная часть внутренних треугольников имеет оптимальную или приемлемую форму. Элементы с $R/r > 10$ сосредоточены главным образом на периферии и не должны использоваться для количественной интерпретации деформаций без дополнительного обоснования.

3. Различия систем отсчёта, длительности наблюдений и погрешность графической оцифровки ограничивают точность локальных экстремумов. Развитие непрерывных наблюдений в Большом Сочи и сгущение сети в разреженных секторах необходимы для проверки устойчивости выявленных закономерностей.

Литература

1. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Калинин В.В., Шереметьев В.М. К проблеме оценки состояния сейсмичности в зонах повышенной геодинамики // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2012. – № 2. – С. 7–10.
2. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Глазырин Е.А., Шереметьев В.М. Исследование сейсмической активности района Большого Сочи методами спутниковой геодинамики // Наука Юга России. – 2019. – Т. 15. № 1. – С. 3–11. DOI: 10.7868/S25000640190101.
3. 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., Дзедобоев 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.
4. Гурбанов А.Г., Милуков В.К., Газеев В.М., Лексин А.Б., Докучаев А.Я., Гурбанова О.А. Оценка векторов скорости современных горизонтальных и вертикальных смещений литосферных блоков на территории Большого Кавказа и их геодинамическая интерпретация (по данным ГНСС) // Вестник Владикавказского научного центра. – 2023. – Т. 23. № 1. – С. 49–61. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.26.001.
5. Делоне Б.Н. О пустой сфере // Известия АН СССР. ОМОН. – 1934. – № 4. – С. 793–800.
6. Докукин П.А., Кафтан В.И., Красноперов Р.И. Влияние формы треугольников в геодезической сети на результаты определения деформаций земной поверхности // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 5. – С. 6–11.
7. Есиков Н.П. Современные движения земной поверхности с позиции теории деформации. – Новосибирск: Наука, 1991. – 226 с.
8. Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зон-

дирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. № 1. – С. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94.

9. Макеев В.М., Ревазов М.О., Пикулик Е.А., Фикри Е.А. Структуры альпийского орогенеза южного склона западного сегмента Большого Кавказа в связи с обеспечением безопасности площадок инженерных сооружений // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 39–53. DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005.

10. Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Кафтан В.И., Урманов Д.И. Шакиров А.И. Определение и визуализация параметров движений и деформаций земной поверхности по данным ГНСС-наблюдений в среде Python 3 и QGIS 3 // Геодезия и картография. – 2023. – № 12. – С. 17–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1002-12-17-26.

11. Маркович К.И. Влияние конфигурации конечных элементов на точность определения компонентов деформации // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. № 3. – С. 37–51. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-37-51.

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

13. Савиных В.П., Демьянов Г.В., Ямбаев Х.К. Проект геодинамического мониторинга территории Сочи-Краснополянского района Олимпиады 2014 // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 1. – С. 44–50.

14. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006.

15. Серебрякова Л.И., Басманов А.В. Предварительные результаты обработки и анализа повторных геодезических измерений, выполненных на Северо-Кавказском геодинамическом полигоне Росреестра // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 44–54.

16. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.

17. Шестопалов В.Л., Сенин Б.В., Глазырин Е.А. Развитие GPS-технологий в районе Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны с учетом разломно-блоковой структуры // Наука Юга России. – 2021. – Т. 17. № 4. – С. 25–33. DOI: 10.7868/S25000640210403.

18. Ященко В.Р., Ямбаев Х.К. Геодезический мониторинг движений земной коры (по материалам Кавказского региона). – М.: МИИГАиК, 2007. – 208 с.

19. Castro-Perdomo N., Jonsson S., Klinger Y., Masson F., Becker T.W., Johnson K. Strain Rates Along the Alpine-Himalayan Belt From a Comprehensive GNSS Velocity Field // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2025. – Vol. 130. – Art. No. e2025JB031738. DOI: 10.1029/2025JB031738.

20. Ergintav S., Vernant P., Tan O., Karabulut H., Ozarpci S. et al. Unexpected far-field deformation of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes revealed by space geodesy // Science. – 2024. – Vol. 386. No. 6719. – pp. 328–335. DOI: 10.1126/science.ado4220.

21. Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R., Mammadov S., Kazimov I., Floyd M., Reilinger R., King R. Results from 25 years (1998–2022) of crustal deformation monitoring in Azerbaijan and adjacent territory using GPS // ANAS Transactions, Earth Sciences. – 2024. – No. 1. – pp. 28–43. DOI: 10.33677/ggianas20240100107.

22. Kaftan V.I., Gvishiani A.D., Manevich A.I., Dzeboev B.A., Tatarinov V. et al. An Analytical Review of the Recent Crustal Uplifts, Tectonics, and Seismicity of the Caucasus Region // Geosciences. – 2024. – Vol. 14. – Art. No. 70. DOI: 10.3390/geosciences14030070.

23. Kazimov I., Yetirmishli G., Aktug B., Tiryakioglu I., Gezgin C. et al. Active tectonics, crustal strain fields and block behavior around the Caucasus transition zone: constraints from combined GNSS velocities // The European Physical Journal Plus. – 2026. – Vol. 141. – Art. No. 537. DOI: 10.1140/epjp/s13360-026-07748-9.

24. Milyukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Gorbatiykov A.V., Steblov G. M. et al. Contemporary Tectonic Movements of the Western Caucasus and the Ciscaucasia Based on Satellite-Geodetic Observations // Geotectonics. – 2022. – Vol. 56. – pp. 41–54. DOI: 10.1134/S0016852122010058.

25. Rastbood A., Salmanian M., Hossainali M.M. Present-day crustal deformation based on an interpolated GPS velocity field in the collision zone of the Arabia-Eurasia tectonic plates // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2024. – Vol. 68. – pp. 191–215. DOI: 10.1007/s11200-023-0740-5.

26. Steblov G.M., Agibalov A.O., Beloborodov D.E., Zaitsev V.A., Perederin V.P. et al. Analysis of Contemporary Deformations of the North-Western Caucasus and Ciscaucasia Based on GNSS Data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2023. – Vol. 59. – pp. 555–564. DOI: 10.1134/S1069351323040110.
27. Yusubov N.P., Guliyev I.S., Kerimov V.Y. Geological Structure of the Middle Kura and Shamakhi–Gobustan Troughs of the South Caspian Depression (Azerbaijan): Results of Interpretation of Seismological Data and GPS Monitoring // *Geotectonics*. – 2025. – Vol. 59. – pp. 328–338. DOI: 10.1134/S0016852125700256.
28. Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1996. – Vol. 101. – pp. 27957–27980. DOI: 10.1029/96JB02544.
29. Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments // *Computers and Geosciences*. – 2008. – Vol. 34. No. 9. – pp. 1142–1153. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.07.006.
30. Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated // *Journal of Geodesy and Geodynamics*. – 2003. – Vol. 23. No. 3. – pp. 26–30. (In Chinese).

References

1. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Kalinchuk V.V., Sheremetev V.M. On the problem of assessing seismicity in zones of increased geodynamic activity. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2012. No. 2. pp. 7–10. (In Russ.)
2. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Glazyrin E.A., Sheremetev V.M. Investigation of seismic activity in the Greater Sochi area by satellite geodynamics methods. *Science in the South Russia*. 2019. Vol. 15. No. 1. pp. 3–11. DOI: 10.7868/S25000640190101. (In Russ.)
3. Gorbaticov 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 Solid Earth*. 2015. No. 1. pp. 28–39. (In Russ.)
4. Gurbanov A.G., Milyukov V.K., Gazeev V.M., Leksin A.B., Dokuchaev A.Ya., Gurbanova O.A. Estimation of velocity vectors of modern horizontal and vertical displacements of lithospheric blocks in the Greater Caucasus and their geodynamic interpretation from GNSS data. *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2023. Vol. 23. No. 1. pp. 49–61. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.26.001. (In Russ.)
5. Delaunay B.N. On the empty sphere. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. OMEN*. 1934. No. 4. pp. 793–800. (In Russ.)
6. Dokukin P.A., Kaftan V.I., Krasnoperov R.I. Influence of triangle shape in a geodetic network on the results of determining surface deformations. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2010. No. 5. pp. 6–11. (In Russ.)
7. Esikov N.P. Modern movements of the Earth's surface from the standpoint of deformation theory. *Novosibirsk. Nauka*. 1991. 226 p. (In Russ.)
8. Kaftan V.I., Gvishiani A.D., Morozov V.N., Tatarinov V.N. Methodology and results of determining crustal movements and deformations from GNSS data at a geodynamic test site in a radioactive-waste disposal area. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019. Vol. 16. No. 1. pp. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94. (In Russ.)
9. Makeev V.M., Revazov M.O., Pikulik E.A., Fikri E.A. Structures of Alpine orogenesis on the southern slope of the western segment of the Greater Caucasus in relation to the safety of engineering-facility sites. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 39–53. DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005. (In Russ.)
10. Manevich A.I., Shevchuk R.V., Losev I.V., Kaftan V.I., Urmanov D.I., Shakirov A.I. Determination and visualization of parameters of surface movements and deformations from GNSS observations in Python 3 and QGIS 3. *Geodesy and Cartography*. 2023. No. 12. pp. 17–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1002-12-17-26. (In Russ.)
11. Markovich K.I. Influence of finite-element configuration on the accuracy of determining deformation components. *Vestnik SSUGT*. 2019. Vol. 24. No. 3. pp. 37–51. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-37-51. (In Russ.)

12. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatikov A.V. Endogenous Hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS. 2014. 256 p. (In Russ.)
13. Savinykh V.P., Demyanov G.V., Yambaev Kh.K. Geodynamic monitoring project for the Sochi–Krasnaya Polyana area of the 2014 Olympics. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2010. No. 1. pp. 44–50. (In Russ.)
14. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus–Anatolian region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006. (In Russ.)
15. Serebryakova L.I., Basmanov A.V. Preliminary results of processing and analysis of repeated geodetic measurements at the Rosreestr North Caucasian geodynamic test site. *Geodesy and Cartography*. 2014. No. 4. pp. 44–54. (In Russ.)
16. Stogniy V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: monitoring problems. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003. (In Russ.)
17. Shestopalov V.L., Senin B.V., Glazyrin E.A. Development of GPS technologies in the Tuapse–Sochi seismically active zone with regard to the fault-block structure. *Science in the South Russia*. 2021. Vol. 17. No. 4. pp. 25–33. DOI: 10.7868/S25000640210403. (In Russ.)
18. Yashchenko V.R., Yambaev Kh.K. Geodetic monitoring of crustal movements: evidence from the Caucasus region. Moscow. MIIGAiK. 2007. 208 p. (In Russ.)
19. Castro-Perdomo N., Jonsson S., Klinger Y., Masson F., Becker T.W., Johnson K. Strain Rates Along the Alpine-Himalayan Belt From a Comprehensive GNSS Velocity Field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2025. Vol. 130. Art. No. e2025JB031738. DOI: 10.1029/2025JB031738.
20. Ergintav S., Vernant P., Tan O., Karabulut H., Ozarpaci S. et al. Unexpected far-field deformation of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes revealed by space geodesy. *Science*. 2024. Vol. 386. No. 6719. pp. 328–335. DOI: 10.1126/science.ado4220.
21. Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R., Mammadov S., Kazimov I., Floyd M., Reilinger R., King R. Results from 25 years (1998–2022) of crustal deformation monitoring in Azerbaijan and adjacent territory using GPS. *ANAS Transactions, Earth Sciences*. 2024. No. 1. pp. 28–43. DOI: 10.33677/ggianas20240100107.
22. Kaftan V.I., Gvishiani A.D., Manevich A.I., Dzeboev B.A., Tatarinov V. et al. An Analytical Review of the Recent Crustal Uplifts, Tectonics, and Seismicity of the Caucasus Region. *Geosciences*. 2024. Vol. 14. Art. No. 70. DOI: 10.3390/geosciences14030070.
23. Kazimov I., Yetirmishli G., Aktug B., Tiryakioglu I., Gezgin C. et al. Active tectonics, crustal strain fields and block behavior around the Caucasus transition zone: constraints from combined GNSS velocities. *The European Physical Journal Plus*. 2026. Vol. 141. Art. No. 537. DOI: 10.1140/epjp/s13360-026-07748-9.
24. Milyukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Gorbatikov A.V., Steblov G. M. et al. Contemporary Tectonic Movements of the Western Caucasus and the Ciscaucasia Based on Satellite-Geodetic Observations. *Geotectonics*. 2022. Vol. 56. pp. 41–54. DOI: 10.1134/S0016852122010058.
25. Rastboud A., Salmanian M., Hossainali M.M. Present-day crustal deformation based on an interpolated GPS velocity field in the collision zone of the Arabia-Eurasia tectonic plates. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2024. Vol. 68. pp. 191–215. DOI: 10.1007/s11200-023-0740-5.
26. Steblov G.M., Agibalov A.O., Beloborodov D.E., Zaitsev V.A., Perederin V.P. et al. Analysis of Contemporary Deformations of the North-Western Caucasus and Ciscaucasia Based on GNSS Data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023. Vol. 59. pp. 555–564. DOI: 10.1134/S1069351323040110.
27. Yusubov N.P., Guliyev I.S., Kerimov V.Y. Geological Structure of the Middle Kura and Shamakhi–Gobustan Troughs of the South Caspian Depression (Azerbaijan): Results of Interpretation of Seismological Data and GPS Monitoring. *Geotectonics*. 2025. Vol. 59. pp. 328–338. DOI: 10.1134/S0016852125700256.
28. Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1996. Vol. 101. pp. 27957–27980. DOI: 10.1029/96JB02544.
29. Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers and Geosciences*. 2008. Vol. 34. No. 9. pp. 1142–1153. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.07.006.
30. Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated. *Journal of Geodesy and Geodynamics*. 2003. Vol. 23. No. 3. pp. 26–30. (In Chinese)

УДК 550.8

DOI: 10.46698/VNC.2026.12.37.001

Оригинальная статья

Георадиолокационные исследования дольменов Черноморского побережья Кавказа: первые результаты и методические аспекты

А.А. Аверин¹, А.В. Дмитриев², Д.Е. Едемский¹, В.Б. Заалишвили³,
А.М. Корженков⁴, А.С. Ларьков⁴, А.Н. Овсяченко⁴,
А.В. Попов¹, И.В. Прокопович^{1,5}

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4,
e-mail: deedemsky@gmail.com;

² Свободный исследователь, Россия, г. Новороссийск, e-mail: al.misxako@yandex.ru;

³ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

⁴ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123242,
г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: ovs@ifz.ru;

⁵ МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, 119454,
г. Москва, пр. Вернадского, 78

Статья поступила: 31.03.2026, доработана: 23.07.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность исследования обусловлена необходимостью неразрушающего изучения архитектурного контекста дольменов Западного Кавказа, чья периферийная зона (выравнивающие площадки, крепиды, рвы) остается слабо изученной из-за инвазивности традиционных раскопок. **Цель** – получение первых данных о скрытых в грунте строительных элементах и оценка эффективности георадиолокации (GPR) для их выявления на ключевых памятниках (Джубга, Жане 2, Дугуаб 1). **Методы** включали площадную съемку с антеннами 50 и 150 МГц, обработку радарограмм и спектральный анализ пиковой частоты для дифференциации техногенных и естественных отложений. **Результаты:** на всех объектах идентифицированы строительные горизонты и террасы; для Жане 2 оконтурена зона тектонического нарушения; на Дугуаб 1 выявлена аномалия, интерпретируемая как ров. Установлено, что антенна 150 МГц оптимальна. Применение атрибута пиковой частоты позволило объективно выделить однородные техногенные слои. Результаты подтверждают высокий потенциал GPR для реконструкции облика дольменов и планирования раскопок.

Ключевые слова: дольмены, Северный Кавказ, мегалиты, георадиолокация, георадар, радарограмма.

Благодарности: Георадиолокационные исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083-П, интерпретация результатов георадарных данных выполнена в рамках госзаданий ИЗМИРАН и ИФЗ РАН.

Для цитирования: Аверин А.А., Дмитриев А.В., Едемский Д.Е., Заалишвили В.Б., Корженков А.М., Ларьков А.С., Овсяченко А.Н., Попов А.В., Прокопович И.В. Георадиолокационные исследования дольменов Черноморского побережья Кавказа: первые результаты и методические аспекты. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.12.37.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.12.37.001

Original paper

Ground penetrating radar surveys of dolmens on the Black Sea coast of the Caucasus: initial results and methodological aspects

A.A. Averin¹, A.V. Dmitriev², D.E. Edemsky¹, V.B. Zaalishvili³,
A.M. Korzhenkov⁴, A.S. Larkov⁴, A.N. Ovsyuchenko⁴,
A.V. Popov¹, I.V. Prokopovich^{1,5}

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, 4 Kaluzhskoe highway, Moscow, Troitsk 108840, Russian Federation, e-mail: deedemsky@gmail.com;

² Independent researcher, Novorossiysk, Russian Federation, e-mail: al.misxako@yandex.ru;

³ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru;

⁴ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation, e-mail: ovs@ifz.ru;

⁵ MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave, Moscow 119454, Russian Federation

Received: 31.03.2026, revised: 23.07.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance is driven by the need for non-invasive study of the architectural context of Western Caucasian dolmens, whose peripheral elements (leveling platforms, stepped platforms, ditches) remain poorly understood due to the invasiveness of traditional excavations. **Aim.** To obtain the first data on buried construction elements and to evaluate the effectiveness of ground-penetrating radar (GPR) for their detection at key sites (Dzhubga, Zhane 2, Doguab 1). **Methods** included area surveys with 50 and 150 MHz antennas, radargram processing, and spectral analysis of peak frequency to differentiate man-made layers from natural deposits. **Results:** construction horizons and terraces were identified at all sites; a tectonic disturbance zone was traced at Zhane 2 dolmen; an anomaly interpreted as a ditch was revealed at Doguab 1 dolmen. The 150 MHz antenna proved optimal. The peak frequency attribute enabled objective delineation of homogeneous anthropogenic layers. The results demonstrate the high potential of GPR for reconstructing the dolmens' original appearance and planning targeted archaeological research.

Keywords: dolmens, North Caucasus, megaliths, GPR survey, ground penetrating radar, B-scan.

Acknowledgements: The GPR surveys were carried out with the support of the Russian Science Foundation grant No. 22-12-00083-П. The interpretation of the results of the GPR data was carried out according to the State assignment of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences and Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Averin A.A., Dmitriev A.V., Edemsky D.E., Zaalishvili V.B., Korzhenkov A.M., Larkov A.S., Ovsyuchenko A.N., Popov A.V., Prokopovich I.V. Ground penetrating radar surveys of dolmens on the Black Sea coast of the Caucasus: initial results and methodological aspects. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.12.37.001

Введение

Дольмены Западного Кавказа, представляющие собой выдающиеся памятники мегалитической культуры эпохи бронзы (по последним датировкам втор. пол. V тыс. до н.э. [Дмитриев, 2025]), на протяжении более полутора столетий остаются в фокусе внимания археологов [Марковин, 1978; Гей, 2008; Трифонов, 2001; Дмитриев, 2025]. Памятники мегалитической культуры также наблюдаются и изучаются в других регионах, как нашей страны, так и за рубежом [Марковин, 1997; Nesterkina et al., 2022; Hutton, 2025].

Несмотря на значительный объем накопленных данных, ключевые аспекты, связанные с их архитектурным замыслом, строительной технологией, пространственной организацией и ритуальным функционированием, остаются дискуссионными [Дмитриев, 2025]. Традиционные археологические методы, базирующиеся на раскопках, зачастую носят точечный и инвазивный характер, концентрируясь на центральной камере сооружения. Это приводит к фрагментарности получаемой информации, оставляя «за кадром» контекст памятника. Современная археологическая парадигма рассматривает подобные объекты как сложные элементы структурированного сакрального ландшафта [Резепкин, 1988; Трифонов, 2014; Резепкин, 2012; Дмитриев, 2025]. В этой связи критически важной задачей становится неразрушающее изучение ближней периферийной зоны дольменов с целью выявления сопутствующих построек: кромlexов, фасадных стен, каменного заполнения, ритуальных площадок, следов активностей, связанных с огнем, а также картирования антропогенно-измененных грунтов.

Решение данной задачи связано с применением высокоразрешающих геофизических методов, среди которых – георадиолокация (GPR). Наряду с георадиолокацией перспективен и метод магнитометрии, которые занимают лидирующие позиции в мировой практике исследования мегалитических комплексов. Георадар, основанный на излучении и регистрации отраженных сверхвысокочастотных электромагнитных импульсов, предоставляет возможность визуализировать внутреннее строение верхней части геологического разреза в виде двумерных разрезов и трехмерных моделей [Владов, Судакова, 2017; Edemsky et al., 2021; Schennen et al., 2022; Piroddi, Rassu, 2023]. Его эффективность для обнаружения погребенных каменных кладок, пустот и стратиграфических неоднородностей доказана на множестве объектов. Магнитометрия является незаменимым инструментом для локализации объектов, связанных с термохимическим воздействием на грунт, а также для выявления ям, рвов и скопленных ферромагнитных материалов [Edemsky et al., 2021; Steele et al., 2023].

Однако применительно к дольменам Кавказа потенциал этих методов раскрыт не полностью. Существуют лишь единичные примеры их успешного применения. Подавляющее большинство памятников остаются не обследованными современными геофизическими средствами. Отсутствие систематических данных не позволяет провести сравнительный анализ эффективности методов в различных ландшафтно-геологических условиях Причерноморья. Не ясен вклад различных факторов – тектонических нарушений, литологии перекрывающих отложений, степени увлажненности, уровня техногенных помех – в качество получаемых данных. Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется, во-первых, необходимостью получения новой информации о внутреннем устройстве и окружении конкретных дольменов в древности, а во-вторых, важностью методической оценки возможностей и ограничений георадиолокации для последующего масштабного изучения всей дольменной периферии.

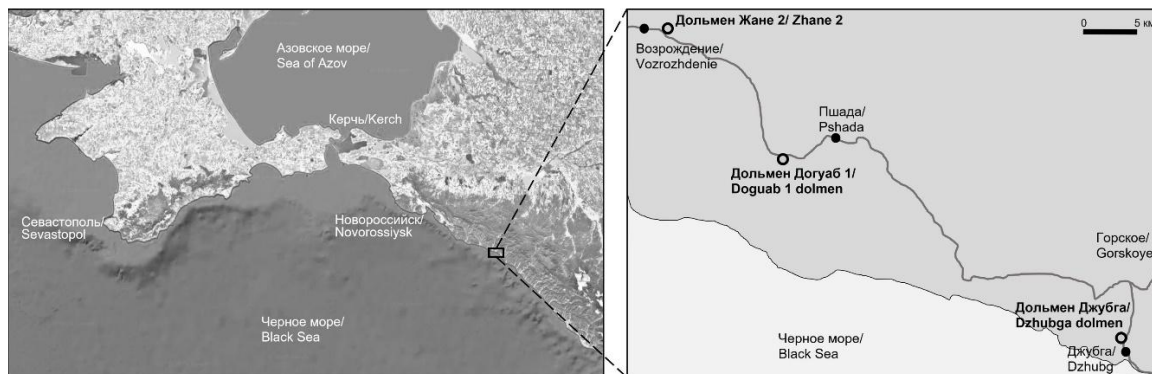


Рис. 1. Схема размещения изученных дольменов: Жане 2, Догуба 1, Джубга /
Fig. 1. Map of the location of the surveyed dolmens: Zhane 2, Doguab 1, Dzhubga

Цель работы – получение первых результатов георадиолокационного обследования ряда ключевых дольменов в районе п. Джубга, в долинах рек Жане и Пшада (Догуба 1) (рис. 1). Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: проведение высокодетальной георадиолокационной съемки с плотной сеткой профилей непосредственно у сооружений и на прилегающей территории; современная обработка данных GPR с учетом топографической поправки для корректной пространственной привязки аномалий; анализ георадиолокационных данных для выделения и интерпретации потенциальных археологических объектов; оценка влияния локальных грунтовых условий на глубинность и разрешающую способность методов.

Район работ, объекты и методика

Полевые исследования проводились в ноябре 2025 г. на территории расположения трех групп дольменов: одиночного дольмена в районе пос. Джубга, а также дольменных групп в долинах рек Жане и Пшада (рис. 1). Выбор объектов был обусловлен их хорошей сохранностью, доступностью и репрезентативностью для различных географических и геоморфологических условий региона.

Георадиолокационное зондирование выполнялось с использованием импульсного георадара «ЛОЗА-В» с антенными блоками на центральные частоты 50 и 150 МГц. Выбор антенны 150 МГц был обусловлен компромиссом между требуемой глубиной исследования (не менее 5 м) и разрешающей способностью (порядка 10–25 см в грунте), необходимой для идентификации отдельных камней и тонких слоев. Для получения объемной картины применялась методика площадной съемки. Шаг между профилями составлял 0.5–1.0 м, шаг дискретизации вдоль профиля – 0.05–0.2 м. Сетка профилей проектировалась индивидуально для каждого объекта, охватывая пространство непосредственно вблизи дольмена и периферийную зону радиусом не менее 10–15 м. Для точной пространственной привязки использовался GNSS-приемник (Garmin GPSMAP 60CSx).

Обработка георадиолокационных данных выполнялась в специализированном ПО «Крот», поставляемом в комплекте с георадаром «ЛОЗА-В», по стандартному потоку: первичная фильтрация (подавление низкочастотного «звона», полосовая частотная фильтрация), введение топографической поправки на основе GNSS-данных, усиление сигнала с глубиной, а также отображение результатов в виде функции амплитуды или производной волновой формы принятого сигнала.

Для углубленной интерпретации георадиолокационных данных были применены элементы атрибутного анализа, в частности, анализ пиковой частоты (f_p) спектра отраженного сигнала [Forte et al., 2012; Zhao et al., 2016; Wang et al., 2023]. Данный атрибут

чувствителен к изменению диэлектрических свойств среды (пористость, влажность, неоднородность) и позволяет выделять зоны с различными литологическими или техногенными характеристиками, которые могут быть неочевидны на исходных радарограммах.

Результаты и интерпретация

Дольмен Жане 2

Дольменная группа расположена в долине реки Жане – приблизительно в 1 км к северу от восточной окраины п. Возрождение (Краснодарский край). Состоит из трех дольменов и занимает наиболее плоский участок северной оконечности отрога горы Тхаб, на правом берегу реки [Трифонов, 2009].

На участке дольмена Жане 2 георадиолокационная съемка выполнялась как низкочастотной (50 МГц), так и высокочастотной (150 МГц) антеннами. Профили 50 МГц (15_5a, рис. 2e) позволили исследовать глубины до 15–20 м.

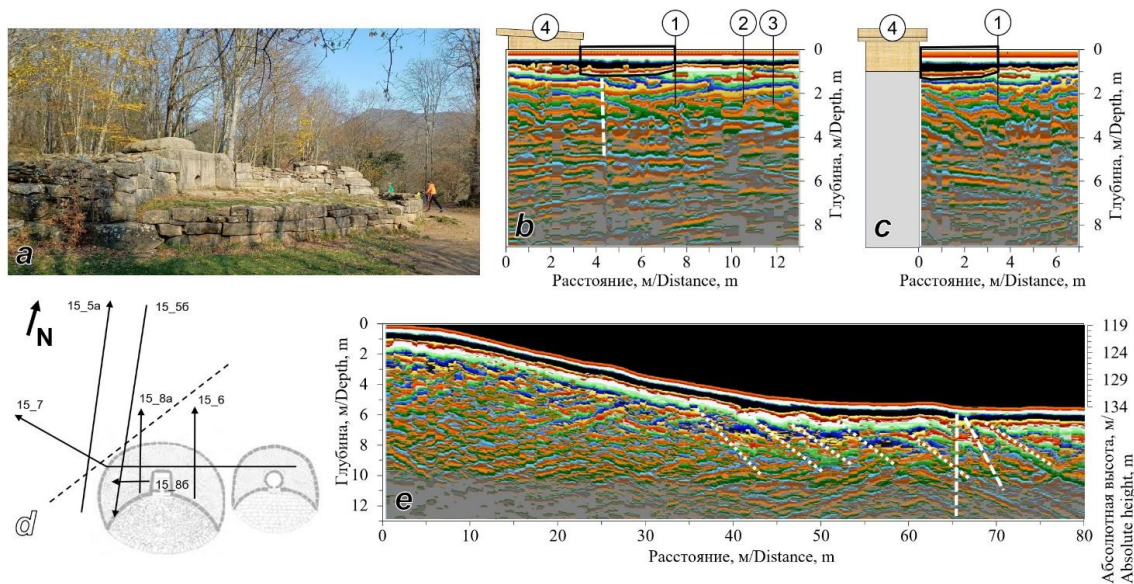


Рис. 2. Дольмен Жане 2: а – фото дольмена; б – георадиолокационный профиль 15_8a; с – профиль 15_8b; d – схема расположения профилей; e – профиль 15_5a. Обозначения: 1 – первоначальная граница размещения крепиды; 2 – граница насыпи отреставрированного дольмена; 3 – ров по контуру насыпи отреставрированного дольмена; 4 – камера дольмена; черная стрелка – георадиолокационный профиль; белая штриховая линия – расположение предполагаемого разрыва; белая пунктирная линия – сейсмогравитационные трещины; черная линия – строительная площадка под камеру дольмена /

Fig. 2. Zhane 2 Dolmen: a – photo of the dolmen; b – GPR profile 15_8a; c – profile 15_8b; d – profile 15_5a; 1 – the original boundary of the crepidum placement; 2 – the boundary of the restored dolmen mound; 3 – the moat along the contour of the restored dolmen mound; 4 – the dolmen chamber; the black arrow is the georadar profile; the white dashed line is the location of the proposed break; the white dotted line is the seismogravitational cracks; the black line is the construction site for the dolmen chamber

На ряде профилей выделяются субвертикальные зоны нарушения непрерывности осей синфазности, интерпретируемые как зоны разрывных нарушений (рис. 2b, г, д) [Милановский, 1968]. Предполагаемая линия разлома (рис. 2d, черная штриховая линия) проходит северо-западнее дольмена Жане 2. Субвертикальная ориентировка и характер смещений отличают данную аномалию от типичных оползневых швов (белая

штриховая линия, рис. 2е), а нарушение отложений высокой надпойменной террасы долины р. Жане может свидетельствовать о ее неотектонической природе. В насыпи реконструированного дольмена (рис. 2б) наблюдаются нарушения осей синфазности (белая штриховая линия), которые можно интерпретировать как линию разрыва. Тектонические деформации в левом крыле палеодольмена подтверждаются и раскопками В.А. Трифонова [Трифонов, 2009]: блоки крепиды, отходящие от левого угла фасадной стены, сместились наружу, а далее крепида пошла с углублением от уровня фасадной стены.

Профили 150 МГц (5_8а, 5_8б, рис. 2б, с), выполненные на насыпи, позволили выявить зону шириной 3–4 м (черная линия), непосредственно примыкающую к камере дольмена. Для этой зоны характерен слабоотражающий, однородный сигнал с четкой нижней границей на глубине, близкой к фундаментной плите камеры. Данная аномалия интерпретируется как выровненная искусственная площадка, на которую была установлена камера дольмена, сложенная из однородного уплотненного материала (суглинка). С внешней стороны зона ограничена линейной аномалией (1, рис. 2б, с), возможно соответствующей остаткам подпорной стенки (крепиды) дольменной насыпи до проведения реставрации.

Дольмен Джубга

Памятник расположен на пологонаклонной поверхности второй надпойменной террасы в левом борту долины р. Джубга и ориентирован фасадом на ВЮВ (азимут 100°), т.е. вниз по склону к реке. Дольмен Джубга (рис. 3д) представляет собой окруженную земляной и каменной насыпями мегалитическую камеру, к фасаду которой примыкает огражденный каменной стеной круглый в плане «внутренний дворик» (по терминологии А.В. Дмитриева). Камера представляет собой трапецевидную в плане и почти прямоугольную в вертикальном сечении постройку, сооруженную из шести тщательно обработанных и подогнанных друг к другу песчаниковых плит.

Среди результатов археологических работ, завершенных в 2008 г. [Трифонов, 2014], было зафиксировано, что фундамент (пол) дольмена сооружен из массивной плиты, уложенной на специально подготовленную выровненную площадку, покрытую 10-сантиметровым утрамбованным слоем смеси суглинка и мелкого гравия. Вокруг двора и камеры сформирована насыпь из слоя камней и крупного щебня (толщиной до 0,7 м), внешний край которой располагался приблизительно в семи метрах от камеры. В результате георадиолокационной съемки место размещения крепиды не было выявлено.

Всего проложено 24 профиля с использованием антенны 150 МГц, шаг по профилю 0,05 м. Съемка проведена в южной и юго-восточной частях дольмена; на северной и северо-западной сторонах работы не проводились, так как практически вплотную к памятнику проходит дорога, размещено автохозяйство, и территория ограничена металлической оградой, расположенной примерно в 2 м от дольмена. Профили от 20_1_1 до 20_1_13 проложены вниз по склону от левой боковой стенки камеры и стены двора (рис. 3а).

Высокочастотная съемка (150 МГц) на южном и юго-восточном склонах памятника (рис. 3а) выявила сложную террасированную структуру (белая штриховая линия) основания дольмена (рис. 3б, с, е). На радарограммах отчетливо прослеживаются несколько субгоризонтальных отражающих границ, интерпретируемых как поверхности террас, искусственно сформированных или подрезанных при строительстве. Уровень верхней террасы соответствует отметке залегания фундаментной плиты дольмена. Нерегулярная, хаотичная текстура отражений непосредственно вблизи камеры на глубинах ниже плиты пола (рис. 3с) может указывать на наличие каменной забутовки или неоднородного техногенного заполнения, а также, возможно, на то, что камера дольмена размещена не на глинистом основании.

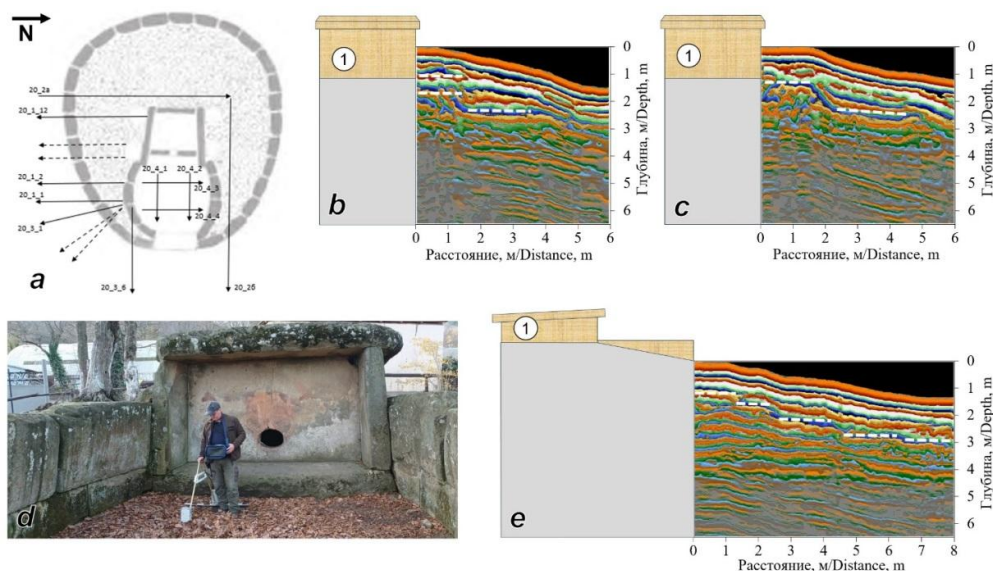


Рис. 3. Дольмен Джубга: а – схема расположения профилей; б – профиль 20_1_2; с – профиль 20_1_11; d – фото дольмена, процесс георадиолокационной съемки; е – профиль 20_3_6. Обозначения: 1 – камера дольмена; черная стрелка – георадиолокационный профиль; белая штриховая линия – террасы /

Fig. 3. Dzhubga Dolmen: a – profile layout; b – profile 20_1_2; c – profile 20_1_11; d – photo of the dolmen, GPR survey process; e – profile 20_3_6; 1 – dolmen chamber; black arrow – GPR profile; white dashed line – terraces

Дольмен Догуаб 1

Дольмен Догуаб 1 относится к группе из четырех дольменов, находящихся на территории крестьянско-фермерского хозяйства в долине реки Пшада при впадении в нее притока Догуаб. Дольмен расположен на возвышенности, возможно, на холме среди полей (рис. 4b). Камера хорошо сохранилась, но поскольку дольмен располагается среди полей и садов фермерского хозяйства, его внешний облик как памятника, включающий насыпь, крепиду, фасадную стену и т.д., существенно изменен [Дмитриев, 2025]. Он ориентирован выходом практически на юг, в плане имеет прямоугольную форму и сооружен из шести тщательно обработанных и подогнанных друг к другу песчаниковых плит. Общий диаметр возвышенности, на которой располагается камера, не превышает 20–25 м.

Георадиолокационные измерения выполнены антеннами с центральной частотой 150 МГц, шаг по профилю 0,05 м. Проложено две пары взаимно перпендикулярных профилей на расстоянии около метра от стен камеры. Схема размещения профилей приведена на рисунке 4а. На рисунках 4с, d, e представлены профили 16_3, 16_4, 16_1 с учетом рельефа местности. На профилях четко выделяется горизонтальная отражающая поверхность в границах (1) на глубине ~0.5–0.8 м, соответствующая выровненной площадке под фундаментную плиту камеры, строительство крепиды и фасадной стены (предположительно, слой утрамбованного суглинка с щебнем). Ниже, на глубинах 1.8–3 м от поверхности (рис. 4d, e), фиксируется кровля коренных пород (материка), белая штриховая линия. Характер кровли материка указывает на структуру его залегания – параллельная слоистость с падением, близким к вертикальному, что наблюдается в близлежащих обнажениях. В районе тыльной части дольмена на профиле 16_4 (рис. 4е, интервал 26–28 м) наблюдается локальное симметричное углубление в кровле материка с крутыми бортами, интерпретируемое как возможный ров для фундамента крепиды. Не исключено, что понижение имеет естественную природу.

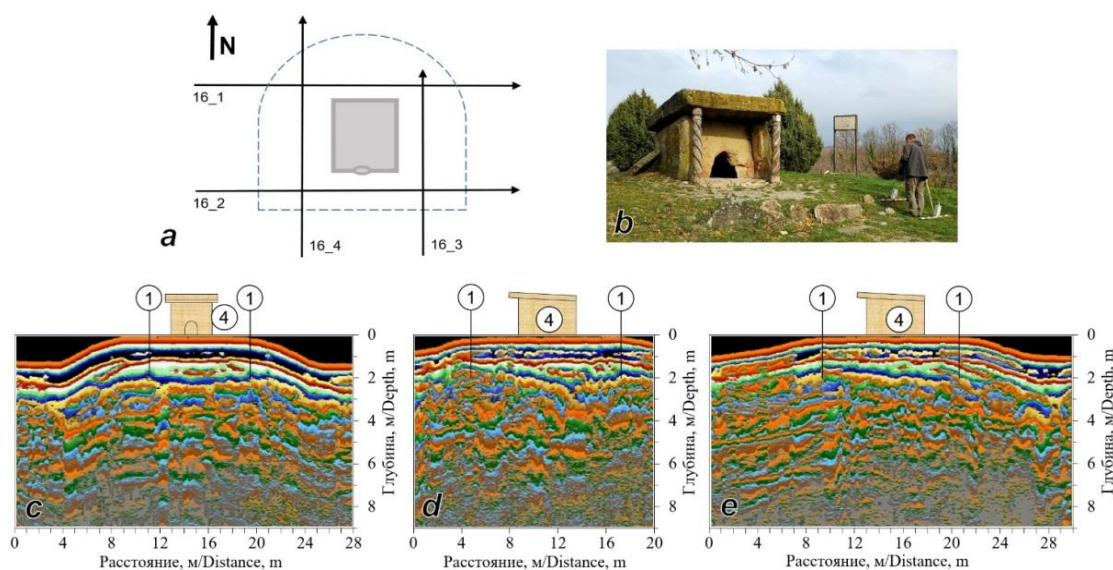


Рис. 4. Дольмен Догуаб 1: а – схема расположения профилей; б – фото дольмена, процесс георадиолокационной съемки; с – профиль 16_1; д – профиль 16_3; е – профиль 16_4.

Обозначения: 1 – граница площадки под фундаментную плиту камеры, строительство крепиды и фасадной стены; белая штриховая линия – кровля материка; 2 – камера дольмена /

Fig. 4. Doguab 1 Dolmen: a – scheme of the location of profiles; b – photo of the dolmen and the process of GPR survey; c – profile 16_1; d – profile 16_3; e – profile 16_4; 1 – the border of the site under the foundation slab of the chamber, the construction of the crepid and the front wall; the white dashed line is the roof of the mainland; 2 – the chamber of the dolmen

Применение спектрального анализа георадиолокационных данных

Для характерных участков георадиолокационных профилей дольменов Джубга и Догуаб 1 был применен атрибутный анализ. В качестве основного количественного индикатора использовалась пиковая частота (f_p) спектра, вычисляемая для каждой точки разреза, а также анализировался сам спектр сигнала.

Для дольмена Джубга проведен анализ двух характерных участков профиля 20_1_11: один – в непосредственной близости к боковой стенке дольмена (пикет 1 м, рис. 3b); второй – в центральной части одной из террас склона. Вблизи камеры наблюдается широкополосный спектр с $f_p \sim 100$ МГц (рис. 5a), что характерно для неоднородной и, вероятно, более увлажненной зоны. На удалении от камеры (пикет 3 м) спектр высокоамплитудный и узкополосный с $f_p \sim 70$ МГц (рис. 5b), что указывает на более однородный и сухой грунт террасы.

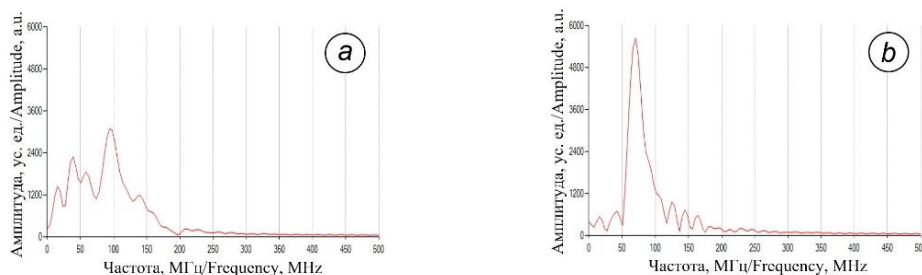


Рис. 5. Дольмен Джубга, профиль 20_1_11:

а – спектр сигнала, пикет 1 м; б – спектр сигнала, пикет 3 м /

Fig. 5. Dzhubga Dolmen, profile 20_1_11:

a – signal spectrum, point 1 m; b – signal spectrum, point 3 m

Для дольмена Догуаб 1 проведен спектральный анализ трех характерных участков профиля 16_4 (рис. 4е): двор дольмена; в метре от левой боковой стены камеры (центральная ее часть); за дольменом, нижняя точка склона основания. Результаты приведены на рисунке 6.

Значения f_p в трех характерных точках профиля оказались близкими (~50 МГц), однако форма спектров существенно различается (рис. 6). У стенки камеры (пикет 15 м) спектр узкий, что подтверждает наличие однородного техногенного слоя (выравнивающей подушки). В других точках (пикеты 3 м, 27 м) спектры низкоамплитудные, широкие, что соответствует неоднородному, с множественными локальными аномалиями, естественному или насыпному грунту.

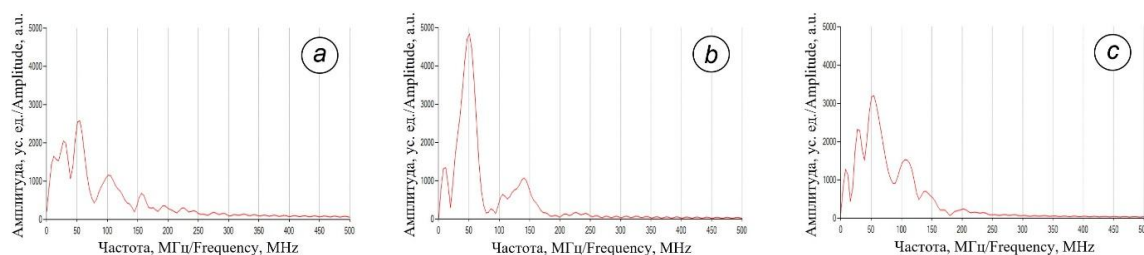


Рис. 6. Дольмен Догуаб 1, профиль 16_4: а – спектр сигнала, пикет 3 м; б – спектр сигнала, пикет 15 м; с – спектр сигнала, пикет 27 м /

Fig. 6. Doguab 1 Dolmen, profile 16_4: a – signal spectrum, point 3 m; b – signal spectrum, point 15 m; c – signal spectrum, point 27 m

Обсуждение

Современное состояние исследований дольменов показывает, что для выявления закономерностей формирования и развития практики культового мегалитического строительства на Западном Кавказе в эпоху бронзы не хватает, главным образом, конкретных, точно документированных наблюдений относительно конструкции и строительных приемов всего дольмена, а не только его погребальной камеры [Дмитриев, 2025]. Камера дольмена, какого бы типа она ни была, является только частью культового памятника, состоящего, как правило, из самой камеры, стены у ее фасада, каменной засыпки (каирна), полностью покрывающей камеру, и крепиды, поддерживающей насыпь.

Использование полученной информации о строении подстилающей поверхности на территории дольменного комплекса, возможно, поможет решить ряд вопросов, стоящих перед исследователями: функциональное назначение памятника; способы и методы строительства; возраст возведения насыпи, а следовательно, и возраст сооружения дольмена.

Комплексные геофизические исследования подтвердили высокую эффективность георадиолокации для изучения архитектурного контекста дольменов. На всех обследованных объектах удалось выявить элементы, не фиксируемые визуально:

1. Строительные горизонты и планировка: четко идентифицированы искусственные выровненные площадки под камерами (Жане 2, Догуаб 1), террасирование склонов (Джубга), что раскрывает инженерные приемы древних строителей.

2. Периферийные структуры: выделены аномалии, интерпретируемые как остатки крепид и рвов, что позволяет уточнять исходные размеры и план памятников.

3. Геологический контекст: получены данные о геологическом строении площадок, глубине залегания коренных пород, выявлены потенциальные зоны разрывных нарушений (Жане 2), важные для оценки сохранности объектов.

4. Методический аспект: применение спектрального анализа (f_p) позволило дифференцировать техногенные однородные слои от неоднородных естественных отложений и оценить вариации влажности. Антенна 150 МГц показала оптимальное соотношение разрешения и глубинности для задач картирования строительных элементов.

Ограничением метода на данных объектах является сильное затухание сигнала в переувлажненных глинистых грунтах (низкая f_p), а также маскировка мелких объектов на фоне мощных отражений от каменной кладки и склонов.

Выводы

1. Впервые выполнено детальное георадиолокационное обследование дольменов Джубга, Жане 2 и Догуаб 1, позволившее получить новые данные об их скрытом в грунте архитектурном окружении и строительных приемах.

2. На всех объектах надежно идентифицированы ключевые строительные элементы: искусственные выровненные площадки под камерами, террасированные склоны (Джубга), линейные структуры, интерпретируемые как остатки крепид (Жане 2) и рвов (Догуаб 1). Это подтверждает сложную, комплексную структуру дольменных памятников, выходящую далеко за пределы камер.

3. Получены данные о геологическом строении площадок. Выявлена и картирована потенциальная зона неотектонического нарушения в районе дольмена Жане 2, что важно для оценки георисков и истории формирования памятника.

4. Апробирована и показала свою эффективность методика атрибутивного анализа георадиолокационных данных на основе пиковой частоты (f_p). Метод позволил объективно выделить однородные техногенные слои (подсыпки, выравнивающие площадки) и оценить пространственную изменчивость влажности грунтов.

5. Для задач картирования приповерхностных (до 5 м) археологических объектов в условиях предгорного рельефа и разнородных грунтов Черноморского побережья Кавказа оптимальной является антенна с центральной частотой 150 МГц, обеспечивающая необходимую разрешающую способность при достаточной глубинности.

6. Результаты работы подтверждают, что георадиолокация является высокоинформативным, неразрушающим инструментом для изучения дольменов. Полученные данные задают новые ориентиры для точечных археологических раскопок и служат основой для планирования дальнейших исследований.

Литература

1. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. – М.: Геос, 2017. – 240 с.
2. Гей А.Н. Исследования дольменных памятников Западного Кавказа в 2005–2007 гг. // Труды II (XVIII) Всероссийского археологического съезда в Суздале. – 2008. – Т. 1. – С. 294–298.
3. Дмитриев А.В. Новые подходы к изучению кавказских дольменов (конструкция, назначение и датировка) // Материалы и исследования по археологии Северного Кавказа. – 2025. – № 23. – С. 55–120.
4. Марковин В.И. Дольмены Западного Кавказа. – М.: Изд-во Наука, 1978. – 329 с.
5. Марковин В.И. Дольменные памятники Прикубанья и Причерноморья. – М.: Институт археологии РАН, 1997. – 402 с.
6. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. – М.: Недра, 1968. – 483 с.
7. Резепкин А.Д. Типология мегалитических гробниц Западного Кавказа // Вопросы археологии Адыгеи. Майкоп, 1988. – С. 156–163.
8. Резепкин А.Д. Новосвободненская культура (на основе материалов могильника «Клады»). – СПб.: Нестор-История, 2012 (Тр. ИИМК РАН; Т. XXXVII). – 342 с.
9. Трифонов В.А. Что мы знаем о дольменах Западного Кавказа и чему учит история их изучения? // В кн.: Дольмены. Современники древних цивилизаций. – Краснодар: Краснодарское книжное издательство, 2001. – С. 20–55.

10. Трифонов В.А. Дольмены в долине реки Жане // В сб.: Археологические открытия 1991–2004 гг. Европейская Россия. – М.: Институт археологии РАН, 2009. – С. 115–128.
11. Трифонов В.А. Дольмен Джубга на Черноморском побережье Кавказа // Записки Института истории материальной культуры. – 2014. – № 10. – С. 104–131.
12. Edemsky D., Popov A., Prokopovich I. Geophysical survey of Tunnug mound periphery, Tuva, Russia // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 189. – pp. 104326. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104326.
13. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di Cuia R., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes // *Journal of Applied Geophysics*. – 2012. – Vol. 81. – pp. 76–87. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.009.
14. Hutton R. Monuments in the making: raising the great dolmens in early Neolithic northern Europe: by Vicki Cummings and Colin Richards, Oxford, Oxbow, 2021, 257 p. [Book Review] // *Time and Mind*. – 2025. – Vol. 18. No. 1-2. – pp. 117–119. DOI: 10.1080/1751696X.2025.2522595.
15. Nesterkina A. L., Portnova A. A., Fedorova A. A., Yondri L. The Megalithic Tradition of East and Southeast Asia // *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*. – 2022. – Vol. 50. No. 3. – pp. 39–48. DOI: 10.17746/1563-0110.2022.50.3.039-048.
16. Piroddi L., Rassu M. Application of GPR Prospection to Unveil Historical Stratification inside Monumental Buildings: The Case of San Leonardo de Siete Fuentes in Santu Lussurgiu, Sardinia, Italy // *Land*. – 2023. – Vol. 12. No. 3. – Art. No. 590. DOI: 10.3390/land12030590.
17. Schennen S., Wetterich S., Schirrmeister L., Schwamborn G., Tronicke J. Seasonal impact on 3D GPR performance for surveying Yedoma ice complex deposits // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 10. – Art. No. 741524. DOI: 10.3389/feart.2022.741524.
18. Stele A., Kaub L., Linck R., Schikorra M., Fassbinder J.W.E. Drone-based magnetometer prospection for archaeology // *Journal of Archaeological Science*. – 2023. – Vol. 158. – pp. 105818. DOI: 10.1016/j.jas.2023.105818.
19. Wang Q., Liu X., Shen Yu., Li M. Characterization and evaluation of thaw-slumping using GPR attributes in the Qinghai–Tibet Plateau // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – No. 9. – Art. No. 2273. DOI: 10.3390/rs15092273.
20. Zhao W.K., Forte E., Dossi M., Pipan M. Integrated attribute analysis for improved GPR data interpretation // In: 16th International Conference on Ground Penetrating Radar. Hong Kong, China, 2016. – pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572678.

References

1. Vladov M.L., Sudakova M.S. Ground-penetrating radar. From physical foundations to promising directions. Moscow. GEOS. 2017. 240 p. (In Russ.)
2. Gay A.N. Research of dolmen monuments of the Western Caucasus in 2005–2007. In: Proceedings of the II (XVIII) All-Russian Archaeological Congress in Suzdal. 2008. Vol. 1. pp. 294–298. (In Russ.)
3. Dmitriev A.V. New approaches to the study of Caucasian dolmens (construction, purpose and dating). Materials and research on the archeology of the North Caucasus. 2025. No. 23. pp. 55–120. (In Russ.)
4. Markovin V.I. Dolmens of the Western Caucasus. Moscow. Nauka. 1978. 329 p. (In Russ.)
5. Markovin V.I. Dolmen monuments of the Kuban and Black Sea regions. Moscow. Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences. 1997. 402 p. (In Russ.)
6. Milanovsky E.E. The latest tectonics of the Caucasus. Moscow. Nedra. 1968. 483 p. (In Russ.)
7. Rezepkin A.D. Typology of megalithic tombs of the Western Caucasus. Questions of archeology of Adygea. Maykop. 1988. pp. 156–163. (In Russ.)
8. Rezepkin A.D. Novosvobodnenskaya culture (based on the materials of the burial ground “Klady”). Saint Petersburg. Nestor-History. 2012. 342 p. (In Russ.)
9. Trifonov V.A. What do we know about the dolmens of the Western Caucasus and what does the history of their study teach us? In: Dolmens. Contemporaries of Ancient Civilizations. 2001. pp. 20–55. (In Russ.)
10. Trifonov V.A. Dolmens in the valley of the Zhane River. In: Archaeological discoveries 1991–2004. European Russia. Moscow. Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences. 2009. pp. 115–128. (In Russ.)

11. Trifonov V.A. Dzhugba Dolmen on the Caucasian Black Sea shore. Notes of the Institute of the History of Material Culture. 2014. No. 10. pp. 104–131. (In Russ.)
12. Edemsky D., Popov A., Prokopovich I. Geophysical survey of Tunnug mound periphery, Tuva, Russia. Journal of Applied Geophysics. 2021. Vol. 189. pp. 104326. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104326.
13. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di Cuia R., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. Journal of Applied Geophysics. 2012. Vol. 81. pp. 76–87. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.009.
14. Hutton R. Monuments in the making: raising the great dolmens in early Neolithic northern Europe: by Vicki Cummings and Colin Richards, Oxford, Oxbow, 2021, 257 p. [Book Review]. Time and Mind. 2025. Vol. 18. No. 1-2. pp. 117–119. DOI: 10.1080/1751696X.2025.2522595.
15. Nesterkina A. L., Portnova A. A., Fedorova A. A., Yondri L. The Megalithic Tradition of East and Southeast Asia. Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2022. Vol. 50. No. 3. pp. 39–48. DOI: 10.17746/1563-0110.2022.50.3.039-048.
16. Piroddi L., Rassu M. Application of GPR Prospection to Unveil Historical Stratification inside Monumental Buildings: The Case of San Leonardo de Siete Fuentes in Santu Lussurgiu, Sardinia, Italy. Land. 2023. Vol. 12. No. 3. Art. No. 590. DOI: 10.3390/land12030590.
17. Schennen S., Wetterich S., Schirrmeister L., Schwamborn G., Tronicke J. Seasonal impact on 3D GPR performance for surveying Yedoma ice complex deposits. Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. Art. No. 741524. DOI: 10.3389/feart.2022.741524.
18. Stele A., Kaub L., Linck R., Schikorra M., Fassbinder J.W.E. Drone-based magnetometer prospection for archaeology. Journal of Archaeological Science. 2023. Vol. 158. pp. 105818. DOI: 10.1016/j.jas.2023.105818.
19. Wang Q., Liu X., Shen Yu., Li M. Characterization and evaluation of thaw-slumping using GPR attributes in the Qinghai–Tibet Plateau. Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 9. Art. No. 2273. DOI: 10.3390/rs15092273.
20. Zhao W.K., Forte E., Dossi M., Pipan M. Integrated attribute analysis for improved GPR data interpretation. In: 16th International Conference on Ground Penetrating Radar. Hong Kong, China. 2016. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572678.

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2026.41.27.001

Оригинальная статья

Геофизическое обеспечение горного производства

В.И. Голик 

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

Статья поступила: 10.04.2026, доработана: 07.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Республики Северного Кавказа располагают природными и техногенными ресурсами. Добыча руд на их территории осуществляется с исторических времен. Добывающие предприятия работали по замкнутой схеме комплексного использования металлосодержащего сырья. Актуальность исследований данного направления увеличивается в связи с расположением месторождений на северном склоне Большого Кавказа в сложных геодинамических условиях, что повышает необходимость учета рисков при разработке месторождений, особенно подземным способом. Решению проблемы восстановления былого потенциала горных предприятий региона способствует применение методов мониторинга добычных работ с использованием возможностей рудничной геофизики. Актуальность темы исследования объясняется необходимостью повышения качества руд и минимизации нагрузки на окружающую природную среду. **Методика.** Достижению поставленной цели способствует рационализация применяемых геофизических методов исследования рудовмещающих массивов. **Результаты.** Приведены схемы использования средств рудничной геофизики для мониторинга реакции рудовмещающих массивов на технологическое воздействие. Дано математическое описание и построены математические модели геофизических средств сопровождения горных работ. Доказано, что геомеханические и прочие задачи подземной разработки рудных месторождений решаются методами геофизики. Обобщены возможности мониторинга процессов подземной разработки месторождений методами рудничной геофизики, в том числе: дискование керна, акустическое прозвучивание, ультразвуковой, электрический и магнитный каротаж, разгрузка напряжений, сейсмоакустика, электрометрия, вдавливание пуансонов, деформация скважин, геомагнитный, реперы сдвижения, электрические цепи в скважинах, моделирование на эквивалентных и оптически активных материалах, а также математическое моделирование. Сделан вывод, что повышение безопасности горных работ и качества руд с минимизацией ущерба окружающей среде обеспечивается использованием комплекса геофизических методов на всех стадиях добычи и переработки минерального сырья.

Ключевые слова: Северный Кавказ, месторождения, разработка, геодинамика, мониторинг, рудничная геофизика.

Для цитирования: Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.41.27.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.41.27.001

Original paper

Geophysical support of mining

V.I. Golik 

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

Received: 10.04.2026, revised: 07.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The republics of the North Caucasus have natural and man-made resources. The mining of ores on their territory has been carried out since historical times. Mining enterprises operated according to a closed-loop scheme of integrated use of metal-containing raw materials. The relevance of research in this area is increasing due to the location of deposits on the northern slope of the Greater Caucasus in difficult geodynamic conditions, which increases the relevance of taking risks into account when developing deposits, especially underground. The solution to the problem of restoring the former potential of mining enterprises in the region is facilitated by the use of mining monitoring methods using the capabilities of mining geophysics. The relevance of the research topic is explained by the need to improve the quality of ores and minimize the environmental impact. **The methodology.** The achievement of this goal is facilitated by the rationalization of applied geophysical methods for studying ore-bearing massifs. **Results.** The schemes of using mining geophysics tools to monitor the reaction of ore-bearing massifs to technological impact are given. A mathematical description is given and mathematical models of geophysical mining support facilities are constructed. It is proved that geomechanical and other problems of underground mining of ore deposits are solved by methods of geophysics. The possibilities of monitoring the processes of underground mining by methods of mine geophysics are summarized, including: core diskings, acoustic sounding, ultrasonic, electric and magnetic logging, stress relief, seismoacoustics, electrometry, punch indentation, well deformation, geomagnetic, displacement reference points, electric circuits in wells, modeling on equivalent and optically active materials, as well as mathematical modeling. It is concluded that improving the safety of mining operations and the quality of ores while minimizing environmental damage is ensured by using a set of geophysical methods at all stages of mining and processing of mineral raw materials.

Keywords: North Caucasus, deposits, development, geodynamics, monitoring, mining geophysics.

For citation: Golik V.I. Geophysical support of mining. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.41.27.001

Введение

Устойчивая добыча полезных ископаемых обеспечивается гармоничным сочетанием результатов текущей практики и направлений развития на будущее, в процессе анализа опасных процессов в природно-промышленной системе, прогнозирования достижений и учета технологических свойств полезных компонентов месторождений [Aras, 2021; Bosikov et al., 2021; Ключев и др., 2019].

Принципы устойчивого освоения георесурсов как способ снижения уязвимости подземных объектов являются результатом трехмерного анализа и оценки рисков по эмпирическим методикам при проектировании горно-технологических объектов [Cobian et al., 2022; Kongar-Syuryun et al., 2024; Абрамкин и др., 2022, Голик, 2025, 2026].

Комбинирование геофизических методов мониторинга горных работ позволяет разрабатывать модели, в том числе, напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей, влияния открытых горных работ на состояние подстилающего массива горных

пород при комбинировании способов разработки месторождений и динамического прогнозирования обрушения горных пород в сочетании с инверсией технологических параметров [Адигамов, Юденков, 2021; Гладков и др., 2024; Идармачев, 2025; Алборов и др., 2026; Мухаметшин и др., 2026; Hou et al., 2022].

Геофизические методы сопровождения технологических процессов применяются на смежных этапах горно-обогатительного цикла, например, при извлечении металлов из технологически вскрываемых руд и разведке рудных месторождений [Голик, 2010; Голик и др., 2023; Yakonovskaya et al., 2020].

Эффективность геофизического сопровождения горных процессов повышается модернизацией действующих и созданием новых аппаратов и оборудования для осуществления мониторинга методами рудничной геофизики [Vysotin et al., 2024; Дарбинян и др., 2023; Askaripour et al., 2022].

У истоков методического обеспечения исследований состояния рудовмещающих массивов в процессе освоения их запасов стоят В.Д. Слесарев, Г.Н. Кузнецов, Н.П. Влох и др.

Гипотезы управления состоянием массивов едины в том, что эффективность управления массивами зависит от сбалансированности напряженно-деформированных сред путем технологического воздействия на них. Объективные и оперативные сведения о поведении рудовмещающих пород предоставляют геофизические методы мониторинга технологических процессов.

Методика

Структурную неоднородность массива определяют методами ультразвукового, электрического и магнитного каротажа. Напряжения в массиве измеряют методами разгрузки, регистрации деформаций кернов, осмысления параметров, сейсмоакустики, сейсмического и электрометрического воздействия.

Результаты

Наиболее достоверным и доступным методом оценки состояния массива является выход керна при бурении скважин с дифференциацией по толщине дисков Ханзаги И. (рис. 1).

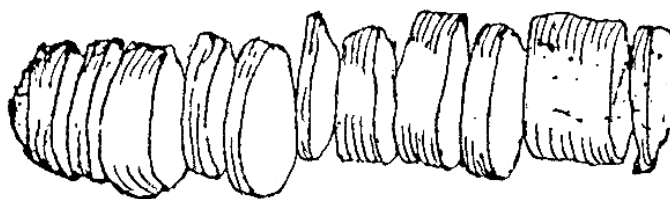


Рис. 1. Выход керна при бурении скважин / Fig. 1. Core yield during well drilling

Коэффициент ослабления пород в массиве (K_o):

$$K_o = \frac{l}{2L} \left(\frac{P_n}{P_{const}} + \frac{l}{n} \right),$$

где L – длина интервала скважины, м;

l – длина керна, превышающая его диаметр, м;

n – количество кернов длиной, равной диаметру керна, шт.;

P_n – количество кернов длиной, равной диаметру, на 1 м скважины, шт.

Степень неоднородности оценивают методом межскважинного акустического прозвучивания (рис. 2).

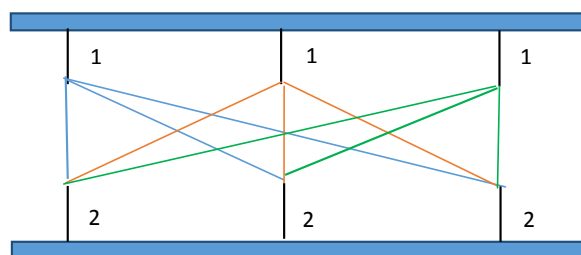


Рис. 2. Схема исследования массива прозвучиванием импульсами по скважинам:
1 – излучатели; 2 – приемники /

Fig. 2. Scheme of massif research by sounding pulses through wells:
1 – radiators; 2 – receivers

Излучатель и приёмник звуковых импульсов размещают в скважинах, пробуренных с одной стороны массива (1) и с другой стороны (2). Расстояние между скважинами – 5 м. Глубина скважин – 2,5 м. Скважины заполняли водой.

Коэффициент звукопоглощения α_i :

$$\alpha_i = \frac{L_o - L_i - 20 \lg r_i}{8,68 r_i},$$

где L_o – уровень сигнала в точке излучения, дБ;

L_n – уровень сигнала в точке приема, дБ;

r_i – преодолеваемое импульсом расстояние, м.

Зависимость частоты звуков разрушения от величины напряжений (σ):

$$\sigma = a \cdot N_H^B,$$

где σ – величина напряжений, МПа;

N_H – количество импульсов в минуту;

a – коэффициент, характеризующий структуру пород;

b – коэффициент, характеризующий прочность пород.

Сдвигения массива пород и руд при подземной разработке определяются глубинными реперами по простиранию и вкрест простирания рудных тел (рис. 3).

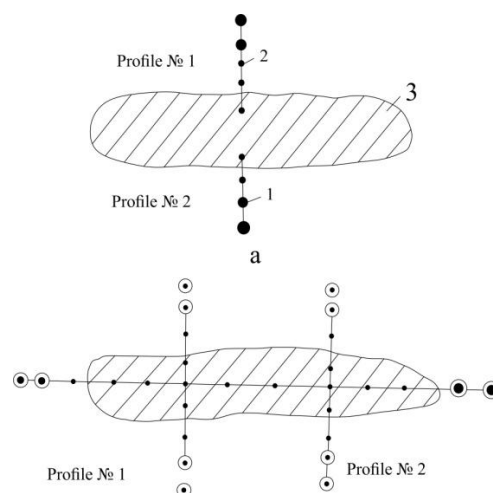


Рис. 3. Профили наблюдательной станции: а – односторонний; б – двухсторонний;
1 – опорные реперы; 2 – рабочие реперы 3 – рудное тело /

Fig. 3. Profiles of the observation station:
a – one-sided; b – two-sided; 1 – reference repers; 2 – working repers; 3 – ore body

Электрические цепи из параллельно подключенных сопротивлений размещают в скважинах (рис. 4). При обрушении пород сцементированная с породой часть скважины сигнализирует о разрушении.

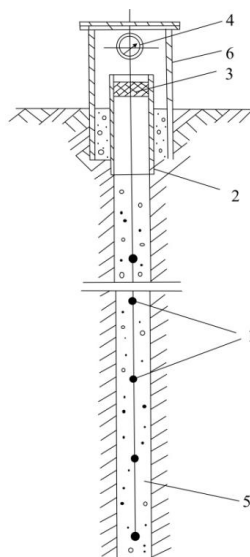


Рис. 4. Наблюдательная станция: 1 – электрическая цепь; 2 – обсадная труба; 3 – резиновая пробка; 4 – измерительный прибор; 5 – цементный раствор; 6 – защитный колпак /

Fig. 4. Observation station: 1 – electrical circuit; 2 – casing pipe; 3 – rubber plug; 4 – measuring device; 5 – cement mortar; 6 – protective cap

При изучении устойчивости кровли применяют традиционные и вновь разработанные датчики, осциллографы и др. приборы, механизмы и аппараты.

Подбор эквивалентных материалов производится по условию:

$$s_n = a_g (g_n / g_m) s_m,$$

где s_n – прочность пород в массиве, МПа;

a_g – масштаб модели;

g_n – плотность пород в массиве, кг/см³;

g_m – плотность пород в модели, кг/см³;

s_m – прочность пород в модели, МПа.

При моделировании на оптически активных материалах элементы модели изготавливают из материалов с различными модулями упругости, нагружают в центрифуге до значения, при котором модель ведет себя подобно натуре, и нагревают до температуры «замораживания». Разность главных нормальных напряжений:

$$d_1 - d_2 = 2 t_{max},$$

где d_1 – главные горизонтальные напряжения, МПа;

d_2 – главные вертикальные напряжения, МПа.

Напряжения t_{max} определяют по окраске материала модели в зависимости от касательных напряжений:

$$d_n = d_m E_n / E_m$$

Оценку напряженно-деформированного состояния массива пород осуществляют физическим и математическим моделированием с использованием методов шахтной геофизики, формируют инженерно-геологическую модель массива и определяют его нарушенность.

По величине структурного ослабления пород выделяют зоны и сгущения пологих трещин.

Геомеханические задачи разработки месторождений решаются методами геофизики (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Типизация методов геофизического обеспечения горного производства /
Typification of methods of geophysical support of mining production**

Методы / Methods	Параметр / Parameter	Принцип / Principle	Средство реализации / Means of implementation
Дискование керна / Core dinking	Прочность пород / Rock strength	Выход керна при бурении скважин / Core yield during well drilling	Буровой станок / Drilling machine
Акустическое прозвучивание / Acoustic sounding	Однородность массива / Massif homogeneity	Параметры упругих колебаний / Elastic vibration parameters	Излучатель, звукоприемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Ультразвуковой каротаж / Ultrasonic logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Электрическое сопротивление / Electrical resistivity	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Электрический каротаж / Ultrasonic logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Диэлектрическая проницаемость / Dielectric permittivity	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Магнитный каротаж / Magnetic logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Магнитная проницаемость / Magnetic permeability	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Разгрузка напряжений / Stress relief	Напряженность / Tension	Упругие деформации / Elastic deformations	Буровой станок, датчики, приемник, анализатор спектра / Drilling machine, transducers, receiver, spectrum analyzer
Акустическая эмиссия / Acoustic emission	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Акустическая проницаемость / Acoustic permeability	Излучатель частот 10–100 кГц, приемник, анализатор спектра / Frequency transmitter 10-100 kHz, receiver, spectrum analyzer
Сейсмоакустический / Seismoacoustic	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Акустическая проницаемость / Acoustic permeability	Излучатель частот 30–500 кГц, приемник, анализатор спектра / Frequency transmitter 30–500 kHz, receiver, spectrum analyzer
Электрометрический / Electrometric	Напряженность / Tension	Электрическое сопротивление / Electrical resistivity	Излучатель тока, приемник, анализатор спектра / Current transmitter, receiver, spectrum analyzer
Вдавливание пуансонов / Punch indentation	Напряженность / Tension	Сопротивление внедрению жесткого штампа / Resistance to rigid die insertion	Буровой станок, гидравлический прибор БП18 / Drilling machine, hydraulic device BP18
Деформация скважин / Well deformation	Деформированность / Deformation	Изменение диаметра скважин / Changing the diameter of wells	Буровой станок, деформометры / Drilling machine, deformometers
Геомагнитный / Geomagnetic	Напряженность / Tension	Импульсно-электромагнитное излучение / Pulse-electromagnetic radiation	Излучатель сигнала, приемник, анализатор спектра / Signal transmitter, receiver, spectrum analyzer

Глубинные реперы / Depth gauges	Деформированность/ Deformation	Размеры трещин / Fracture sizes	Системы связи (провокола или штанги), реперы / Communication systems (wire or rods), gauges
Электрические цепи в скважинах / Electrical circuits in boreholes	Деформированность/ Deformation	Сопротивление электрической цепи/ Electrical circuit resistance	Датчики, анализатор спектра / Sensors, spectrum analyzer
Моделирование на эквивалентных материалах / Modeling on equivalent materials	Деформированность/ Deformation	Напряженность / Tension	Форма, материалы, датчики, анализатор / Shape, materials, sensors, analyzer
Моделирование на оптически активных материалах / Modeling on optically active materials	Деформированность/ Deformation	Напряженность / Tension	Форма, материалы, датчики, анализатор / Shape, materials, sensors, analyzer
Математическое моделирование / Mathematical modeling	Деформированность/ Deformation	Напряженность / Tension	Закономерности, средства математического анализа / Regularities, tools of mathematical analysis

Заключение

Природные и техногенные ресурсы Республик Северного Кавказа могут быть востребованы с использованием адаптированных к новым эколого-экономическим условиям технологий.

Локализация ресурсов в сложных геодинамических условиях повышает важность учета рисков при разработке месторождений.

Риски минимизируют методом мониторинга производственных процессов с использованием возможностей рудничной геофизики с построением математических моделей горных работ на основе обработки керна, каротажа, разгрузки напряжений, реперов сдвижения, моделирования и др.

Повышение безопасности горных работ и качества руд с минимизацией ущерба окружающей среде обеспечивается использованием комплекса геофизических методов на всех стадиях добычи и переработки минерального сырья.

Литература

1. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 2. – С. 68–76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-2-68-76.
2. Адигамов А.Э., Юденков А.В. Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 8. – С. 93–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93.
3. Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Архиреева И.Г., Дадтеева Э.В. Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината // Геология и геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. № 1. – С. 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001.
4. Гладков И.В., Якунчиков Е.Н., Румянцев А.Е., Соннов М.А. Моделирование влияния открытых горных работ на состояние подстилающего массива горных пород при планировании подземных горных работ с использованием пакета программного обеспечения CAE Fidesys // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С. 165–172. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-165-172.
5. Голик В.И. Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации // Обогащение руд. – 2010. – № 5. – С. 38–40.
6. Голик В.И., Кукарцев В.А., Панфилова Т.А., Тынченко В.С., Конюхов В.Ю. К механохимической активации процессов выщелачивания в дезинтеграторе // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11-1. – С. 175–189. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_175.

7. Голик В.И. Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской геологической провинции // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002.

8. Голик В.И. Геофизический контроль инновационных технологий разработки рудных месторождений Северной Осетии // Геология и геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. № 2. – С. 45–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001.

9. Дарбинян Т.П., Цымбалов А.А., Зубов В.П., Колганов А.В. Влияние трещиноватости массива горных пород на разубоживание вкрапленной медно–никелевой руды рудника «Октябрьский» // Горный журнал. – 2023. – № 6. – С. 19–25. DOI: 10.17580/gzh.2023.06.03.

10. 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.

11. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. Комплексный анализ генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов Джезказганского месторождения // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. № 3(41). – С. 321–330. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-3-321-330.

12. Мухаметшин В.Ш., Гилязетдинов Р.А., Садуакасов Д.С., Бакиева А.Б. Алгоритм выбора скважин-кандидатов для зарезки боковых стволов в условиях неопределенности геолого-промысловой информации // Геология и геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. № 2. – С. 160–172. DOI: 10.46698/VNC.2026.25.10.001.

13. Aras A.M. Sustainable mining: A review of current practices and future directions // Resources. Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 162. – Art. No. 104868. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104868.

14. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods // Underground Space. – 2022. – Vol. 7. Issue 4. – pp. 577–607.

15. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Dmitrak Yu.V. Analysis of hazardous processes in the natural-industrial system // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. London: Taylor and Francis Group, 2021. – pp. 422–429. DOI: 10.1201/9781003164395.

16. Cobian J.C., Bautista M.M., Bar N., Hammah R. 3d limit equilibrium analysis and risk appraisal of Hondo waste rock stockpile designs // Rocscience Africa Conference, 2022. – 10 p.

17. Hou Z., Yang K., Li Y., Gao W., Wang S., Ding X., Li Y. Dynamic prediction model of mining subsidence combined with D-InSAR technical parameter inversion // Environmental Earth Sciences. – 2022. – Vol. 81. Issue 11. – Art. No. 307. DOI: 10.1007/s12665-022-10423-8.

18. Kongar-Syuryun Ch., Klyuev R., Golik V., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of sustainable development of georesources as a way to reduce urban vulnerability // Urban Science. – 2024. – Vol. 8. No. 2. – Art. No. 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.

19. Vysotin N.G., Eremenko V.A., Kosyreva M.A. Experience of geotechnical core logging of borehole environment: a case-study of carbonate rocks // Eurasian Mining. – 2024. – No. 2. – pp. 33–37. DOI: 10.17580/em.2024.02.07.

20. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I., Yakonovsky P.A. Assessment of applying VLF geophysical method to determine the peat deposit thickness // Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 5. No. 3. – pp. 224–234. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-224-234.

References

1. Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Empirical techniques for assessing rock mass condition. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal. 2022. No. 2. pp. 68–76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-2-68-76. (In Russ.)

2. Adigamov A.E., Yudenkov A.V. Stress-strain behavior model of disturbed rock mass with regard to anisotropy and discontinuities. Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2021. No. 8. pp. 93–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93. (In Russ.)

3. Alborov I.D., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Dadteeva E.V. Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case study. Geology and Geophysics of Russian South. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001. (In Russ.)

4. Gladkov I.V., Yakunchikov E.N., Rumyantsev A.E., Sonnov M.A. Modeling the impact of surface mining operations on the condition of the underlying rock mass when planning underground mining operations using the CAE Fidesys software suite. *Russian Mining Industry*. 2024. No. 4. pp. 165–172. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-165-172. (In Russ.)
5. Golik V.I. Extraction of metals from enrichment tailings by combined activation methods. *Ore processing*. 2010. No. 5. pp. 38–40. (In Russ.)
6. Golik V.I., Kukartsev V.A., Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Konyukhov V.Yu. The mechanochemical activation of leaching processes in a disintegrator. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2023. No. 11-1. pp. 175–189. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_175. (In Russ.)
7. Golik V.I. Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002. (In Russ.)
8. Golik V.I. Geophysical monitoring of innovative technologies for the development of ore deposits in North Ossetia. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 2. pp. 45–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001. (In Russ.)
9. Darbinyan T.P., Tsymbalov A.A., Zubov V.P., Kolganov A.V. Impact of rock mass jointing on dilution of disseminated copper-nickel ore in Oktyabrsky mine. *Mining Journal*. 2023. No. 6. pp. 19–25. DOI: 10.17580/gzh.2023.06.03. (In Russ.)
10. 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.)
11. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V. Complex analysis of genetic features of mineral substance and technological properties of useful components of Dzhezkazgan deposit. *Sustainable Development of Mountain territories*. 2019. Vol. 11. No. 3(41). pp. 321–330. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-3-321-330. (In Russ.)
12. Mukhametshin V.Sh., Gilyazetdinov R.A., Saduakassov D.S., Bakiyeva A.B. Algorithm for selecting candidate wells for sidetracking under conditions of uncertain geological and field data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 2. pp. 160–172. DOI: 10.46698/VNC.2026.25.10.001. (In Russ.)
13. Aras A.M. Sustainable mining: A review of current practices and future directions. *Resources. Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 162. Art. No. 104868. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104868.
14. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space*. 2022. Vol. 7. Issue 4. pp. 577–607.
15. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Dmitrak Yu.V. Analysis of hazardous processes in the natural-industrial system. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. London: Taylor and Francis Group. 2021. pp. 422–429. DOI: 10.1201/9781003164395.
16. Cobian J.C., Bautista M.M., Bar N., Hammah R. 3d limit equilibrium analysis and risk appraisal of Hondo waste rock stockpile designs. *Rocscience Africa Conference*. 2022. 10 p.
17. Hou Z., Yang K., Li Y., Gao W., Wang S., Ding X., Li Y. Dynamic prediction model of mining subsidence combined with D-InSAR technical parameter inversion. *Environmental Earth Sciences*. 2022. Vol. 81. Issue 11. Art. No. 307. DOI: 10.1007/s12665-022-10423-8.
18. Kongar-Syuryun Ch., Klyuev R., Golik V., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of sustainable development of georesources as a way to reduce urban vulnerability. *Urban Science*. 2024. Vol. 8. No. 2. Art. No. 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.
19. Vysotin N.G., Eremenko V.A., Kosyrev M.A. Experience of geotechnical core logging of borehole environment: a case-study of carbonate rocks. *Eurasian Mining*. 2024. No. 2. pp. 33–37. DOI: 10.17580/em.2024.02.07.
20. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I., Yakonovsky P.A. Assessment of applying VLF geophysical method to determine the peat deposit thickness. *Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 5. No. 3. pp. 224–234. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-224-234.

УДК 550.8:004.8:550.34

DOI: 10.46698/VNC.2026.56.66.001

Оригинальная статья

Система прогнозирования зон повышенного геодинамического риска на основе комплексного анализа геофизических полей

Д.Ю. Евсюков^{1,2}, Б.В. Потапов², А.В. Бабкина²,
М.В. Журавлёв², Н.С. Мигда³

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

² Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, e-mail: potapov@rgau-msha.ru, babkina@rgau-msha.ru, zyravlev@rgau-msha.ru;

³ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: n.chebanova@bk.ru

Статья поступила: 14.06.2026, доработана: 07.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Территории Юга России и Северного Кавказа характеризуются сложным разломно-блоковым строением, выраженной сейсмичностью, расчлененным рельефом и развитием опасных природных и природно-техногенных процессов. Поэтому прогнозирование зон геодинамического риска требует комплексной обработки разнородных геофизических, геолого-структурных и геоинформационных данных. **Цель исследования.** Разработать подход к прогнозированию зон повышенного геодинамического риска на основе комплексного анализа геофизических полей и интеллектуальной обработки пространственных данных. **Методы исследования.** Использованы каталоги сейсмических событий, карты активных разломов, гравитационные и магнитные аномалии, цифровые модели рельефа, данные дистанционного зондирования, морфометрические параметры и ГИС-слои. Для обработки применялись Random Forest, градиентный бустинг и сверточный нейросетевой анализ многоканальных растровых матриц. Оценка выполнялась по значимости признаков, совпадению расчетных зон с известными проявлениями геодинамической активности и геолого-геофизической интерпретируемости карт. **Результаты.** Наиболее значимыми факторами оказались расстояние до активных разломов, плотность сейсмических событий, горизонтальный градиент гравитационного поля, уклон рельефа и плотность линейных элементов; их вклад составил 63–71%. Выделены зоны низкого, умеренного, повышенного и высокого риска. Около 28% территории отнесено к повышенному и высокому классам; совпадение с известными проявлениями активности составило около 76%. Подход применим для геодинамического районирования и выбора участков детального мониторинга.

Ключевые слова: геодинамический риск, геофизические поля, Северный Кавказ, искусственный интеллект, машинное обучение, разломные зоны, сейсмическая активность, гравитационные аномалии, геоинформационное моделирование, районирование территории.

Для цитирования: Евсюков Д.Ю., Потапов Б.В., Бабкина А.В., Журавлёв М.В., Мигда Н.С. Система прогнозирования зон повышенного геодинамического риска на основе комплексного анализа геофизических полей. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.56.66.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.56.66.001

Original paper

System for predicting areas of elevated geodynamic risk based on integrated analysis of geophysical fields

D.Yu. Evsyukov^{1,2}, B.V. Potapov², A.V. Babkina²,
M.V. Zhuravlev², N.S. Migda³

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

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

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

Received: 14.06.2026, revised: 07.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The territories of Southern Russia and the North Caucasus are characterized by a complex fault-block structure, pronounced seismicity, dissected terrain, and hazardous natural and natural-technogenic processes. Therefore, prediction of geodynamic risk zones requires integrated processing of heterogeneous geophysical, geological-structural, and geoinformation data. **Aim of the study.** The study aims to develop an approach for predicting areas of elevated geodynamic risk based on integrated analysis of geophysical fields and intelligent processing of spatial data. **Research methods.** Seismic event catalogues, active fault maps, gravity and magnetic anomalies, digital elevation models, remote sensing data, morphometric parameters, and GIS layers were used. Random Forest, gradient boosting, and convolutional neural network analysis of multichannel raster matrices were applied. The results were evaluated by predictor importance, spatial correspondence between calculated zones and known manifestations of geodynamic activity, and geological-geophysical interpretability of the maps. **Results.** The most significant factors were distance to active faults, seismic event density, horizontal gradient of the gravity field, slope angle, and lineament density; their contribution reached 63–71%. Zones of low, moderate, elevated, and high risk were identified. About 28% of the territory was assigned to elevated and high-risk classes, while correspondence with known manifestations of geodynamic activity reached about 76%. The approach is applicable to geodynamic zoning and selection of areas for detailed monitoring.

Keywords: geodynamic risk, geophysical fields, North Caucasus, artificial intelligence, machine learning, fault zones, seismic activity, gravity anomalies, geoinformation modeling, territorial zoning.

For citation: Evsyukov D.Yu., Potapov B.V., Babkina A.V., Zhuravlev M.V., Migda N.S. System for predicting areas of elevated geodynamic risk based on integrated analysis of geophysical fields. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.56.66.001

Введение

Оценка и прогнозирование геодинамического риска особенно важны для Юга России и Северного Кавказа, где сочетаются сложное тектоническое строение, выраженная сейсмичность и опасные геологические процессы [Fomina et al., 2016]. В пределах небольшой территории здесь представлены активные разломы, горный и предгорный рельеф, зоны современной деформации, плотное расселение и хозяйственная инфра-

структура [Константинов, Рассказов, 2024]. Поэтому даже умеренные геодинамические проявления могут иметь серьезные последствия [Karshyga et al., 2022], а выявление зон повышенного риска становится важной научной и практической задачей [Заалишвили и др., 2024].

Традиционно геодинамическую опасность оценивали по отдельным группам данных: сейсмологическим наблюдениям, структурным картам, гравиметрическим, магнитометрическим, геодезическим и экзогенным показателям [Asok et al., 2025]. Однако такой подход не всегда отражает взаимосвязь геофизических полей и состояния геологической среды [Seely et al., 2024]. Повышенная сейсмичность может быть связана не только с плотностью эпицентров, но и с активными разломами, гравитационными аномалиями, напряженным состоянием массива, строением фундамента и вертикальными движениями [Didmanidze et al., 2025]. Раздельный анализ факторов может занижать или завышать риск [Татаринцев и др., 2026].

В последние годы для таких задач все шире применяются методы интеллектуального анализа данных [Ghimire et al., 2024]. Они позволяют учитывать сложную структуру геофизических полей [Азаров и др., 2026] и рассматривать риск как результат совместного проявления многих факторов [Толеубекова и др., 2025]. При этом ИИ должен использоваться не вместо геологической интерпретации, а как инструмент выделения и проверки вероятных зон риска [Dyszko, 2024].

Наиболее перспективен комплексный анализ, объединяющий данные о сейсмичности, гравитационных и магнитных аномалиях, рельефе, разломах и современных движениях земной коры [Yelemessov et al., 2026]. Он позволяет строить интегральную схему геодинамического риска [Оборин и др., 2025], что особенно важно для районов пересечения разломов, границ тектонических блоков и резких изменений геофизических характеристик [Макеев и др., 2023]. В горных районах Кавказа риск проявляется также через оползни, обвалы, сели и деформации склонов [Osanova et al., 2025].

Несмотря на развитие сейсмического районирования и геофизического картирования, интеллектуальный прогноз зон повышенного геодинамического риска остается недостаточно разработанным [Zaalishvili et al., 2024]. Сложность связана с различной точностью, масштабом и природой исходных данных [Khoshouei et al., 2025], а также с неодинаковой значимостью факторов в разных геологических условиях [Garcia et al., 2025].

Цель работы – разработать подход к прогнозированию зон повышенного геодинамического риска на основе интеллектуальной обработки и комплексного анализа геофизических полей. Такой подход может применяться для геодинамического районирования, планирования мониторинга, оценки устойчивости территорий и выбора участков детальных геолого-геофизических исследований.

Методы и материалы

В основу исследования положен комплексный анализ геофизических полей, при котором территория рассматривается как совокупность сейсмических, геолого-структурных, геоморфологических и ГИС-параметров. Использовались материалы по Северному Кавказу и предгорным районам: каталоги сейсмических событий магнитудой 1,5–6,0, глубины гипоцентров, плотность эпицентров на сетках 5×5 и 10×10 км, цифровые модели рельефа 30 м, карты уклонов, экспозиции, эрозионной сети, слои активных и предполагаемых разломов, а также магнитные, гравитационные, геологические, оптические и радиолокационные данные Landsat 8/9, Sentinel-2 и Sentinel-1.

Обработка включала приведение данных к WGS 84 / UTM zone 38N и 39N, обрезку по границам территории и построение расчетной сетки. По ЦМР рассчитывались

уклон, кривизна, относительное превышение, топографическая влажность и расчлененность рельефа. Для разломов определялись расстояние до ближайшего разлома, плотность в окнах 3×3 и 5×5 км и узлы пересечения линеаментов. Сейсмические данные анализировались с учетом плотности, глубинного распределения и повторяемости событий.

Для уточнения отдельных участков применялись GNSS-наблюдения, БПЛА-съемка с построением ортофотопланов 3–7 см/пиксель, малогабаритные сейсмические регистраторы, трехкомпонентные геофоны, магнитометры и электротомографические комплексы. Вычисления выполнялись на рабочих станциях с 64–128 ГБ ОЗУ и GPU NVIDIA.

Программная обработка проводилась в QGIS, ArcGIS Pro, Python и MATLAB с использованием GDAL, Rasterio, GeoPandas, NumPy, SciPy, Scikit-learn, PyTorch и XGBoost. Растровые слои приводились к ячейке 100×100 м для регионального анализа и 25×25 м для локальных участков. Выделялись четыре класса риска: низкий, умеренный, повышенный и высокий. Для снижения переобучения территория делилась не только случайно, но и по пространственным блокам.

Основными алгоритмами были Random Forest, градиентный бустинг и CNN для многоканальных растровых матриц. Входные каналы включали рельеф, уклон, гравитационное и магнитное поле, плотность землетрясений, расстояние до разломов и плотность линеаментов. Качество оценивалось по accuracy, F1-score, ROC-AUC и матрице ошибок, а итоговые зоны риска дополнительно сопоставлялись с геолого-тектонической схемой, разломами и известными геодинамическими проявлениями.

Результаты и обсуждение

В результате комплексной обработки геофизических и пространственных материалов была сформирована система признаков, позволяющая рассматривать территорию как единую геодинамически активную среду. Были построены растровые слои сейсмичности, гравитационных и магнитных аномалий, плотности разломов, уклонов, относительных превышений и расчлененности рельефа. Визуальное сопоставление показало, что зоны риска не совпадают с одним фактором, а формируются при сочетании сгущения сейсмических событий, повышенных градиентов геофизических полей, близости к разломам и сложного горного рельефа.

Анализ сейсмичности показал концентрацию событий в горной части и на переходе к предгорным впадинам. На сетке 10×10 км плотность эпицентров возрастала от фоновых 0,2–0,6 до 3–6, а в отдельных узлах до 8–10 событий. Гипоцентры чаще располагались на глубинах 5–25 км. Особый интерес представляли цепочки слабых событий вдоль предполагаемых разломов. Наиболее информативным гравитационным показателем стал горизонтальный градиент поля: в фоновых зонах он составлял 0,15–0,35, а в участках, совпадающих с разломами и сейсмическими зонами, возрастал до 0,62–0,84. Магнитные аномалии имели меньший вес, поскольку не всегда были связаны с современными деформациями.

Геоморфологический анализ показал рост риска при уклонах более 18–22°, особенно вблизи разломов и речных долин. В горных районах важным оказался индекс расчлененности рельефа, связанный с условиями развития оползней, обвалов и селей. После объединения признаков территория была разделена на четыре класса риска: низкий – 38%, умеренный – 34%, повышенный – 20%, высокий – 8%. Высокий риск приурочен к зонам наложения нескольких факторов: повышенной плотности эпицентров, расстоянию до активных разломов менее 2–3 км, уклонам более 15–20° и высоким градиентам геофизических полей (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Распределение территории исследования по классам прогнозируемого
геодинамического риска /
Distribution of the study area by classes of predicted geodynamic risk**

Класс геодинамического риска / Class of geodynamic risk	Доля площади территории, % / Share of the territory area, %	Основные диагностические признаки / Main diagnostic features	Геолого-геофизическая интерпретация / Geological and geophysical interpretation
Низкий / Low	38	Низкая плотность сейсмических событий, удаленность от активных разломов более 8–10 км, слабые градиенты гравитационного и магнитного полей, уклоны обычно менее 7–10° / Low density of seismic events, distance from active faults of more than 8–10 km, weak gradients of gravity and magnetic fields, slopes usually less than 7–10°	Относительно стабильные блоки земной коры, где не отмечается выраженного сочетания сейсмических, структурных и геоморфологических факторов риска / Relatively stable crustal blocks where no pronounced combination of seismic, structural, and geomorphological risk factors is observed
Умеренный / Moderate	34	Единичные сейсмические события, расстояние до разломов 4–8 км, средние значения геофизических градиентов, умеренная расчлененность рельефа / Isolated seismic events, distance to faults of 4–8 km, medium values of geophysical gradients, moderate terrain dissection	Переходные зоны, в которых отдельные признаки геодинамической активности проявлены, но не образуют устойчивого комплекса опасных факторов / Transitional zones where individual signs of geodynamic activity are present but do not form a stable complex of hazardous factors
Повышенный / Increased	20	Увеличенная плотность эпицентров, близость к разломам 2–4 км, повышенные значения градиента гравитационного поля, уклоны 12–18°, высокая плотность линейamentов / Increased density of epicenters, proximity to faults of 2–4 km, elevated gravity-field gradient values, slopes of 12–18°, high density of lineaments	Участки возможной современной активизации разломно-блоковых границ, где вероятно развитие сейсмических и вторичных склоновых процессов / Areas of possible recent activation of fault-block boundaries where seismic and secondary slope processes are likely to develop
Высокий / High	8	Плотность эпицентров выше среднего уровня, расстояние до активных разломов менее 2–3 км, уклоны более 15–20°, резкая смена гравитационного поля, узлы пересечения линейamentов / Epicenter density above the average level, distance to active faults of less than 2–3 km, slopes greater than 15–20°, sharp changes in the gravity field, lineament intersection nodes	Наиболее напряженные зоны, где совмещаются сейсмические, тектонические, геофизические и геоморфологические признаки повышенного геодинамического риска / The most stressed zones where seismic, tectonic, geophysical, and geomorphological indicators of increased geodynamic risk are combined

Сравнение разных алгоритмов показало, что наиболее устойчивые результаты были получены при использовании ансамблевых методов. Модель Random Forest дала общую точность 0,81 и F1-score для класса высокого риска 0,74. Градиентный бустинг показал несколько более высокую точность, около 0,84, и лучше разделял повышенный

и высокий риск, но был более чувствителен к составу обучающей выборки. Сверточная нейронная сеть позволила лучше учитывать пространственный контекст, особенно на локальных участках, где важны не только значения признаков в одной ячейке, но и конфигурация окружающих зон. Для нее итоговая точность составила около 0,86, а ROC-AUC для бинарного разделения «высокий риск – остальные классы» достигал 0,89 (табл. 2). Однако при этом нейросетевая модель оказалась менее удобной для прямой геологической интерпретации, поэтому в качестве основной для объяснения результатов была использована комбинация градиентного бустинга и анализа важности признаков. Такой вариант выглядит более разумным, потому что для геофизической статьи важно не только получить точную карту, но и понятно объяснить, почему именно эти участки выделены как опасные.

Таблица 2 / Table 2

**Сравнение качества интеллектуальных моделей прогнозирования зон
геодинамического риска /
Comparison of the quality of intelligent models for predicting geodynamic risk zones**

Использованный алгоритм / Algorithm used	Общая точность / Overall accuracy	F1-score для класса высокого риска / F1-score for the high-risk class	ROC-AUC / ROC-AUC	Особенности результата / Result features
Random Forest / Random Forest	0.81	0.74	0.84	Дал устойчивую классификацию основных зон риска, хорошо показал вклад отдельных факторов, но несколько сглаживал границы между повышенным и высоким риском / Provided stable classification of the main risk zones, clearly demonstrated the contribution of individual factors, but somewhat smoothed the boundaries between increased and high risk
Градиентный бустинг / Gradient boosting	0.84	0.78	0.87	Лучше разделил классы повышенного и высокого риска, показал высокую чувствительность к сочетанию сейсмических и разломных признаков, удобен для геологической интерпретации / Better separated the increased- and high-risk classes, showed high sensitivity to the combination of seismic and fault-related features, and is convenient for geological interpretation
Сверточная нейронная сеть / Convolutional neural network	0.86	0.81	0.89	Лучше учитывала пространственный контекст и форму опасных зон, особенно на локальных участках, но хуже объясняется с позиции прямой геофизической интерпретации / Better accounted for spatial context and the shape of hazardous zones, especially in local areas, but is less explainable from the standpoint of direct geophysical interpretation
Комбинированная модель / Combined model	0.87	0.82	0.90	Обеспечила наиболее сбалансированный результат за счет объединения ансамблевой классификации и пространственного анализа многоканальных растровых данных / Provided the most balanced result by combining ensemble classification with spatial analysis of multichannel raster data

Анализ значимости факторов показал, что наибольший вклад в прогноз внесли расстояние до активных разломов, плотность сейсмических событий, модуль горизонтального градиента гравитационного поля, уклон рельефа и плотность линеаментов. Их

суммарный вклад в разных вариантах модели составлял от 63 до 71%. Менее значимыми, но все же полезными оказались магнитные аномалии, относительное превышение, кривизна поверхности и данные о современных вертикальных движениях. Интересно, что отдельные признаки, которые при самостоятельном рассмотрении выглядят достаточно слабыми, в совокупности с другими резко повышали качество прогноза. Например, магнитное поле само по себе не всегда позволяло выделить опасные участки, но при совместном использовании с разломной сетью и гравитационным градиентом помогало уточнить положение глубинных структурных границ. То же самое можно сказать о рельефе: высокий уклон еще не означает высокий геодинамический риск, но если он совпадает с зоной тектонической нарушенности, то вероятность опасных проявлений возрастает весьма заметно.

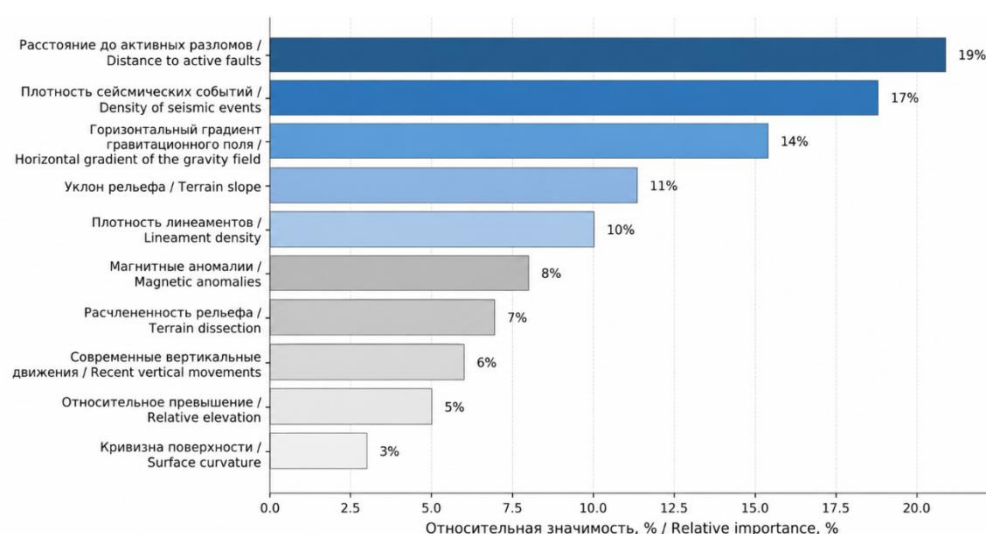


Рис. 1. Значимость факторов при прогнозировании зон повышенного геодинамического риска /
Fig. 1. The significance of factors in predicting areas of increased geodynamic risk

Проверка построенной карты риска по известным проявлениям геодинамической активности показала достаточно хорошее совпадение (рис. 1). Около 76% известных участков активных склоновых деформаций и зарегистрированных сейсмических проявлений попали в зоны повышенного и высокого риска. Если учитывать еще и умеренный риск, то доля совпадений возрастает до 88–90%, но такой показатель уже менее показателен, так как умеренный класс занимает большую площадь и частично включает переходные территории. Наиболее убедительное совпадение было получено для участков, расположенных вблизи узлов пересечения разломов и вдоль границ крупных тектонических блоков. Здесь модель выделяла вытянутые полосы риска, которые хорошо согласуются с геолого-структурной схемой района. В то же время были и расхождения. Некоторые участки, известные по отдельным локальным проявлениям, получили только умеренный риск. Это может быть связано с недостаточной детальностью исходных данных, с неполнотой каталога событий малых магнитуд или с тем, что локальный процесс имеет преимущественно инженерно-геологическую, а не регионально-геодинамическую природу.

Полученные результаты показывают, что интеллектуальная система может использоваться как инструмент предварительного районирования, но не как окончательная замена детальному полевому обследованию. Это особенно важно подчеркнуть, так как модели машинного обучения иногда дают внешне очень убедительную карту, но без проверки по геологической логике она может быть ошибочной. В данной работе наиболее надежными следует считать те зоны, где расчетный высокий риск подтвержда-

ется сразу несколькими независимыми признаками: сейсмичностью, разломной тектоникой, геофизическими градиентами и морфологией рельефа. Если же высокий риск формируется только за счет одного фактора, то такие участки требуют дополнительной проверки. Например, сильный уклон рельефа может указывать на склоновую опасность, но не обязательно на повышенную геодинамическую активность. Точно так же локальная магнитная аномалия может быть связана с составом пород, а не с современной тектонической активностью.

С практической точки зрения наиболее важным результатом является выделение участков, где целесообразно размещать дополнительные пункты мониторинга. Для таких зон можно рекомендовать более плотные GNSS-наблюдения, повторную беспилотную съемку, локальную сейсмическую регистрацию, электротомографические профили и периодическое сравнение цифровых моделей рельефа. Особенно это относится к территориям, где высокие расчетные значения риска совпадают с населенными пунктами, дорожной сетью, трубопроводами, гидротехническими сооружениями или районами интенсивного строительства. При этом интеллектуальная модель может обновляться по мере поступления новых данных, что делает ее не статической картой, а основой для развивающейся системы геодинамического мониторинга. Если в модель включать новые сейсмические события, данные спутниковой интерферометрии и результаты повторных GNSS-измерений, то можно перейти от общей оценки риска к более оперативному контролю изменения состояния территории.

Следует также отметить ограничения выполненной работы. Главным ограничением является различная точность исходных материалов. Сейсмические каталоги за разные годы могут иметь неодинаковую полноту, геофизические карты часто построены в разных масштабах, а разломные схемы не всегда одинаково детализированы по всей территории. Кроме того, для части опасных процессов отсутствует единая база наблюдений, из-за чего обучающая выборка может быть смещена в сторону лучше изученных районов. Это особенно характерно для горных территорий, где доступность полевых наблюдений ограничена, а многие локальные деформации фиксируются уже после их активного проявления. Поэтому полученная карта должна рассматриваться как вероятностная, а не как абсолютно точное отображение будущих событий. Тем не менее, даже в таком виде она позволяет существенно сузить круг территорий, требующих первоочередного внимания.

В целом результаты исследования подтверждают, что комплексный анализ геофизических полей в сочетании с интеллектуальными алгоритмами дает возможность более обоснованно выделять зоны повышенного геодинамического риска. Наиболее ценной стороной такого подхода является учет нелинейного взаимодействия факторов, которое плохо выявляется при традиционном послойном анализе. Для условий Юга России и Северного Кавказа это особенно актуально, поскольку опасность здесь формируется не одним процессом, а сложным сочетанием сейсмичности, разломной активности, рельефа, глубинного строения и современных деформаций. Полученная система не решает полностью задачу прогноза геодинамических событий, так как такой прогноз всегда имеет большую неопределенность, но она дает рабочий инструмент для ранжирования территории, планирования мониторинга и принятия предварительных инженерно-геологических решений. Именно в этом, на наш взгляд, состоит основное значение выполненного исследования.

Как видно из рисунка 2, большая часть территории относится к низкому и умеренному классам риска, однако около 28% площади характеризуется повышенными и высокими значениями прогнозируемой геодинамической опасности. Именно эти участки требуют более детальной проверки, так как в их пределах происходит совмещение нескольких неблагоприятных факторов: близости к активным разломам, повышенной

плотности сейсмических событий, резких градиентов геофизических полей и усложненных параметров рельефа.



Рис. 2. Распределение площади исследуемой территории по классам прогнозируемого геодинамического риска, полученное по результатам комплексного анализа сейсмических, геофизических, геоморфологических и структурно-тектонических признаков /

Fig. 2. Distribution of the area of the study territory by classes of predicted geodynamic risk, obtained from the results of a comprehensive analysis of seismic, geophysical, geomorphological and structural-tectonic features

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показали, что интеллектуальная система эффективна для прогнозирования зон повышенного геодинамического риска на территориях со сложным геолого-тектоническим строением. Наиболее информативным оказался не один фактор, а их сочетание: плотность сейсмических событий, близость к активным разломам, горизонтальный градиент гравитационного поля, плотность линеаментов и параметры рельефа.

Комплексная обработка геофизических и пространственных данных позволила выделить четыре класса риска: низкий, умеренный, повышенный и высокий. Около 28% территории относится к повышенному и высокому риску. Эти участки приурочены к зонам разломно-блокового строения, пересечениям линеаментов, областям повышенной сейсмичности и резким изменениям геофизических полей.

Сравнение алгоритмов показало, что наилучшие результаты дают модели, учитывающие как значения признаков, так и их пространственное положение. Random Forest и градиентный бустинг хорошо подходят для оценки вклада факторов, а сверточная нейронная сеть точнее анализирует многоканальные растровые данные, но требует дополнительной геологической интерпретации.

Проверка по известным проявлениям геодинамической активности показала хорошее совпадение расчетных зон с участками сейсмических событий, активных разломов и склоновых деформаций. Наиболее надежны зоны, где высокий риск подтверждается несколькими независимыми признаками. Если риск связан только с одним параметром, то такой участок требует дополнительной проверки.

Практическое значение подхода связано с предварительным районированием, выбором участков детального мониторинга и планированием инженерно-геологических

исследований. Система может дополняться новыми сейсмическими, GNSS, БПЛА и спутниковыми данными и использоваться как обновляемая основа регионального геодинамического мониторинга.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В., Сердюк И.М. Исследование возможностей пассивного сейсмического мониторинга при решении задачи контроля состояния подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 142–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_142.
2. 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. – 2024. – Т. 16. № 1. – С. 345–357. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-345-357.
3. Константинов А.В., Рассказов И.Ю. Разработка комплекса нейросетевых моделей для идентификации типа источника акустического излучения на удароопасном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 23–36. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_23.
4. Макеев В.М., Камболов Д.А., Ревазов М.О., Пикулик Е.А. Неотектоника и геодинамика зоны сочленения Северо-Западного Кавказа и Черноморской впадины (район г. Геленджика) // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 4. – С. 995–1006. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-995-1006.
5. Оборин А.В., Батугин А.С., Диваков В.И., Хотченков Е.В., Степанова А.Д. Исследование геодинамического состояния массива в районе расположения ПХГ методом газовой томографии (на примере Волгоградского ПХГ) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 73–89. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_73.
6. Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Лебедева Л.В. Оценка экологической реакции пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) на воздействие разных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94.
7. Толеубекова Ж.З., Тиреуов К.М., Курмангалиева З.Н., Татаринцев В.Л. Экологическая реакция сельскохозяйственных культур на условия выращивания как основа управления устойчивостью агроландшафтов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712.
8. Asok M.A., Pandi V.S., Yuvaraj N., Supriya S., Joseph A.S.K., Thiyaagu T.M. Employing artificial intelligence and machine learning to create adaptive models for improved predictive accuracy in dynamical real-world applications // In: 2025 3rd International Conference on Communication, Security, and Artificial Intelligence, ICCSAI 2025. – 2025. – pp. 1172–1177. DOI: 10.1109/ICCSAI64074.2025.11063797.
9. Didmanidze O.N., Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Serdechnyy D.V. Application of artificial intelligence and modern technologies in geomonitoring to improve the efficiency of the mining industry utilising the Earth's resources // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2025. – No. 2. – pp. 84–96. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.492.
10. Dyczko A. The perspective of using neural networks and machine learning algorithms for modelling and forecasting the quality parameters of coking coal – a case study // Geosciences. – 2024. – Vol. 14. No. 8. – Art. No. 199. DOI: 10.3390/geosciences14080199.
11. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 86. – Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
12. Garcia A., Saez Y., Harris I., Huang X., Collado E. Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies // Artificial Intelligence Review. – 2025. – Vol. 58. No. 9. – Art. No. 275. DOI: 10.1007/s10462-025-11277-9.
13. Ghimire S., Deo R.C., Casillas-Perez D., Salcedo-Sanz S., Pourmousavi S.A., Acharya U.R. Probabilistic-based electricity demand forecasting with hybrid convolutional neural network-extreme learning machine model // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 132. – Art. No. 107918. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.107918.

14. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica // *Metals*. – 2022. – Vol. 12. No. 12. – Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.
15. Khoshouei M., Bagherpour R., Jalalian M.H., Purhamadani E. An intelligent approach to predict the drilling penetration rate using acoustic emission technique (AET) // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. No. 1. – Art. No. 37457. DOI: 10.1038/s41598-025-21202-3.
16. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2025. – Vol. 17. No. 4. – pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
17. Seely A.J.E., Newman K., Ramchandani R., Herry C., Scales N., Hudek N., Brehaut J., Jones D., Ramsay T., Barnaby D., Fernando S., Perry J., Dhanani S., Burns K.E.A. Roadmap for the evolution of monitoring: developing and evaluating waveform-based variability-derived artificial intelligence-powered predictive clinical decision support software tools // *Critical Care*. – 2024. – Vol. 28. No. 1. – Art. No. 404. DOI: 10.1186/s13054-024-05140-6.
18. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. – 2026. – Vol. 2026. No. 3. – pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.
19. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Y., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media // *Geosciences*. – 2024. – Vol. 14. No. 4. – Art. No. 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.

References

1. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V., Serdyuk I.M. Capabilities of passive seismic monitoring for condition assessment of underground constructions. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026. No. 2. pp. 142–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_142. (In Russ.)
2. 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.)
3. Konstantinov A.V., Rasskazov I.Yu. Creation of neural network model package to identify acoustic emission sources at rockburst-hazardous deposits. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 11. pp. 23–36. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_23. (In Russ.)
4. Makeev V.M., Kambolov D.A., Revazov M.O., Pikulik E.A. Neotectonics and geodynamics of the joint zone of the Northwestern Caucasus and Black Sea depression (Gelendzhik Area). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 4. pp. 995–1006. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-995-1006. (In Russ.)
5. Oborin A.V., Batugin A.S., Divakov V.I., Khotchenkov E.V., Stepanova A.D. Gas tomography-based study of geodynamics in the area of underground gas storage: a case study of the Volgograd UGS. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025. No. 7. pp. 73–89. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_73. (In Russ.)
6. Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Lebedeva L.V. Assessment of the ecological reaction of soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to the effects of various factors. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026. Vol. 18. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94. (In Russ.)
7. Toleubekova Z.Z., Tireuov K.M., Kurmangalieva Z.N., Tatarintsev V.L. Ecological response of agricultural crops to growing conditions as a basis for managing the sustainability of agricultural landscapes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 2. pp. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712. (In Russ.)
8. Asok M.A., Pandi V.S., Yuvaraj N., Supriya S., Joseph A.S.K., Thiyagu T.M. Employing artificial intelligence and machine learning to create adaptive models for improved predictive accuracy in dynamical real-world applications. In: 2025 3rd International Conference on Communication,

Security, and Artificial Intelligence, ICCSAI 2025. 2025. pp. 1172–1177. DOI: 10.1109/ICCSAI64074.2025.11063797.

9. Didmanidze O.N., Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Martyshev N.V., Serdechnyy D.V. Application of artificial intelligence and modern technologies in geomonitoring to improve the efficiency of the mining industry utilising the Earth's resources. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2025. No. 2. pp. 84–96. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.492.

10. Dyczko A. The perspective of using neural networks and machine learning algorithms for modelling and forecasting the quality parameters of coking coal – a case study. Geosciences. 2024. Vol. 14. No. 8. Art. No. 199. DOI: 10.3390/geosciences14080199.

11. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.

12. Garcia A., Saez Y., Harris I., Huang X., Collado E. Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. Artificial Intelligence Review. 2025. Vol. 58. No. 9. Art. No. 275. DOI: 10.1007/s10462-025-11277-9.

13. Ghimire S., Deo R.C., Casillas-Perez D., Salcedo-Sanz S., Pourmousavi S.A., Acharya U.R. Probabilistic-based electricity demand forecasting with hybrid convolutional neural network-extreme learning machine model. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Vol. 132. Art. No. 107918. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.107918.

14. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica. Metals. 2022. Vol. 12. No. 12. Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.

15. Khoshouei M., Bagherpour R., Jalalian M.H., Purhamadani E. An intelligent approach to predict the drilling penetration rate using acoustic emission technique (AET). Scientific Reports. 2025. Vol. 15. No. 1. No. Art. 37457. DOI: 10.1038/s41598-025-21202-3.

16. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.

17. Seely A.J.E., Newman K., Ramchandani R., Herry C., Scales N., Hudek N., Brehaut J., Jones D., Ramsay T., Barnaby D., Fernando S., Perry J., Dhanani S., Burns K.E.A. Roadmap for the evolution of monitoring: developing and evaluating waveform-based variability-derived artificial intelligence-powered predictive clinical decision support software tools. Critical Care. 2024. Vol. 28. No. 1. Art. No. 404. DOI: 10.1186/s13054-024-05140-6.

18. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhap D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

19. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyshev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Y., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. Geosciences. 2024. Vol. 14. No. 4. Art. No. 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.

УДК 550.348:004.032.26

DOI: 10.46698/VNC.2026.95.50.001

Оригинальная статья

Применение сверточных нейронных сетей для автоматического выделения микросейсмических событий в данных локального мониторинга Северного Кавказа

В.В. Кукарцев^{1,2}, М.Н. Степанцевич², В.Т. Водяников²,
А.С. Прудкий², Г.Л. Козенкова³

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5,
e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru;

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

³ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Россия, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93,
e-mail: galleon56@mail.ru

Статья поступила: 05.06.2026, доработана: 25.08.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Северный Кавказ характеризуется сложным геологическим строением, неоднородным сейсмическим фоном и влиянием природных и техногенных помех, что затрудняет автоматическое выделение слабых микросейсмических событий. Традиционные пороговые алгоритмы не всегда надежно обнаруживают низкоамплитудные сигналы, особенно при малом отношении сигнал/шум. **Цель исследования.** Оценить возможность применения сверточных нейронных сетей для автоматического обнаружения микросейсмических событий в трехкомпонентных записях локального мониторинга Северного Кавказа и сопоставить их эффективность с алгоритмом STA/LTA. **Методы исследования.** Использованы цифровые трехкомпонентные сейсмограммы локальных станций, прошедшие приведение к единой частоте дискретизации, полосовую фильтрацию, нормализацию и разделение на временные окна. Для классификации событий и шумовых фрагментов применялась одномерная CNN, анализирующая временные ряды по трем компонентам. Эффективность оценивалась по accuracy, recall, F1-мере и числу ложных срабатываний в сравнении с STA/LTA. **Результаты.** Наиболее устойчивые результаты получены для трехкомпонентных записей, окна 20 с, частоты 100 Гц и фильтрации 1–20 Гц. CNN обеспечила accuracy 0,93–0,95, recall 0,91–0,92 и F1-меру 0,92–0,93. По сравнению с STA/LTA модель лучше сохраняла баланс полноты обнаружения и ложных тревог, особенно при отношении сигнал/шум ниже 2,0. Результаты подтверждают перспективность CNN как модуля первичного обнаружения в системах сейсмического мониторинга.

Ключевые слова: микросейсмические события, сверточные нейронные сети, сейсмический мониторинг, Северный Кавказ, STA/LTA, машинное обучение, сейсмические сигналы, геодинамический риск.

Для цитирования: Кукарцев В.В., Степанцевич М.Н., Водяников В.Т., Прудкий А.С., Козенкова Г.Л. Применение сверточных нейронных сетей для автоматического выделения микросейсмических событий в данных локального мониторинга Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.95.50.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.95.50.001

Original paper

Application of convolutional neural networks for automatic detection of microseismic events in local monitoring data of the North Caucasus

V.V. Kukartsev^{1,2}, M.N. Stepansevich², V.T. Vodyannikov²,
A.S. Prudkiy², G.L. Kozenkova³

¹ Bauman Moscow State Technical University, 5,
2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russian Federation,
e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru;

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

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University,
93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation,
e-mail: galleon56@mail.ru

Received: 05.06.2026, revised: 25.08.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The North Caucasus is characterized by a complex geological structure, a heterogeneous seismic background, and natural and anthropogenic noise, which complicate automatic detection of weak microseismic events. Traditional threshold-based algorithms do not always reliably detect low-amplitude signals, especially under low signal-to-noise conditions. **Aim of the study.** The study aims to evaluate the use of convolutional neural networks for automatic detection of microseismic events in three-component local monitoring records from the North Caucasus and to compare their performance with the STA/LTA algorithm. **Research methods.** Digital three-component seismograms from local stations were resampled to a common sampling rate, bandpass filtered, normalized, and divided into time windows. A one-dimensional CNN was used to classify events and noise fragments by analyzing three-component time series. Performance was evaluated using accuracy, recall, F1-score, and the number of false alarms in comparison with STA/LTA. **Results.** The most stable results were obtained for three-component records, a 20 s window, a 100 Hz sampling rate, and 1–20 Hz filtering. The CNN achieved an accuracy of 0.93–0.95, recall of 0.91–0.92, and F1-score of 0.92–0.93. Compared with STA/LTA, the model provided a better balance between detection completeness and false alarms, especially at signal-to-noise ratios below 2.0. The results confirm the promise of CNN as a primary detection module in seismic monitoring systems.

Keywords: microseismic events, convolutional neural networks, seismic monitoring, North Caucasus, STA/LTA, machine learning, seismic signals, geodynamic risk.

For citation: Kukartsev V.V., Stepansevich M.N., Vodyannikov V.T., Prudkiy A.S., Kozenkova G.L. Application of convolutional neural networks for automatic detection of microseismic events in local monitoring data of the North Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.95.50.001

Введение

Слабые землетрясения на Северном Кавказе трудно обнаруживать автоматически из-за сочетания сложного геологического строения, плотной заселенности предгорий,

транспортной инфраструктуры, антропогенных помех и зон повышенного геодинамического напряжения [Ghimire et al., 2024]. Региональные сети фиксируют много событий с магнитудами ниже $M_L=2,0$, а их амплитуда иногда превышает фоновый шум всего на 5–20% [Fomina et al., 2016], поэтому часть сигналов теряется при визуальном анализе и пороговой обработке.

Микросейсмические события важны для уточнения активности разломов, оценки перераспределения напряжений на глубинах 3–25 км, отслеживания локальных деформаций и временных изменений сейсмичности [Заалишвили и др., 2024; Азаров и др., 2024]. Это особенно значимо там, где крупные землетрясения редки, а геодинамические процессы проявляются сериями малых толчков [Федорова и др., 2025]. Однако непрерывная трехкомпонентная регистрация с частотой 50–200 Гц формирует архивы до 10^7 – 10^9 отсчетов, что требует надежного автоматического выделения событий [Азаров и др., 2026]. Для этой задачи перспективны сверточные нейронные сети (CNN). В отличие от STA/LTA, они учитывают не только амплитуду, но и форму вступления, частотный диапазон, длительность, соотношение трех компонент и частотно-временную структуру сигнала [Khoshouei et al., 2025; Martyushev et al., 2025; Толеубекова и др., 2025; Константинов, Рассказов, 2024]. Это важно для коротких событий 0,5–8,0 с при отношении сигнал/шум около 1,5, когда отдельный параметр не превышает порог, но совокупность признаков сохраняет сейсмическую природу. Основные факторы обнаружения слабых событий обобщены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Факторы, затрудняющие автоматическое обнаружение слабых землетрясений
на Северном Кавказе, и возможные решения на основе CNN /
Factors hindering automatic detection of weak earthquakes in the North Caucasus
and possible CNN-based solutions**

Направление анализа / Analysis area	Основная проблема / Main problem	Типичные значения / Typical values	Возможности CNN / CNN capabilities	Практическое значение / Practical significance
Слабые микросейсмические события / Weak microseismic events	Малая энергия и низкое отношение сигнал/шум затрудняют выделение событий / Low energy and a low signal-to-noise ratio make event detection difficult	$M_L < 2,0$; S/N 1,5–3; превышение фона 5–20% / $M_L < 2,0$; S/N 1.5–3; 5–20% above background level	Учитывает совокупность слабых признаков: форму волны, спектр и длительность / Accounts for a combination of weak features: waveform, spectrum, and duration	Снижается число пропущенных событий / The number of missed events is reduced
Природные и антропогенные помехи / Natural and anthropogenic noise	Транспорт, промышленные импульсы, ветер и низкочастотные колебания имитируют сейсмические сигналы / Traffic, industrial impulses, wind, and low-frequency oscillations mimic seismic signals	Импульсы 0,1–2,0 с; природный шум часто ниже 1–2 Гц / Impulses of 0.1–2.0 s; natural noise is often below 1–2 Hz	Отличает одиночный импульс от развивающейся волновой формы / Distinguishes a single impulse from an evolving waveform	Уменьшается число ложных срабатываний / The number of false detections is reduced
Региональные и станционные различия / Regional and station differences	Уровень шума и форма записей зависят от рельефа, грунтов, аппаратуры и геометрии наблюдений / Noise level and waveform depend on topography, ground conditions, equipment, and observation geometry	Гипоцентральные расстояния 5–150 км / Hypocentral distances of 5–150 km	Требует локального обучения и проверки по станциям / Requires local training and station-specific validation	Повышается переносимость модели в условиях Северного Кавказа / Model transferability under North Caucasus conditions is improved

Направление анализа / Analysis area	Основная проблема / Main problem	Типичные значения / Typical values	Возможности CNN / CNN capabilities	Практическое значение / Practical significance
Структура входных данных / Input data structure	Одноканальный и пороговый анализ теряют часть информации о событии / Single-channel and threshold-based analyses lose some event information	3 компоненты; окна 0,5–30 с; диапазон 1–40 Гц / 3 components; windows of 0.5–30 s; range of 1–40 Hz	Анализирует вертикальную и горизонтальные компоненты одновременно / Analyzes the vertical and horizontal components simultaneously	Повышается надежность классификации слабых событий / The reliability of weak-event classification is improved
Формирование и проверка модели / Model development and validation	«Чистая» выборка и случайное деление могут завышать качество / A 'clean' dataset and random splitting may overestimate performance	4000–10000 окон событий; деление 70:15:15; F1 > 0,90 / 4,000–10,000 event windows; 70:15:15 split; F1 > 0.90	Обучается на сложных примерах, проверяется по precision, recall и F1 / Is trained on difficult examples and evaluated using precision, recall, and F1	Метрики становятся ближе к реальной эксплуатации / Metrics become more representative of real-world operation
Практическое применение / Practical application	Ручная обработка больших архивов слишком трудоемка / Manual processing of large archives is excessively labor-intensive	50–200 Гц; архивы 10 ⁷ –10 ⁹ отсчетов / 50–200 Hz; archives containing 10 ⁷ –10 ⁹ samples	Предварительно выделяет кандидатов в непрерывном потоке / Preselects candidate events in a continuous data stream	Сокращает ручной анализ и сохраняет экспертный контроль / Reduces manual analysis while retaining expert oversight

Представленные данные показывают, что слабые землетрясения на Северном Кавказе трудно обнаруживать из-за одновременного действия геологических, технических и шумовых факторов. Простые пороговые методы полезны при четких одиночных событиях, но теряют устойчивость при низком отношении сигнал/шум, нестационарном фоне и большом числе антропогенных помех. В этих условиях CNN дает более гибкий подход: сеть анализирует не один показатель, а совокупность признаков, включая форму волны, частотный состав и согласованность трех компонент.

При этом CNN нельзя рассматривать как полностью автономную замену специалиста. Более обоснованная схема предполагает предварительное выделение кандидатов нейронной сетью и последующую экспертную проверку неоднозначных случаев. Такой подход сохраняет контроль качества каталога и одновременно сокращает объем ручной работы. Наибольшую практическую ценность он может дать в районах, где слабая сейсмичность в течение дней, недель или месяцев отражает перераспределение напряжений и деформации земной коры.

Методы и материалы

Почему сеть должна учиться именно на сейсмических событиях, а не на случайных особенностях отдельных станций? Для этого исходный массив формировали из цифровых записей локальных станций мониторинга Северного Кавказа и прилегающих предгорных территорий. Основной акцент сделали на слабых событиях, поскольку их амплитуда часто превышала фон всего в 1,2–2,5 раза. В таких условиях традиционные алгоритмы обнаружения могут пропускать часть микросейсмических сигналов или, наоборот, реагировать на короткие промышленные импульсы [Yelemessov et al., 2026].

Подготовка данных включала несколько последовательных этапов: приведение записей к единой частоте дискретизации, разделение непрерывного потока на временные окна, фильтрацию, нормализацию, разметку классов, формирование обучающей, вали-

дационной и тестовой выборок [Karanski et al., 2025]. Особое внимание уделяли тому, чтобы CNN не запоминала признаки отдельной станции или конкретного шумового интервала. Поэтому фрагменты одного события либо одного непрерывного участка направляли только в одну подгруппу данных.

Для обучения использовали одномерную трехкомпонентную CNN, которая напрямую обрабатывала временные ряды. Такой подход позволял учитывать не только вертикальный канал, но и две горизонтальные компоненты, где слабое событие иногда проявлялось заметнее. Методика подготовки данных, параметры модели и условия сравнения с STA/LTA приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Подготовка сейсмических данных, структура CNN и параметры
вычислительного эксперимента /
Seismic data preparation, CNN structure and computational experiment parameters**

Этап / Stage	Основные параметры / Main parameters	Назначение / Purpose
Исходные данные / Source data	Записи локальных станций Северного Кавказа; слабые события и фон/шум / Local station records from the North Caucasus; weak events and background/noise	Обучение модели на региональных условиях регистрации / Training under regional recording conditions
Подготовка сигналов / Signal preparation	3 компоненты; 100 Гц; окна 5, 10, 20 и 30 с; нормализация $[-1; 1]$ / Three components; 100 Hz; 5, 10, 20, and 30 s windows; normalization $[-1; 1]$	Приведение данных к единому формату и учет полной волновой формы / Data standardization and use of the complete waveform
Фильтрация и контроль качества / Filtering and quality control	Полосы 1–20 и 2–15 Гц; исключение пробелов, пропусков и клиппинга / 1–20 and 2–15 Hz bands; removal of gaps, missing data, and clipping	Подавление фона и удаление некорректных фрагментов / Background suppression and removal of invalid fragments
Классы и разметка / Classes and labeling	«Микросейсмическое событие» и «фон/шум»; транспортные, промышленные и низкочастотные помехи / “Microseismic event” and “background/noise”; traffic, industrial, and low-frequency interference	Бинарная классификация и снижение ложных срабатываний / Binary classification and reduction of false detections
Разделение массива / Dataset splitting	70:15:15; одно событие или шумовой интервал – одна подгруппа / 70:15:15; one event or noise interval – one subset	Обучение, настройка, тестирование и защита от утечки данных / Training, tuning, testing, and leakage prevention
Архитектура и обучение CNN / CNN architecture and training	1D CNN; ядра 3, 5, 7; фильтры 32, 64, 128; Adam; Dropout 0,25–0,35; 40–100 эпох / 1D CNN; kernels 3, 5, 7; filters 32, 64, 128; Adam; Dropout 0.25–0.35; 40–100 epochs	Выделение признаков разной длительности и устойчивое обучение / Extraction of features of different duration and stable training
Сравнение и метрики / Comparison and metrics	STA/LTA: 0,5–1,0 с и 10–20 с, порог 2,5–4,0; accuracy, precision, recall, specificity, F1 / STA/LTA: 0.5–1.0 s and 10–20 s, threshold 2.5–4.0; accuracy, precision, recall, specificity, F1	Оценка преимуществ CNN и нагрузки на аналитика / Evaluation of CNN advantage and analyst workload

В итоге разработанную CNN рассматривали не только как классификатор заранее подготовленных окон, а как практический детектор слабых событий. Главным критерием служил баланс: модель должна сохранять чувствительность к низкоамплитудным микросейсмическим сигналам и одновременно удерживать число ложных срабатываний на уровне, приемлемом для последующей экспертной проверки. Такой подход особенно важен для Северного Кавказа, где реальные записи содержат неоднородный фон, транспортные и промышленные помехи, а также события, проявляющиеся неравномерно по трем компонентам.

Результаты и обсуждение

Да, здесь лучше оставить только логическую «рамку» текста, а результаты, ошибки и сравнение CNN/STA-LTA перенести в таблицу. Так раздел будет выглядеть более исследовательским: меньше пересказа, больше измеримых параметров.

Почему слабое землетрясение иногда почти сливается с обычной помехой? После предварительной обработки локальных записей сейсмического мониторинга был сформирован рабочий массив, включающий микросейсмические события и фрагменты естественного либо антропогенного шума. Для Северного Кавказа такая неоднородность закономерна: условия регистрации зависят от рельефа, аппаратуры, погодных факторов, транспортной нагрузки и удаленности станции от населенных пунктов [Osipova et al., 2025].

Амплитуда фоновых колебаний между станциями различалась примерно в 2–6 раз, а многие слабые события имели отношение сигнал/шум всего 1,3–2,5 (табл. 3). Часть из них уверенно проявлялась только на одной или двух из трех компонент. Поэтому задача CNN не сводилась к простому разделению «сигнал/шум»: сеть должна была отличать устойчивую сейсмическую форму от промышленных импульсов, транспортных вибраций и нестабильного фона [Karshyga et al., 2022].

Таблица 3 / Table 3

**Результаты классификации слабых сейсмических событий
и основные источники ошибок /
Results of classification of weak seismic events and main sources of errors**

Показатель / Indicator	Численные значения / Numerical values	Полученный результат / Obtained result	Интерпретация / Interpretation
Фоновые колебания между станциями / Background variation between stations	2–6 раз / 2–6 times	Уровень шума существенно различался / Noise levels varied considerably	Единый амплитудный порог плохо переносится между станциями / A single amplitude threshold does not transfer well between stations
Слабые события / Weak events	S/N 1,3–2,5 / S/N 1.3–2.5	Часть событий слабо выделялась на фоне / Some events were barely distinguishable from the background	Для обнаружения нужны форма волны, спектр и межканальная согласованность / Detection requires waveform, spectrum, and interchannel consistency
Предварительная обработка / Preprocessing	100 Гц; нормализация [–1; 1]; фильтр 1–20 Гц / 100 Hz; normalization [–1; 1]; 1–20 Hz filter	Записи приведены к единому формату / Records were converted to a common format	Снижено влияние различий между станциями / The influence of interstation differences was reduced
Объем и деление выборки / Dataset size and split	12 000 фрагментов; 70:15:15 / 12,000 segments; 70:15:15	8400 обучающих, 1800 валидационных, 1800 тестовых / 8,400 training, 1,800 validation, and 1,800 test segments	Выборка достаточна для первичной оценки региональной CNN / The dataset is sufficient for an initial evaluation of the regional CNN
Оптимальная конфигурация CNN / Optimal CNN configuration	3 компоненты; окно 20 с; 6000 значений / 3 components; 20 s window; 6,000 values	Наиболее устойчивые метрики / The most robust metrics	Сохраняется баланс между вступлением, кодой и фоновым шумом / A balance is maintained among the onset, coda, and background noise
Качество CNN / CNN performance	Accuracy 0,93–0,95; recall 0,91–0,92; precision 0,93–0,94; F1 0,92–0,93 / Accuracy 0.93–0.95; recall 0.91–0.92; precision 0.93–0.94; F1 0.92–0.93	Большинство событий обнаруживалось корректно / Most events were detected correctly	CNN обеспечила устойчивый баланс полноты и точности / The CNN provided a robust balance between recall and precision

Показатель / Indicator	Численные значения / Numerical values	Полученный результат / Obtained result	Интерпретация / Interpretation
Влияние длины окна / Effect of window length	5–10 с; 20 с; 30 с / 5–10 s; 20 s; 30 s	Короткие окна чаще ошибались на импульсах, длинные включали лишний фон / Short windows produced more errors on impulses, whereas long windows included excessive background noise	Окно 20 с оказалось наиболее сбалансированным / The 20 s window proved to be the most balanced
STA/LTA при низком пороге / STA/LTA at low threshold	Порог 2,5–3,0; recall 0,85–0,90; 4–8 ложных/ч / Threshold 2.5–3.0; recall 0.85–0.90; 4–8 false detections/h	Метод находил много событий, но давал много ложных тревог / The method detected many events but generated numerous false alarms	Алгоритм чувствителен к импульсным помехам / The algorithm is sensitive to impulsive interference
STA/LTA при высоком пороге / STA/LTA at high threshold	Порог 3,5–4,0; recall 0,72–0,80; 1–3 ложных/ч / Threshold 3.5–4.0; recall 0.72–0.80; 1–3 false detections/h	Ложных тревог меньше, но пропусков больше / There were fewer false alarms but more missed events	Фиксированный энергетический порог ограничивает метод / A fixed energy threshold limits the method
CNN в сопоставимых условиях / CNN under comparable conditions	Recall > 0,90; 0,8–1,6 ложных/ч / Recall > 0.90; 0.8–1.6 false detections/h	Сеть лучше сохраняла баланс ошибок / The network maintained a better balance between error types	CNN эффективнее при слабых событиях и неоднородном шуме / The CNN is more effective for weak events and heterogeneous noise
Основные ошибки CNN / Main CNN errors	5–25 с; 2–15 Гц; 55–70% ложных обнаружений / 5–25 s; 2–15 Hz; 55–70% of false detections	Главный источник ошибок — антропогенные вибрации / The main source of errors was anthropogenic vibration	Нужно расширить шумовой класс такими примерами / The noise class should be expanded with such examples
Истинные события / True events	Вступление 0,2–1,0 с; рост 1–5 с; затухание 3–15 с / Onset of 0.2–1.0 s; growth of 1–5 s; decay of 3–15 s	CNN распознавала развитие волнового пакета / The CNN recognized the evolution of the wave packet	Модель учитывала структуру события, а не одиночный пик / The model accounted for event structure rather than a single peak

Сопоставление с STA/LTA показало, что преимущество CNN особенно заметно при слабых событиях и нестационарном фоне. В отличие от порогового алгоритма, чувствительного к промышленным импульсам и резким изменениям шума, CNN анализирует форму волны, длительность, спектральную структуру и согласованность трех компонент. Поэтому сеть лучше распознает низкоамплитудные события, которые не дают достаточного энергетического отношения, но сохраняют сейсмическую форму. Визуальная проверка подтвердила расчетные показатели: большинство истинных событий включало вступление 0,2–1,0 с, рост амплитуды 1–5 с и затухание 3–15 с. Изолированные пики без последующей коды CNN обычно относил к шуму, что снижало число ошибок STA/LTA.

Основные ложноположительные решения были связаны с антропогенными вибрациями длительностью 5–25 с в полосе 2–15 Гц. Пропущенные события чаще имели слабые вступления с отношением сигнал/шум 1,1–1,5 и требовали проверки по 3–5 станциям или региональному каталогу. При наложении события на нестационарный шум CNN иногда относил фрагмент к шуму; такие случаи составляли около 60–70% ложных отрицательных результатов (табл. 4). Поэтому дальнейшее развитие метода следует связать с многостанционной обработкой и подтверждением кандидатов минимум на трех станциях в течение 5–20 с.

Таблица 4 / Table 4

**Сравнительная оценка качества выделения микросейсмических
событий методами STA/LTA и CNN /**

**Comparative assessment of the quality of identifying microseismic
events using the STA/LTA and CNN methods**

Метод обработки / Processing method	Основные параметры / Main parameters	Точность / Accuracy	Полнота / Recall	F1-мера / F1-score	Ложные срабатывания, ед./час / False detections, events/h	Особенности результата / Result characteristics
STA/LTA, низкий порог / STA/LTA, low threshold	STA 0,5 с; LTA 10 с; порог 2,5 / STA 0.5 s; LTA 10 s; threshold 2.5	0.78	0.88	0.82	8–12	Хорошо фиксирует слабые события, но дает много ложных срабатываний на импульсных помехах / Detects weak events well but produces numerous false detections in response to impulsive interference
STA/LTA, средний порог / STA/LTA, medium threshold	STA 1,0 с; LTA 15 с; порог 3,0 / STA 1.0 s; LTA 15 s; threshold 3.0	0.82	0.79	/ 0.80	5–7	Более устойчив к шуму, но часть слабых микросейсмических событий пропускается / More robust to noise, but some weak microseismic events are missed
STA/LTA, высокий порог / STA/LTA, high threshold	STA 1,0 с; LTA 20 с; порог 4,0 / STA 1.0 s; LTA 20 s; threshold 4.0	0.87	0.66	0.75	2–4	Снижает число ложных детекций, однако заметно теряет малые события / Reduces the number of false detections but misses a considerable number of small events
CNN, 1 компонент / CNN, one component	Вертикальная компонента; окно 20 с; фильтр 1–20 Гц / Vertical component; 20 s window; 1–20 Hz filter	0.89	0.84	0.86	2–3	Уверенно выделяет события с выраженным вертикальным вступлением, но хуже работает на сложных записях / Reliably detects events with a distinct vertical arrival but performs worse on complex recordings
CNN, 3 компоненты / CNN, three components	Z, N, E; окно 20 с; фильтр 1–20 Гц / Z, N, E; 20 s window; 1–20 Hz filter	0.94	0.91	0.93	1–2	Наиболее устойчивый вариант, хорошо учитывает форму волнового пакета и согласованность компонент / The most robust configuration, effectively accounting for wave-packet shape and component consistency
CNN, 3 компоненты, высокий порог вероятности / CNN, three components, high probability threshold	Z, N, E; окно 20 с; фильтр 1–20 Гц; порог 0,8 / Z, N, E; 20 s window; 1–20 Hz filter; threshold 0.8	0.96	0.86	0.91	Менее 1 / Less than 1	Подходит для отбора наиболее надежных событий, но часть слабых кандидатов отсекается / Suitable for selecting the most reliable events, but some weak candidates are rejected

После предварительной обработки локальных записей был сформирован массив, включающий микросейсмические события и фрагменты природного либо антропогенного шума. Для станций Северного Кавказа неоднородность фона закономерна: ус-

ловия регистрации зависят от рельефа, аппаратуры, погоды, транспортной нагрузки и удаленности от населенных пунктов [Татаринцев и др., 2026]. Амплитуда фоновых колебаний между станциями различалась примерно в 2–6 раз, а отношение сигнал/шум у многих слабых событий составляло всего 1,3–2,5. При этом часть событий проявлялась только на одной или двух из трех компонент. Поэтому задача CNN заключалась не в простом разделении «сигнал/шум», а в распознавании устойчивой сейсмической формы на фоне промышленных импульсов, транспортных вибраций и нестабильного фона (рис. 1).

Подготовленные фрагменты использовали для обучения сверточной нейронной сети (CNN). Исходный массив делили на обучающую, валидационную и тестовую части в соотношении 70:15:15; например, набор из 12 000 фрагментов включал 8400 обучающих, 1800 валидационных и 1800 тестовых записей. Временно смежные фрагменты направляли только в одну подгруппу, чтобы CNN не запоминала особенности конкретного шумового интервала.

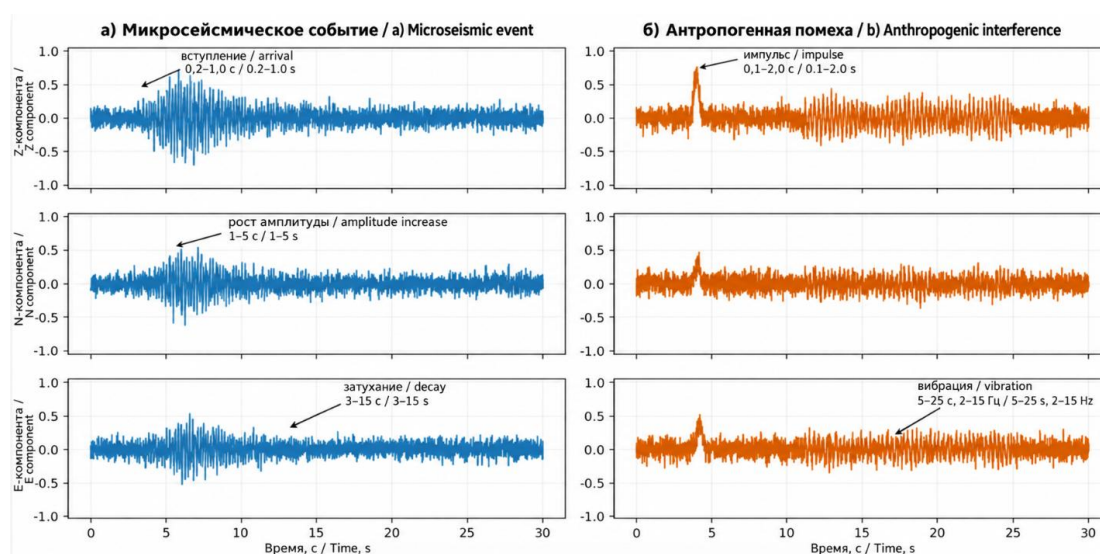


Рис. 1. Отличия слабого микросейсмического события от антропогенной помехи в трехкомпонентной записи: а – событие с вступлением, ростом амплитуды и кодой; б – промышленный или транспортный импульс с неустойчивым развитием волновой формы /
Fig. 1. Differences between a weak microseismic event and anthropogenic interference in a three-component recording: a – event with an arrival, increase in amplitude, and coda; b – industrial or transport impulse with unstable development of the waveform

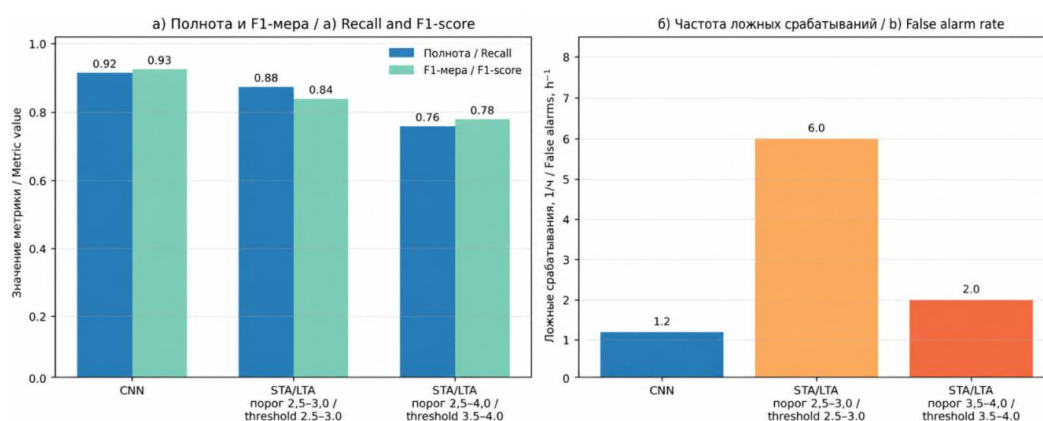


Рис. 2. Сравнение качества CNN и STA/LTA при обнаружении слабых событий /
Fig. 2. Comparison of the quality of CNN and STA/LTA in weak event detection

Трехкомпонентная одномерная CNN работала стабильнее модели, обученной только на вертикальном канале (рис. 2). Добавление двух горизонтальных компонент повысило точность на 2–4 процентных пункта. На тестовом массиве CNN достигла ассигасы 0,93–0,95, recall 0,91–0,92, precision 0,93–0,94 и F1-меры 0,92–0,93. Наиболее устойчивыми оказались окна 20 с, содержащие при частоте 100 Гц 6000 значений для трех компонент. Сравнение с STA/LTA показало преимущество CNN при слабых событиях и нестационарном фоне. При пороге STA/LTA 2,5–3,0 recall составлял 0,85–0,90, но число ложных срабатываний возрастало до 4–8 в час; при пороге 3,5–4,0 ложные тревоги снижались до 1–3 в час, но recall падал до 0,72–0,80. CNN сохраняла recall выше 0,90 при 0,8–1,6 ложных срабатываниях в час. Преимущество CNN связано с учетом формы волны, длительности, спектральной структуры и согласованности трех компонент. Основные ошибки были вызваны антропогенными вибрациями длительностью 5–25 с в полосе 2–15 Гц, похожими на локальные сейсмические события (рис. 3). Поэтому обучающий массив следует расширить промышленными сигналами.

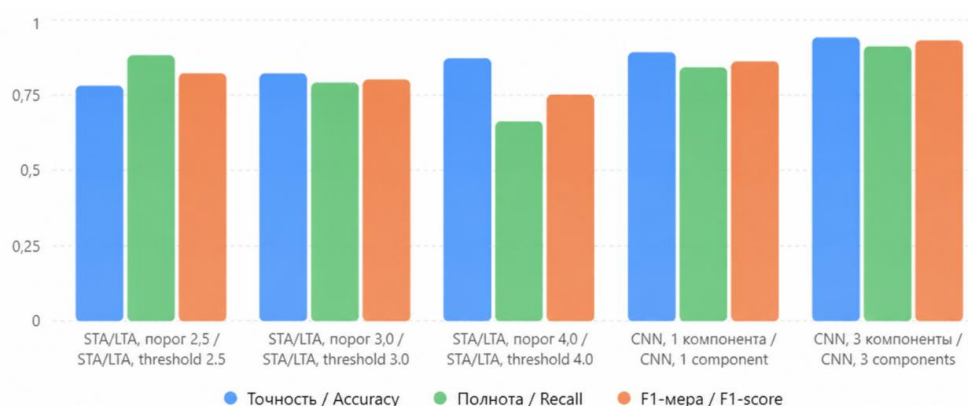


Рис. 3. Сравнение качества выделения микросейсмических событий методами STA/LTA и CNN / Fig. 3. Comparison of the quality of identifying microseismic events using the STA/LTA and CNN methods

Такой анализ необходим перед внедрением CNN в регулярный мониторинг, поскольку высокая тестовая точность может снижаться при переносе модели на другие станции из-за различий станционного шума. Поэтому CNN следует рассматривать не как замену существующим методам, а как модуль предварительного отбора событий. Модель способна обрабатывать суточные записи, ранжировать фрагменты и сокращать ручной просмотр на 60–85%; STA/LTA при этом можно сохранить как независимый детектор. Метод доступен для обычной рабочей станции с 32–64 ГБ ОЗУ и GPU NVIDIA 8–12 ГБ: обучение занимает 0,5–2 ч, обработка 20-секундного окна – 5–30 мс. Наиболее стабильная конфигурация включала трехкомпонентные записи, частоту 100 Гц, окно 20 с и фильтрацию 1–20 Гц; она обеспечила ассигасу 0,93–0,95, recall 0,91–0,92 и F1-меру 0,92–0,93. Перед внедрением необходимо расширить обучающий массив до 10 000–20 000 фрагментов, проверить модель на 5–10 станциях и связать детектор с определением Р- и S-фаз и локализацией минимум по четырем станциям.

Выводы

Проведенное исследование показало, что сверточные нейронные сети (CNN) способны надежно обнаруживать слабые микросейсмические события в данных локального мониторинга Северного Кавказа при неоднородном природном и антропогенном шуме. Наиболее сложными были сигналы с отношением сигнал/шум 1,2–2,5: традиционные алгоритмы часто пропускали их, тогда как CNN учитывала не только амплитуду, но и форму волны, включая вступление, рост и затухание сигнала.

Наиболее устойчивые результаты дала конфигурация с трехкомпонентными записями, окнами 20 с, частотой 100 Гц и фильтрацией 1–20 Гц. В этих условиях CNN достигла ассигасы 0,93–0,95, recall 0,91–0,92 и F1-меры 0,92–0,93. Использование только вертикального канала снижало показатели на 2–4 процентных пункта, особенно для слабых событий.

Сравнение с STA/LTA подтвердило ограниченность фиксированного энергетического порога. При пороге 2,5–3,0 алгоритм обнаруживал 85–90% событий, но давал 4–8 ложных срабатываний в час; при пороге 3,5–4,0 ложные тревоги снижались до 1–3 в час, но recall падал до 0,72–0,80. CNN сохраняла recall выше 0,90 при 0,8–1,6 ложных тревогах в час.

Сеть выделяла 4–15 новых кандидатов на одну станцию в сутки, отсутствовавших в исходном каталоге. Их нельзя включать автоматически: требуется экспертная проверка, выделение фаз Р и S и расчет гипоцентра минимум по четырем станциям. Однако подтверждение части таких событий может расширить каталог на 10–30%. Для внедрения CNN нужна региональная база 10 000–20 000 размеченных фрагментов с 5–10 станций, включая разные сезоны и типы шума. CNN целесообразно использовать как модуль первичного обнаружения, объединенный с выделением фаз, расчетом гипоцентра, оценкой магнитуды и многостанционной ассоциацией. Такая система может сократить ручной контроль на 60–85% и обрабатывать суточные записи быстрее реального времени.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В. Теоретические исследования возможности использования туннельных волн для мониторинга состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.
2. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В., Сердюк И.М. Исследование возможностей пассивного сейсмического мониторинга при решении задачи контроля состояния подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 142–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_142.
3. 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. – 2024. – Т. 16. № 1. – С. 345–357. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-345-357.
4. Константинов А.В., Рассказов И.Ю. Разработка комплекса нейросетевых моделей для идентификации типа источника акустического излучения на удароопасном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. № 11. – С. 23–36. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_23.
5. Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Лебедева Л.В. Оценка экологической реакции пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) на воздействие разных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94.
6. Толеубекова Ж.З., Тиреуов К.М., Курмангалиева З.Н., Татаринцев В.Л. Экологическая реакция сельскохозяйственных культур на условия выращивания как основа управления устойчивостью агроландшафтов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712.
7. Федорова Н.В., Пчелинцева С.В., Панфилов И.А., Цыганко Е.Н. Геомеханические аспекты управления напряжениями и сейсмикой при добыче руд // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 2140–2152. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-2140-2152.
8. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 86. – Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
9. Ghimire S., Deo R.C., Casillas-Perez D., Salcedo-Sanz S., Pourmousavi S.A., Acharya U.R. Probabilistic-based electricity demand forecasting with hybrid convolutional neural network-extreme

learning machine model // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2024. – Vol. 132. – Art. No. 107918. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.107918.

10. Kapanski A.A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremenko E.A., Demin A.Y., Martyshev N.V. Intelligent methods of operational response to accidents in urban water supply systems based on LSTM neural network models // *Smart Cities*. – 2025. – Vol. 8. No. 2. – Art. No. 59. DOI: 10.3390/smartcities8020059.

11. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica // *Metals*. – 2022. – Vol. 12. No. 12. – Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.

12. Khoshouei M., Bagherpour R., Jalalian M.H., Purhamadani E. An intelligent approach to predict the drilling penetration rate using acoustic emission technique (AET) // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. No. 1. – Art. No. 37457. DOI: 10.1038/s41598-025-21202-3.

13. Martyshev N.V., Malozyomov B.V., Demin A.Y., Pogrebnoy A.V., Efremenko E.A., Valuev D.V., Boltrushevich A.E. Mathematical modeling of signals for weight control of vehicles using seismic sensors // *Mathematics*. – 2025. – Vol. 13. No. 13. – Art. No. 2083. DOI: 10.3390/math13132083.

14. Ospanova A.A., Ozeranskaya N. L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2025. – Vol. 17. No. 4. – pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.

15. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N. Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. – 2026. – Vol. 2026. – No. 3. – pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

References

1. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V. Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 4. pp. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155. (In Russ.)

2. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V., Serdyuk I.M. Capabilities of passive seismic monitoring in condition assessment of underground constructions. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026. No. 2. pp. 142–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_142. (In Russ.)

3. 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.)

4. Konstantinov A.V., Rasskazov I.Yu. Creation of neural network model package to identify acoustic emission sources at rockburst-hazardous deposits. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 11. pp. 23–36. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_23. (In Russ.)

5. Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Lebedeva L.V. Assessment of the ecological reaction of soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to the effects of various factors. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026. Vol. 18. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94. (In Russ.)

6. Toleubekova Z.Z., Tireuov K.M., Kurmangalieva Z.N., Tatarintsev V.L. Ecological response of agricultural crops to growing conditions as a basis for managing the sustainability of agricultural landscapes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 2. pp. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712. (In Russ.)

7. Fedorova N.V., Pchelintseva S.V., Panfilov I.A., Tsyganko E. N. Geomechanical aspects of stress and seismic control in ore mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 2140–2152. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-2140-2152. (In Russ.)

8. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.

9. Ghimire S., Deo R.C., Casillas-Perez D., Salcedo-Sanz S., Pourmousavi S.A., Acharya U.R. Probabilistic-based electricity demand forecasting with hybrid convolutional neural network-extreme

learning machine model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 132. Art. No. 107918. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.107918.

10. Kapanski A.A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremenko E.A., Demin A.Y., Martyushev N.V. Intelligent methods of operational response to accidents in urban water supply systems based on LSTM neural network models. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8. No. 2. Art. No. 59. DOI: 10.3390/smartcities8020059.

11. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 12. Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.

12. Khoshouei M., Bagherpour R., Jalalian M.H., Purhamadani E. An intelligent approach to predict the drilling penetration rate using acoustic emission technique (AET). *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1. Art. No. 37457. DOI: 10.1038/s41598-025-21202-3.

13. Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Demin A.Y., Pogrebnoy A.V., Efremenko E.A., Valuev D.V., Boltrushevich A.E. Mathematical modeling of signals for weight control of vehicles using seismic sensors. *Mathematics*. 2025. Vol. 13. No. 13. Art. No. 2083. DOI: 10.3390/math13132083.

14. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.

15. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N. Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

УДК 553.21/.24

DOI: 10.46698/VNC.2026.79.36.001

Оригинальная статья

Определение стратиграфической принадлежности пачки органогенно-обломочных известняков пограничных отложений аалена-байоса Лабино-Малкинской зоны (Северный Кавказ)

А.-Г.Г. Керимов¹, Н.А. Максимова², М.П. Шерстюков¹,
Л.С. Мкртчян¹, Е.Г. Керимова¹

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017,
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: akerimov@ncfu.ru;

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Статья поступила: 07.04.2026, доработана: 10.08.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Маркирующий горизонт органогенно-обломочных известняков, расположенный в зоне пограничных отложений ааленского и байосского ярусов, являлся объектом длительной дискуссии между геологами, изучавшими рассматриваемый район. Часть авторов считала его верхами джигиатской свиты верхнего аалена, другие рассматривали криноидные известняки как базальный горизонт толщи байосских глин и аргиллитов, соответствующий подстилающим байосско-батским отложениям джангурской свиты нижнего байоса. Закономерности формирования и состав литогенной основы маркирующей пачки являются очень важными при уточнении пограничных отложений любого возраста, поскольку полученные результаты могут существенно изменить представление об осадконакоплении в этом временном интервале. В железняках и фосфоритах, расположенных ниже криноидных известняков, было обнаружено повышенное содержание редкоземельных металлов. В случае принадлежности пласта криноидных известняков к верхам джигиатской свиты (аален), можно считать пласт бронирующим для закрытых ааленских отложений на сопредельных площадях, что может послужить поисковым критерием выявления залежей редкоземельных металлов и позволит минимизировать затраты на поисково-разведочные работы. **Целью исследования** являлось определение стратиграфической принадлежности пачки органогенно-обломочных известняков пограничных отложений аалена-байоса Лабино-Малкинской зоны Северного Кавказа. **Методы исследования** включали петрографическое описание горных пород, определение их химического состава на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA 3 SBU, сбор и определение морских ископаемых. **Результаты исследований.** Установлены закономерности формирования свойств и состава маркирующей литогенной пачки, которая в данном обнажении отнесена к верхам джигиатской свиты ааленского яруса.

Ключевые слова: Ааленский ярус, байосский ярус, известняки, железняки, Северный Кавказ.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00482, <https://rscf.ru/project/25-27-00482/>.

Для цитирования: Керимов А.-Г.Г., Максимова Н.А., Шерстюков М.П., Мкртчян Л.С., Керимова Е.Г. Определение стратиграфической принадлежности пачки органогенно-обломочных известняков пограничных отложений аалена-байоса Лабино-Малкинской зоны (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.79.36.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.79.36.001

Original paper

Identification of the Stratigraphic Position of a Bioclastic Limestone Unit in the Aalenian–Bajocian Boundary Deposits of the Laba-Malka Zone (North Caucasus)

A.-G.G. Kerimov¹, N.A. Maksimova², M.P. Sherstyukov¹,
L.S. Mkrtchyan¹, E.G. Kerimova¹

¹ North Caucasus Federal University, 1 Pushkin Str., Stavropol'skiy Krai 355017, Russian Federation, e-mail: akerimov@ncfu.ru;

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

Received: 07.04.2026, revised: 10.08.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The marker horizon of bioclastic limestones, located in the boundary zone of deposits of the Aalenian and Bajocian stages, has been the subject of a long-standing debate among geologists studying the region. Some authors considered it to be the uppermost layer of the Dzhigiat Formation of the Upper Aalenian, while others viewed the crinoid limestones as the basal horizon of a sequence of Bajocian clays and mudstones, corresponding to the underlying Bajocian-Bathonian deposits of the Dzhangur Formation of the Lower Bajocian. The formation patterns and composition of the lithogenic base of the marker member are very important when refining boundary deposits of any age, since the obtained results can significantly change the understanding of sedimentation in this time interval. Elevated contents of rare earth metals were found in the iron ores and phosphorites located below the crinoid limestones. If the crinoid limestone bed belongs to the upper Dzhigiat Formation (Aalenian), it can be considered a protective layer for the closed Aalenian deposits in adjacent areas. This may serve as a search criterion for identifying rare earth metal deposits and will minimize exploration costs. **The aim of this study** was to determine the stratigraphic affiliation of a bioclastic limestone member in the Aalenian-Bajocian boundary deposits of the Laba-Malka zone of the Northern Caucasus. **Research methods** included a petrographic description of the rocks, determination of their chemical composition using a TESCAN VEGA 3 SBU scanning electron microscope (SEM), and the collection and identification of marine fossils. **Results.** Patterns in the formation of the properties and composition of the marker lithogenic member, which in this outcrop is attributed to the upper Dzhigiat Formation of the Aalenian Stage, were established.

Keywords: Aalenian stage, Bajocian stage, limestones, ironstones, North Caucasus.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation No. 25-27-00482, <https://rscf.ru/en/project/25-27-00482/>.

For citation: Kerimov A.-G.G., Maksimova N.A., Sherstyukov M.P., Mkrtchyan L.S., Kerimova E.G. Identification of the Stratigraphic Position of a Bioclastic Limestone Unit in the Aalenian–Bajocian Boundary Deposits of the Laba-Malka Zone (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.79.36.001

Введение

Изучаемое обнажение представлено выходом скальной стенки на речной террасе, выше продолжается частично задернованным склоном отрога Передового хребта.

Нижняя часть разреза – аален (рис. 1, поз. 3) относится к верхней части джигиатской свиты [Безносов, 1960], выше располагается толща (не менее 30 м) нижнего байоса (рис. 1, поз. 1), относящаяся к нижней подсвите джангурской свиты [Безносов, 1967]. В базальной части пород байоса залегает пласт известняков 1.2–1.6 м (рис. 1, поз. 2), выделяющийся как «криноидный горизонт» или «бижгонские слои» [Безносов, 1960, 1967]. Эта пачка органогенно-обломочных известняков является объектом длительной дискуссии между геологами, изучавшими рассматриваемый район. Одни считали её верхами джигиатской свиты (аален) [Живаго, 1960; Казакова, 1956], другие рассматривали криноидные известняки как базальный горизонт джангурской свиты нижнего байоса [Кахадзе и др., 1957; Ростовцев, 1959].



Рис. 1. Общий вид обнажения:

1 – нижний байос, 2 – органогенно-обломочные известняки, 3 – нижний-верхний аален /

Fig. 1. General view of the outcrop:

1 – lower Bajocian, 2 – organogenic-clastic limestones, 3 – lower – upper aalen

Данный вопрос является достаточно принципиальным как для изучения трансформации минерального матрикса или цемента, модификации конфигураций ооидов, так и для конкретного биогеохимического цикла осадочной системы в исследуемом обнажении. Наличие слоя криноидных известняков как терминального для отложений ааленских железняков или, наоборот, его отсутствие, в случае принадлежности к байосу может кардинально поменять картину геологических событий регионального или более крупного масштаба. Фациальная изменчивость и структурная сложность территории существенно осложняют стратиграфическое расчленение и корреляцию юрских отложений Северного Кавказа, что обуславливает необходимость применения комплексного подхода. Для уточнения унифицированной региональной стратиграфической схемы требуется детализация дискуссионных аспектов стратиграфии юрских ярусов с учётом разнородных литологических, биостратиграфических и геохронологических данных [Рубан, 2012; Mitta et al., 2018].

В железняках и фосфоритах, расположенных ниже криноидных известняков, было обнаружено повышенное содержание редкоземельных металлов. Сейчас, как известно, фосфориты рассматривают как потенциальные нетрадиционные источники редкоземельных элементов [Kato et al., 2011; Лихошерст, Почиталкина, 2021; Nan, 2023]. В случае принадлежности пласта криноидных известняков к верхам джигиатской свиты (аален), можно считать пласт бронирующим для закрытых ааленских отложений на сопредельных площадях, что может послужить поисковым критерием выявления залежей редкоземельных металлов и позволит минимизировать затраты на поисково-разведочные работы.

Методы исследования

При построении генетических моделей оруденения требуется накопить достаточно много информации, используя совокупность различных методов. Это необходимо не только для формирования возможно максимально полной базы данных по разрезу, но и для взаимного контроля результатов. Важнейшими и определяющими инструментами изучения пород, несомненно, являются литологический, геохимический и палеонтологический методы. Такой комплексный подход был применен при установлении закономерностей формирования свойств и состава литогенной основы маркирующей пачки (XI^a-XI^b), которая входит в состав изучаемого обнажения.

Основные литотипы, их текстурно-структурные характеристики, компонентный состав изучены с помощью оптико-микроскопических исследований и сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного энергодисперсионным детектором OXFORD X-Max 50. Найденные в геологическом разрезе палеонтологические образцы были препарированы и предварительно определены с помощью справочной литературы [Крымголец, 1961; Ростовцев, 1965; Chandler, 1997].

Результаты исследования

На основе текстурно-структурных и минералого-геохимических особенностей в разрезе выделено несколько кластических и хемотропных осадочных пород: песчаники, железняки, известняки, фосфориты (рис. 2) [Kalinina et al., 2024].

Минеральный состав пород изучаемого разреза указывает на неоднократную смену геохимических обстановок формирования минералов [Ojo et al., 2021; Papazzoni et al., 2022].

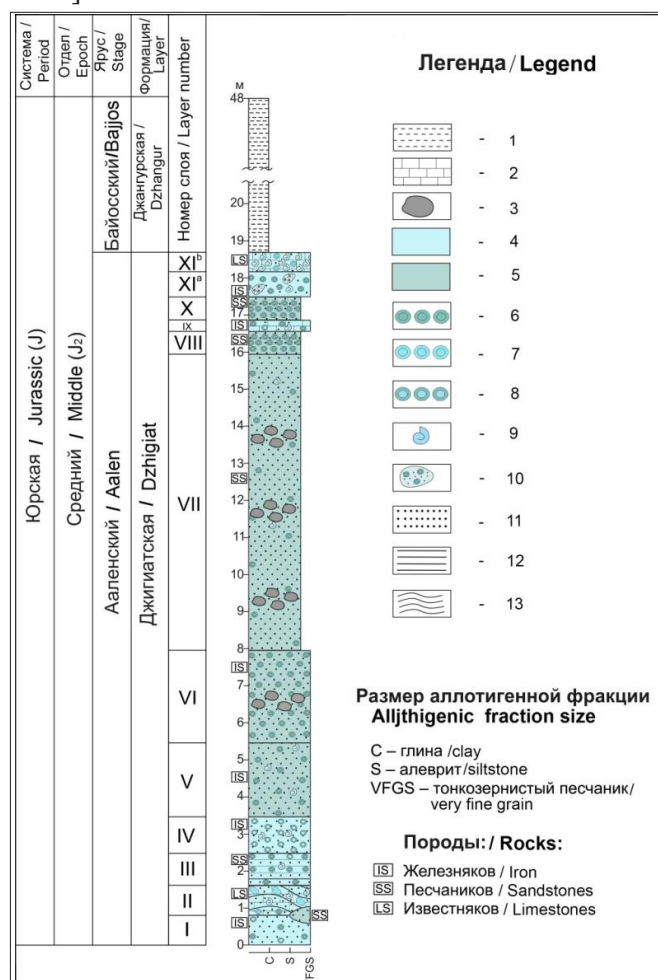


Рис. 2. Литолого-стратиграфическая колонка изучаемого обнажения р. Хуса-Кардоникская. Условные обозначения:

1 – аргиллиты, 2 – известняки, 3 – желваковые фосфориты, 4 – карбонатный цемент, 5 – филлосиликатный матрикс, 6 – глинистые ооиды, 7 – карбонатные ооиды, 8 – глинисто-карбонатные ооиды, 9 – морские фоссилии, 10 – литокласты, 11 – аллотигенная фракция, 12 – параллельная слоистость, 13 – волнистая слоистость /

Fig. 2. Lithostratigraphic log of the Khusa-Kardonikskaya River outcrop. Key: 1 – argillites, 2 – limestones, 3 – nodular phosphorites, 4 – carbonate cement, 5 – phyllosilicate matrix, 6 – clay ooids, 7 – carbonate ooids, 8 – clay-carbonate ooids, 9 – marine fossils, 10 – lithoclasts, 11 – allothigenic fraction, 12 – parallel lamination, 13 – wavy lamination

В результате исследования данного интервала разреза выяснилась следующая картина: для пласта характерна значительная вертикальная и латеральная изменчивость, что отражается в изменении цвета пород и смене структур. И, хотя в основном пласт имеет карбонатный состав, его можно разделить на две различные части. Нижняя часть пласта (XI^a) отличается высокой концентрацией хлоритовых ооидов (рис. 3, А) и псевдо-пизоидов (рис. 3, В), представляющих собой литокласты, покрытые хлоритовым кортексом. Также слой XI^a отличается повышенной концентрацией железа (Fe – 10,1–20,9%) за счет высокой доли железистых ооидов (рис. 3, А). Вероятно, формирование этой части пласта происходило в условиях активной гидродинамики [Lechte et al., 2024].

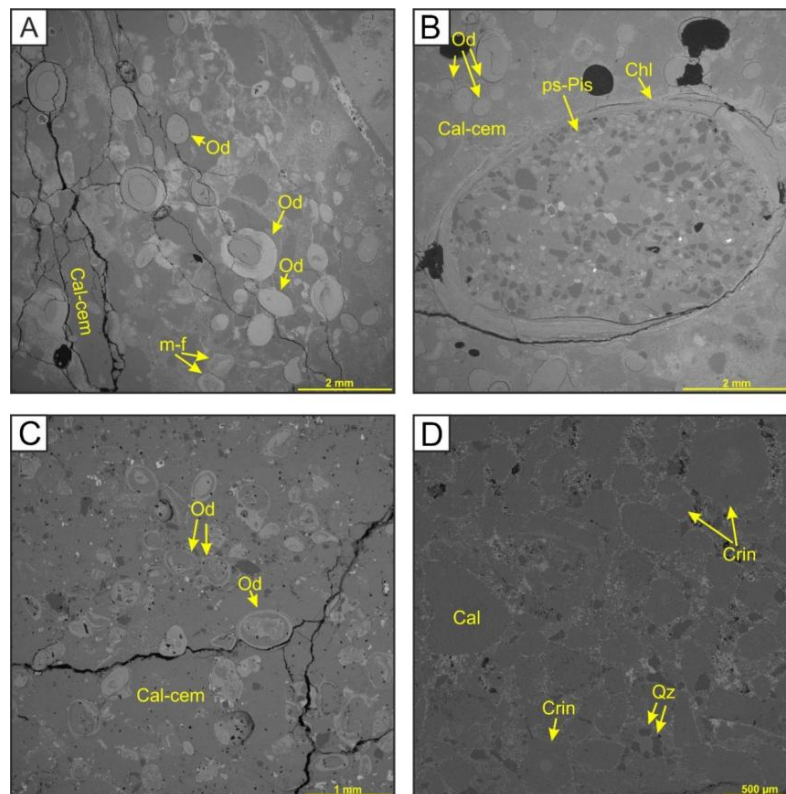


Рис. 3. СЭМ-снимки слоя XI^a: (А) нижняя часть слоя с высокой долей хлоритовых ооидов, (В) псевдо-пизоид, представленный литокластом с хлоритовым кортексом в слое XI^a, (С) середина слоя, сложенная кальцит-хлоритовыми ооидами с карбонатным цементом, (D) детритовый известняк с зернами кальцита и остатками морской фауны. Cal – кальцит, mf – морская фауна, Crin – фрагменты криноидей, Od – ооид, Ps-pis – псевдо-пизоид, Qz – кварц, Cal-cem – кальцитовый цемент/

Fig. 3. SEM images of the XI^a layer: (A) the lower part of the layer with a high proportion of chlorite ooids, (B) a pseudo-pisoid represented by a lithoclast with a chlorite cortex in the XI^a layer, (C) the middle of the layer composed of calcite-chlorite ooids with carbonate cement, (D) detrital limestone with grains calcite and the remains of marine fauna. Cal – calcite, mf – marine fauna, Crin – crinoid fragments, Od – ooid, Ps-pis – pseudo-pisoid, Qz – quartz, Cal-cem – calcite cement

В изучаемой пачке XI^a-XI^b найдены ростры белемнитов, аммониты, брахиоподы и остатки криноидей. Наличие высокой доли железа и содержание в текстуре форменных образований, также связанных с железом, позволяют считать основание маркирующей карбонатной пачки близкой к определению ооидовые железняки. По мере подъема вверх по пласту доля и размер ооидов постепенно снижаются, а состав становится более карбонатным (рис. 3, С). Верхняя часть пласта XI^b (рис. 3, D) представлена детритовым известняком и содержит обилие остатков криноидей и брахиопод.

Здесь встречаются редкие карбонатные ооиды кальцитового и кальцит-сидеритового состава.

Таким образом, в данном обнажении понятие «криноидные известняки» может трактоваться как маркирующая пачка более сложного состава, где базальная часть сложена ооидными железняками (XI^a), которые неотделимым образом за счет повышения карбонатности состава постепенно переходят в детритовые известняки (XI^b).

Интенсивность заполнения породы фрагментированными остатками иглокожих возрастает снизу вверх и в верхах слоя XI^b часто можно наблюдать массовые скопления рук (брахиоли), табличек чашечек и фрагментов стебля, из которых состоят морские лилии. В подавляющем большинстве это остатки морских лилий отряда *Pentacrinida*. Непременным условием существования колоний морских лилий, как групп реофильных малоподвижных пассивных фильтраторов, считается минимальное поступление терригенного материала, что может говорить либо об удалении от береговой линии, либо о сглаживании рельефа и его последующей пенеппенизации, либо о климатическом факторе (уменьшение осадков). Схожие условия обитания организмов и реконструкция обстановки древнего бассейна приведены для раннеюрских криноидей Крыма [Кликушин, 1988]. Наиболее вероятным нам видится вариант пика ааленской трансгрессии с затоплением источников сноса и последующим перерывом ненакопления (верхняя граница слоя XI^b). Данный цикл с обмелением вверх по разрезу, когда ооидовый известняк неотделимо замещается биокластическим, в нашем случае, криноидным известняком, хорошо известен литологам, изучающим стратиграфическое распределение и условия образования карбонатных толщ [Уилсон, 1980]. Криноидная пачка венчает разрез цикла, что также является косвенным доказательством её принадлежности к нижележащим толщам аалена.

Ооиды и аммониты верхнего аалена (*L. murchisonae* ex gr.) в разрезе без каких-то видимых следов переотложения переходят из нижележащих пород в маркирующую пачку (слои XI^a–XI^b). Мелкобугристая кровля слоя X^b со следами ползания представителей бентоса и трещинами усыхания, наоборот, является резкой границей для вышележащих пород джангурской свиты. Оскольчатые аргиллиты (слой XII), в которых нами обнаружены байоские аммониты *Stephanoceras* sp., налегают на известняки без каких-либо базальных образований. Данные признаки позволяют считать, что процесс седиментации на границе кровли криноидных известняков и оскольчатых аргиллитов сменил перерыв ненакопления.

Неотделимое замещение криноидными известняками подстилающих ааленских толщ, наличие ооидов во всех нижележащих слоях и самой изучаемой пачке, присутствие непереотложенных определяющих ископаемых верхнего аалена, мелкобугристая кровля, представляющая собой поверхность ненакопления – все это в какой-то мере говорит о генетической связи железняков (XI^a) и криноидных известняков (XI^b) с ааленскими железняками, которые формировались как слоевые системы открытого мелководья [Шишлов, 2010]. В пользу открытого мелководья говорят находки редких некрупных представителей *Phylloceratidae* и *Lytoceratidae*. В плане стратиграфии эти аммониты не так значимы, т.к. в большинстве своем являются транзитными, но в плане палеобиологии несут в себе достаточно важную информацию. Представители этих семейств являются жителями открытых океанических просторов и, изучая палеогеографию пограничных отложений, можно говорить не о закрытых ископаемых морях и задуговых бассейнах, а именно о северной открытой окраине ископаемого океана Тетис. Данные таксоны нельзя считать случайными находками в локации, попавшими в прибрежное мелководье во время шторма или принесенными течениями из удаленных от берега участков океана. Известно, что как минимум четыре эволюционные линии литоцератид жили в средней юре в ареалах обитания типичной ааленской и байосской фауны шельфовой зоны [Whicher et al., 2023].

Еще одним важным признаком родства между слоем XI^a и нижележащими слоями является общий источник вещества. Минералогические и геохимические исследования показали, что одним из источников вещества могли выступать гидротермальные флюиды [Kalinina et al., 2024]. Это подтверждается наличием газовой-жидких включений в кальцитовом цементе пород, а также повышенным содержанием элементов, характерных для гидротермальных систем (Pb, Zn, Ba, Sb), и особых минералов (галенит, сфалерит, арсенопирит, аргентотетраэдрит, самородное серебро, коронадит).

Флюидные включения, обнаруженные в различных слоях разреза, вероятно, являются постмагматическими флюидами, связанными с внедрением Маринского субвулканического комплекса в ранней юре [Семенуха и др., 2021]. Это внедрение сопровождалось гидротермальным метасоматозом, который в свою очередь обусловил полиметаллическую минерализацию и баритовые проявления в 35 км к востоку от изучаемого разреза, где одна из наиболее устойчивых групп золотоносной минерализации (золото-серебро-сурьма-мышьяк) ассоциируется с ниже-среднеюрскими терригенными породами [Парада, 2017].

Обнаружение газовой-жидких включений в слоях II, III и XI^a, а также наличие самородного серебра как в цементе песчаников подлежащих слоев, так и в железняках слоя, являются дополнительным подтверждением генетического родства между слоем XI^a и его подстилающей толщей аалена.

Выводы

Криноидные известняки, которые в данном обнажении трактуются нами как пачка в составе железняков (слой XI^a) и органогенно-обломочных известняков (слой XI^b), неотделимо без видимой границы замещают нижележащие ааленские толщи. Мелкобугристая кровля слоя XI^b со следами ползания представителей бентоса и трещинами усыхания, наоборот, является резкой границей для вышележащих пород джангурской свиты.

Аммониты *L. murchisonae* ex. gr, обнаруженные в маркирующей пачке (слои XI^a–XI^b), не имеющие следов переотложения, являются определяющими для зоны верхнего аалена – *Ludwigia murchisonae* (Sowerby).

Наличие единого источника вещества позволяет с большой долей уверенности говорить о том, что породы разреза вместе с маркирующей пачкой (слои XI^a–XI^b) формировались в пределах ааленского яруса без перерыва условий осадконакопления.

На основании вышеизложенного пачка в составе железняков (слой XI^a) и органогенно-обломочных известняков (слой XI^b) в изучаемом обнажении отнесена к верхам джигиатской свиты ааленского яруса.

Литература

1. Безносков Н.В. Байосские и батские отложения Северного Кавказа // Труды ВНИИГаз. – 1967. – Вып. 28/36. – 179 с.
2. Безносков Н.В. Материалы по биостратиграфии верхнебайоско-батских отложений Северного Кавказа // Труды ВНИИГаз. – 1960. – Т. 10. № 18. – С. 226–253.
3. Живаго Н.В. Материалы к стратиграфии ниже- и среднеюрских отложений, развитых на территории междуречья Кубани и Урупа // Труды ВНИИГаз. – 1960. – Т. 10. № 18. – С. 109–191.
4. Казакова В.П. К стратиграфии юрских отложений Дагестана // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 1956. – Т. 31. Вып. 6. – С. 103–114.
5. Кахадзе И.Р., Цагарели А.Л., Нуцубидзе К.Ш., Зесашвили В.И. Ниже- и среднеюрские отложения западной части Северного Кавказа и их сопоставление с аналогичными отложениями Грузии // Труды геологического института АН ГССР. – 1957. – Т. 10(15). – С. 28–35.
6. Кликушин В.Г. О триасовых и раннеюрских криноидеях Крыма // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 1988. – Т. 63. – С. 71–79.

7. Крымгольц Г.Я. Аммониты ниже- и среднеюрских отложений Северного Кавказа. Ленинград: Изд-во Ленинградского Университета, 1961. – 166 с.
8. Лихошерст А.Е., Почиталкина И.А. Количественное определение редкоземельных металлов в фосфатном сырье // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35. № 6. – С. 56–58.
9. 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.
10. Ростовцев К.О. Аммониты верхнего тоара Западного Кавказа. / В кн.: Фауна, стратиграфия и литология мезозойских и кайнозойских отложений Краснодарского края (Труды КФВНИИ). – Л.: Недра, 1965. – С. 50–111.
11. Ростовцев К.О. О базальных образованиях байоса бассейнов рек Зеленчук и Кубань // Доклады Академии наук СССР. – 1959. – Т. 126. № 6. – С. 1396–1398.
12. Рубан Д.А. Видовое разнообразие рода *Dumortieria* (Graphoceratidae, Ammonoidea) в верхнетоярских отложениях Большого Кавказа // Вестник Дагестанского научного центра. – 2012. – № 45. – С. 20–22.
13. Семенуха И.Н., Черных В.И., Соколов В.В. и др. Государственная геологическая карта РФ. Объяснительная записка. Масштаб 1:200 000. Серия Кавказская. Лист К-37-VI, (XII). / Ред. А.Н. Письменный. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. – 226 с.
14. Уилсон Дж.Л. Карбонатные фации в геологической истории / пер. с англ. А.С. Арсанова и др. – М.: Недра, 1980. – 463 с.
15. Шишлов С.Б. Структурно-генетический анализ осадочных формаций. – СПб.: ЛЕМА, 2010. – 276 с.
16. Chandler R.B. The graphoceratid ammonite succession in the aalenian and lowest bajocian (Middle Jurassic) at Horn Park, Dorset, UK // Proceedings of the Dorset Natural History and Archaeological Society. – 1997. – Vol. 118. – pp. 85–106.
17. Han K., Han Z., Garzanti E., Zhu S., Yao H., Guo H., Liu X., Wang C. Middle Jurassic ooidal ironstones (southern Tibet): Formation processes and implications for the paleoceanography of eastern Neo-Tethys // Frontiers in Earth Science. – 2023. – Vol. 10. – Art. No. 1055957. DOI: 10.3389/feart.2022.1055957.
18. Kalinina N., Maximov P., Molukpayeva D., Sherstyukov M., Kerimov A.-G., Rudmin M. Depositional palaeoenvironment of the Middle Jurassic (Aalenian) ooidal ironstones in Labino-Malkin zone (north-western Caucasus) // Marine and Petroleum Geology. – 2024. – Vol. 162(5). – Art. No. 106744. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2024.106744.
19. Kato Y., Fujinaga K., Nakamura K. et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements // Nature Geoscience. – 2011. – Vol. 4. – pp. 536–539. DOI: 10.1038/ngeo1185.
20. Lechte M., Halverson G., Wallace M., Gibson T., Hood A.V.S., Wang C.L., Bui T.H., Maloney K., Millikin A. Oolitic ironstones, continental iron flux and reverse weathering in the Proterozoic Eon: Insights from the Tonian Katherine Group, Yukon // Earth-Science Reviews. – 2024. – Vol. 253(3). – Art. No. 104790. DOI: 10.1016/j.earscirev.2024.104790.
21. Mitta V.V., Schweigert G., Sherstyukov M.P., Dietze V. First find of aptychi of *Leioceras* and *Bredya* (Ammonoidea, Hildoceratoidea) in the Aalenian of Northern Caucasus, Russia // Palaontologische Zeitschrift. – 2018. – Vol. 92. Issue 4. – pp. 605–615. DOI: 10.1007/s12542-018-0416-6.
22. Ojo O.J., Bamidele T.E., Adepoju S.A., Akande S.O. Genesis and paleoenvironmental analysis of the ironstone facies of the Maastrichtian Patti Formation, Bida Basin, Nigeria // Journal of African Earth Sciences. – 2021. Vol. 174. – Art. No. 104058. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2020.104058.
23. Papazzoni C.A., Cavalazzi B., Franca Brigatti M., Filipescu S., Foucher F., Medici L., Westall F., Ferretti A. The significance of iron ooids from the middle Eocene of the Transylvanian Basin, Romania // Gondwana Research. – 2022. – Vol. 111. – pp. 64–75.
24. Whicher J., Chandler R.B., Hoffman R. Lytoceratid ammonites from the Inferior Oolite Formation (Middle Jurassic, Aalenian and Bajocian) of Dorset (United Kingdom) // Proceedings of the Geologists' Association. – 2023. – Vol. 134 Issue 2. – pp. 216–245.

References

1. Beznosov N.V. Bajocian and Bathonian deposits of the Northern Caucasus. Proceedings of VNIIGAZ. 1967. Issue 28/36. 179 p. (In Russ.)
2. Beznosov N.V. Materials on the biostratigraphy of the Upper Bajocian-Bathonian deposits of the Northern Caucasus. Proceedings of VNIIGAZ. 1960. Vol. 10. No. 18. pp. 226–253. (In Russ.)
3. Zhivago N.V. Materials on the stratigraphy of the Lower and Middle Jurassic deposits developed in the Kuban and Urup interfluve. Proceedings of VNIIGAZ. 1960. Vol. 10. No. 18. pp. 109–191. (In Russ.)
4. Kazakova V.P. On the stratigraphy of Jurassic deposits of Dagestan. Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Department. 1956. Vol. 31. Issue 6. 1956. pp. 103–114. (In Russ.)
5. Kakhadze I.R., Tsagareli A.L., Nutsbidze K.Sh., Zesashvili V.I. Lower and Middle Jurassic deposits of the western part of the North Caucasus and their comparison with similar deposits of Georgia. Proceedings of the Geological Institute of the Academy of Sciences GSSR. 1957. Vol. 10(15). pp. 28–35. (In Russ.)
6. Klikushin V.G. On the Triassic and Early Jurassic crinoids of Crimea. Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Department. 1988. Vol. 63. pp. 71–79. (In Russ.)
7. Krymgolts G.Ya. Ammonites of the lower and middle Jurassic deposits of the North Caucasus. Leningrad. Leningrad University. 1961. 166 p. (In Russ.)
8. Likhoshester A.E., Pochitalkina I.A. quantitative determination of rare Earth metals in phosphate raw materials. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2021. Vol. 35. No. 6. pp. 56–58. (In Russ.)
9. Parada S.G. Promising Types of Gold Deposits and Ore Occurrences in Southern Russia. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 57–72. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9479. (In Russ.)
10. Rostovtsev K.O. Ammonites of the Upper Toarcian of the Western Caucasus. In: Fauna, Stratigraphy, and Lithology of Mesozoic and Cenozoic Deposits of Krasnodar Krai (Proceedings of the KF VNII). Leningrad. Nedra. 1965. pp. 50–111. (In Russ.)
11. Rostovtsev K. O. On the Bajocian basal formations of the Zelenchuk and Kuban River basins. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1959. Vol. 126. No. 6. pp. 1396–1398. (In Russ.)
12. Ruban D.A. Species diversity of the genus *Dumortieria* (Graphoceratidae, Ammonoidea) in the Upper Toarcian deposits of the Greater Caucasus. *Bulletin of the Dagestan Scientific Center*. 2012. No. 45. pp. 20–22. (In Russ.)
13. Semenukha I.N., Chernykh V.I., Sokolov V.V. et al. State Geological Map of the Russian Federation. Explanatory Note. Scale 1:200,000. Caucasian Series. Sheet K-37-VI, (XII). Ed. A.N. Pismenny. Saint Petersburg. VSEGEI. 2021. 226 p. (In Russ.)
14. Wilson J.L. Carbonate facies in geological history. In: trans. from English by A.S. Arsanova et al. Moscow. Nedra. 1980. 463 p. (In Russ.)
15. Shishlov S.B. Structural and genetic analysis of sedimentary formations. Saint Petersburg. LEMA. 2010. 276 p. (In Russ.)
16. Chandler R.B. The graphoceratid ammonite succession in the aalenian and lowest bajocian (Middle Jurassic) at Horn Park, Dorset, UK. *Proceedings of the Dorset Natural History and Archaeological Society*. 1997. Vol. 118. pp. 85–106.
17. Han K., Han Z., Garzanti E., Zhu S., Yao H., Guo H., Liu X., Wang C. Middle Jurassic ooidal ironstones (southern Tibet): Formation processes and implications for the paleoceanography of eastern Neo-Tethys. *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 10. Art. No. 1055957. DOI: 10.3389/feart.2022.1055957.
18. Kalinina N., Maximov P., Molukpayeva D., Sherstyukov M., Kerimov A.-G., Rudmin M. Depositional palaeoenvironment of the Middle Jurassic (Aalenian) ooidal ironstones in Labino-Malkin zone (north-western Caucasus). *Marine and Petroleum Geology*. 2024. Vol. 162(5). Art. No. 106744. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2024.106744.
19. Kato Y., Fujinaga K., Nakamura K. et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*. 2011. Vol. 4. pp. 536–539. DOI: 10.1038/ngeo1185.
20. Lechte M., Halverson G., Wallace M., Gibson T., Hood A.V.S., Wang C.L., Bui T.H., Maloney K., Millikin A. Oolitic ironstones, continental iron flux and reverse weathering in the Proterozoic Eon:

Insights from the Tonia Katherine Group, Yukon. *Earth-Science Reviews*. 2024. Vol. 253(3). Art. No. 104790. DOI: 10.1016/j.earscirev.2024.104790.

21. Mitta V.V., Schweigert G., Sherstyukov M.P., Dietze V. First find of aptychi of *Leioceras* and *Bredya* (Ammonoidea, Hildoceratoidea) in the Aalenian of Northern Caucasus, Russia. *Palaontologische Zeitschrift*. 2018. Vol. 92. Issue 4. pp. 605–615. DOI: 10.1007/s12542-018-0416-6.

22. Ojo O.J., Bamidele T.E., Adepoju S.A., Akande S.O. Genesis and paleoenvironmental analysis of the ironstone facies of the Maastrichtian Patti Formation, Bida Basin, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*. 2021. Vol. 174. Art. No. 104058. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2020.104058.

23. Papazzoni C.A., Cavalazzi B., Franca Brigatti M., Filipescu S., Foucher F., Medici L., Westall F., Ferretti A. The significance of iron ooids from the middle Eocene of the Transylvanian Basin, Romania. *Gondwana Research*. 2022. Vol. 111. pp. 64–75.

24. Whicher J., Chandler R.B., Hoffman R. *Lytoceratid ammonites from the Inferior Oolite Formation (Middle Jurassic, Aalenian and Bajocian) of Dorset (United Kingdom)*. *Proceedings of the Geologists' Association*. 2023. Vol. 134. Issue 2. pp. 216–245.

УДК 528.88:551.4

DOI: 10.46698/VNC.2026.35.96.001

Оригинальная статья

Морфометрический анализ Донецкого складчатого сооружения в связи с проблемой рудоносности

С.Г. Парада[✉], И.В. Рыбин[✉], И.В. Шевердяев[✉]

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,

г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41,

e-mail: segripa@rambler.ru, rybin@ssc-ras.ru, sheverdiev@ssc-ras.ru

Статья поступила: 20.08.2026, доработана: 15.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы определяется важностью изучения взаимосвязи морфометрических особенностей рельефа Донецкого складчатого сооружения (ДСС) в связи с размещением месторождений и рудопроявлений золота и цветных металлов, что составит научно-методическую основу применения морфометрических методов исследования при прогнозировании и поисках слепых и погребённых рудных скоплений. **Цель исследования:** выявить морфометрические особенности рельефа ДСС в связи с особенностями геологического строения, неотектоники и пространственным размещением золотого и полиметаллического оруденения. **Методы исследования:** морфотектонический анализ на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM3) с разрешением пикселя в 90 м, использование математических методов обработки с применением программного комплекса ArcGIS ArcMap 10.4 с установленной лицензией ArcInfo плавающей версии и вспомогательным модулем гидрологической направленности «ArcHydroTools». **Результаты исследования:** Осуществлён морфотектонический анализ цифровой модели рельефа дневной поверхности Донецкого складчатого сооружения. Построены карты изовершинных и изобазисных поверхностей на основе анализа долин 1-го, 2-го, 3-го, 4-го и 5-го порядков, а также карты глубины эрозионного расчленения (энергии) рельефа соответствующих пяти порядков. На картах энергии рельефа, отстроенных по долинам 1-го порядка с изолиниями отдельно через 10 м и отдельно через 25 м, впервые для Донбасса выделено относительно слабо выраженное, слегка вытянутое в запад-северо-западном направлении куполовидное неотектоническое поднятие. В его пределах выделены три расположенные концентрически геоморфологические зоны. Приуроченность всех известных в Донбассе проявлений интрузивного магматизма, месторождений и рудопроявлений цветных металлов и золота к выделенному поднятию позволяет предполагать, что выявленная глубинная неоднородность может представлять собой проекцию активизированного в неогене мантийного плюма, вызвавшего в мезозое появление обширной области проявления рудно-магматических систем в нижних горизонтах земной коры Донбасса. Вытянутость вдоль оси поднятия рудных районов и узлов может быть связана с условиями транспортировки и разгрузки рудоносных растворов по Персиановскому, Сулино-Константиновскому и другим глубинным разломам. Формирование неотектонического поднятия обеспечило в различных его геоморфологических зонах выведение на дневную поверхность разных уровней рудно-магматической колонны золото-полиметаллического оруденения: надрудного в краевой, рудного в промежуточной и подрудного в центральной.

Ключевые слова: гидрографическая сеть, Донбасс, изобазисная поверхность, изовершинная поверхность, морфометрический анализ, пространственный анализ, энергия рельефа.

Благодарности: Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гос. рег. 125011700412-6.

Для цитирования: Парада С.Г., Рыбин И.В., Шевердяев И.В. Морфометрический анализ Донецкого складчатого сооружения в связи с проблемой рудоносности. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.35.96.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.35.96.001

Original paper

Morphometric analysis of the Donetsk folded structure in connection with the ore-bearing potential

S.G. Parada^{ORCID}, I.V. Rybin^{ORCID}, I.V. Sheverdyayev^{ORCID}

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

Received: 20.08.2026, revised: 15.09.2026, accepted:2026

Abstract: The relevance of the work is determined by the importance of studying the relationship of morphometric features of the relief of the Donetsk folded structure (DFS) in connection with the placement of deposits and ore occurrences of gold and non-ferrous metals, which will form the scientific and methodological basis for the use of morphometric research methods in predicting and searching for blind and buried ore accumulations. **The aim** of the study: to identify the morphometric features of the DFS relief in connection with the features of the geological structure, neotectonics and spatial distribution of gold and polymetallic mineralization. **Methods:** morphotectonic analysis based on digital terrain models (DTM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM3) with a pixel resolution of 90 m, the use of mathematical processing methods using the ArcGIS ArcMap 10.4 software complex with an installed floating license for ArcInfo and an auxiliary hydrological module "ArcHydroTools". **Results.** Morphotectonic analysis of the digital model of the land surface of the Donetsk folded structure was carried out. Maps of summit surfaces and base-level surfaces were constructed based on the analysis of valleys of the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th orders, as well as maps of the depth of erosion dissection (energy) of the relief of the corresponding five orders. On the relief energy maps, rebuilt along the 1st order valleys with isolines separately after 10 m and separately after 25 m, for the first time for Donbas, a relatively weakly expressed, slightly elongated to the west-north-west direction, dome-shaped neotectonic uplift was identified. Within its boundaries, three concentrically located geomorphological zones are distinguished. The coincidence of all the manifestations of intrusive magmatism, deposits and ore occurrences of non-ferrous metals and gold known in Donbas to the identified uplift suggests that the identified deep heterogeneity may be a projection of the mantle plume activated in the Neogene, which caused the appearance of a vast area of the manifestation of ore-magmatic systems in the lower horizons of the Earth's crust of Donbas in the Mesozoic. The elongation along the axis of the uplift of ore areas and nodes can be associated with the conditions for transporting and unloading ore-bearing solutions along the Persianovsky, Sulino-Konstantinovsky and other deep faults. The formation of a neotectonic uplift ensured in its various geomorphological zones the bringing to the daytime surface of different levels of the ore-magmatic column of gold-polymetallic mineralization: supra-ore in the marginal, ore in the intermediate and sub-ore in the central.

Keywords: hydrographic network, Donbas, base-level surface, summit surface, morphometric analysis, spatial analysis, energy of relief.

Acknowledgements: The paper was prepared as part of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences implementation state assignment, state registration No. 125011700412-6.

For citation: Parada S.G., Rybin I.V., Sheverdyayev I.V. Morphometric analysis of the Donetsk folded structure in connection with the ore-bearing potential. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.35.96.001

Введение

Донецкое складчатое сооружение (ДСС) расположено в центральной части Днепрово-Донецкого авлакогена (рис. 1). ДСС в рельефе Днепрово-Донецкого авлакогена выделяется довольно отчётливо как его наиболее приподнятая часть. В геоморфологическом отношении ДСС представляет собой возвышенность, расчленённую водотоками разных порядков, известную под названием Донецкий кряж. В связи с этим возникает предположение о неотектоническом (конэрозионном по [Костенко, 1999]) поднятии, которое привело к формированию данной возвышенности.

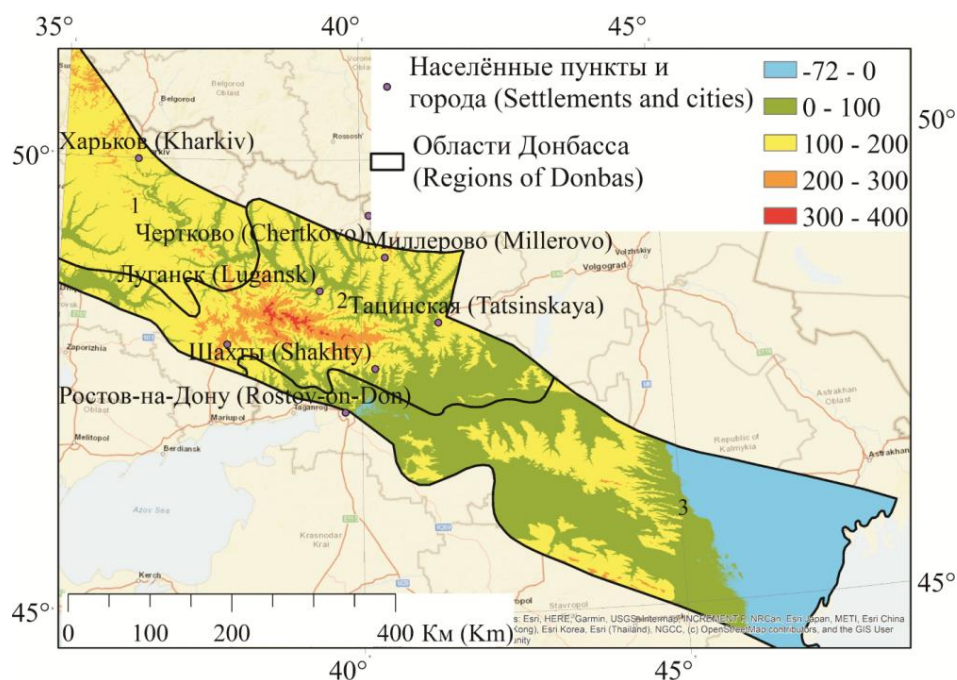


Рис. 1. Расположение ДСС в системе Днепрово-Донецкого авлакогена (высоты приведены в метрах). 1 – Днепрово-Донецкая впадина; 2 – ДСС (Донецкий угольный бассейн); 3 – Вал Карпинского /

Fig. 1. Location of the DFS in the Dnieper-Donetsk aulacogen system (heights are given in meters). 1 – Dnieper-Donetsk depression; 2 – DFS (Donetsk coal basin); 3 – Karpinsky shaft

В металлогеническом отношении ДСС представляет собой металлоносную провинцию с месторождениями и рудопроявлениями цветных металлов и золота. В наиболее приподнятой (западной) части Донецкого кряжа, именуемой отдельно Нагольным кряжем, известны месторождения ртути, свинца и цинка, серебра и золота. По современным оценкам [Дышук, 2025], ресурсная база этой части ДСС (в пределах Луганской и Донецкой народных республик) может составить 108 т золота, 1244 т серебра и 550 тыс. т суммы свинца и цинка. В восточной части ДСС (в пределах Ростовской области) имеются пока лишь предварительно оценённые рудопроявления цветных металлов и золота. По данным [Невалённый, Зеленщиков, 2005] ресурсы золота в этой части ДСС могут составить первые сотни тонн. При этом предварительно оценённые запасы благородного металла наиболее изученного Керчикского рудопроявления превышают 50 т, что соответствует крупному золоторудному месторождению.

Металлогенические особенности восточной и западной частей ДСС заметно отличаются, прежде всего, наличием или отсутствием интрузивного магматизма. Так, в восточной части ДСС все рудопроявления располагаются в пределах ареалов распространения юрских интрузивных пород [Парада, Гамбург, 2023; Парада, 2024], в то время как в западной его части проявления интрузивного магматизма не обнаружены.

В связи с изложенным возникает необходимость в определении степени влияния неотектонических движений на металлогенические особенности западной и восточной частей ДСС и принадлежности месторождений и рудопроявлений к единой или разным металлогеническим системам.

Использованные ранее геологические и геофизические методы не дали однозначного ответа на поставленный вопрос. В настоящей статье предпринята попытка использовать с указанной целью геоморфологические методы исследования.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью разработки научно-методической основы применения геоморфологических методов при металлогенических исследованиях складчатых систем. Цель исследования: выявить морфометрические особенности рельефа ДСС в связи с геологическим строением, неотектоникой, магматизмом и пространственным размещением золотого и полиметаллического оруденения.

Материал и методы

Морфометрические характеристики ДСС получены с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР) *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM3)*, которые обладали особенностью глобального охвата, с разрешением пикселя в 90 м, что вполне позволяет идентифицировать необходимые крупные структуры [Философов, 1960; 1975]. Сегодня существует великое множество типов ЦМР, таких как *GTOPO*, *ASTER*, *Earth2014*, *GMTED2010*, *SRTM3*, *OEM*, *COP DEM* и многие другие. Цифровой формат исходных данных позволяет использовать математические методы для их обработки, а также применение современных геоинформационных технологий. Использованы также материалы по геологическому строению и золотоносности отдельных участков, содержащихся в производственных отчётах о поисковых работах на рудное золото и другие полезные ископаемые. Обработка информации осуществлялась с применением программного комплекса *ArcGIS*, включая *ArcMap 10.4* с установленной лицензией *ArcInfo* плавающей версии и вспомогательным модулем гидрологической направленности «*ArcHydroTools*».

Неотектоническая природа Донецкого кряжа предполагает возможность применения геоморфологических методов исследования ДСС. Одним из таких методов является морфотектонический анализ [Философов, 1960; Корженевский, Философов, 1963; Симонов, 1972; Костенко, 1999], позволяющий выявлять связи между формами рельефа, неотектоническими и современными движениями. Данный метод показал свою эффективность при металлогенических исследованиях [Парада, 2008; Ермолаев, Семёнов, 2014; Рыбин и др., 2025].

Метод основан на построении изобазисных и изовершинных поверхностей с последующим построением карты величин эрозионного вреза (энергии) рельефа по [Панов, 1966; Философов, 1967]. При этом порядок гидрографической сети определялся по методу Хортон-Стралера [Horton, 1932; Strahler, 1958]. При создании изобазисной поверхности находились места пересечения линий тальвегов речных долин и изолиний абсолютных отметок рельефа в пределах одного конкретного порядка. При построении изовершинных поверхностей применялась идентичная методика. Отличие состояло в том, что определялись точки пересечения водораздельных линий хребтов с изолиниями рельефа. Проведённое исследование охватывало всю площадь ДСС, а также части примыкающих к нему с северо-запада Днепровско-Донецкой впадины и с юго-востока – Вала Карпинского, что в сумме составило более 10200 км².

Технологии построения растровых изображений изобазисных и изовершинных поверхностей разных порядков, а также построения карт энергии рельефа в среде программного комплекса *ArcGIS ArcMap 10.4*, подробно изложены в работе [Рыбин, Шервядев, 2023].

Результаты и обсуждение

Всего отстроено пять комплектов карт по долинам 1-го, 2-го, 3-го, 4-го и 5-го порядков. На рисунке 2 приведены для примера три комплекта таких карт, отстроенных для исследованной площади по долинам 1-го, 3-го и 5-го порядков.

На картах глубины расчленения (энергии) рельефа, отстроенных по долинам 1-го порядка через 10 м и через 25 м, выделяется слабо выраженное относительно изометричное, слегка вытянутое в запад-северо-западном направлении куполовидное поднятие (рис. 3), представляющее неотектоническую структуру конэрозионного типа развития, согласно классификации [Костенко, 1999]. Протяжённость структуры не менее 190 км, ширина – не менее 96 км.

В пределах выявленного поднятия можно выделить три геоморфологические зоны, расположенные концентрически и отражающие изменения скорости неотектонического поднятия. Внутренняя зона протяжённостью 90 км и шириной 66 км с максимальными абсолютными отметками высот более 250 м. Она характеризуется относительно слабым вертикальным расчленением (энергией) рельефа (менее 25 м), что может свидетельствовать о её формировании в условиях морфологического зарождения свода при ещё относительно небольших превышениях скорости тектонического поднятия над скоростью денудации.

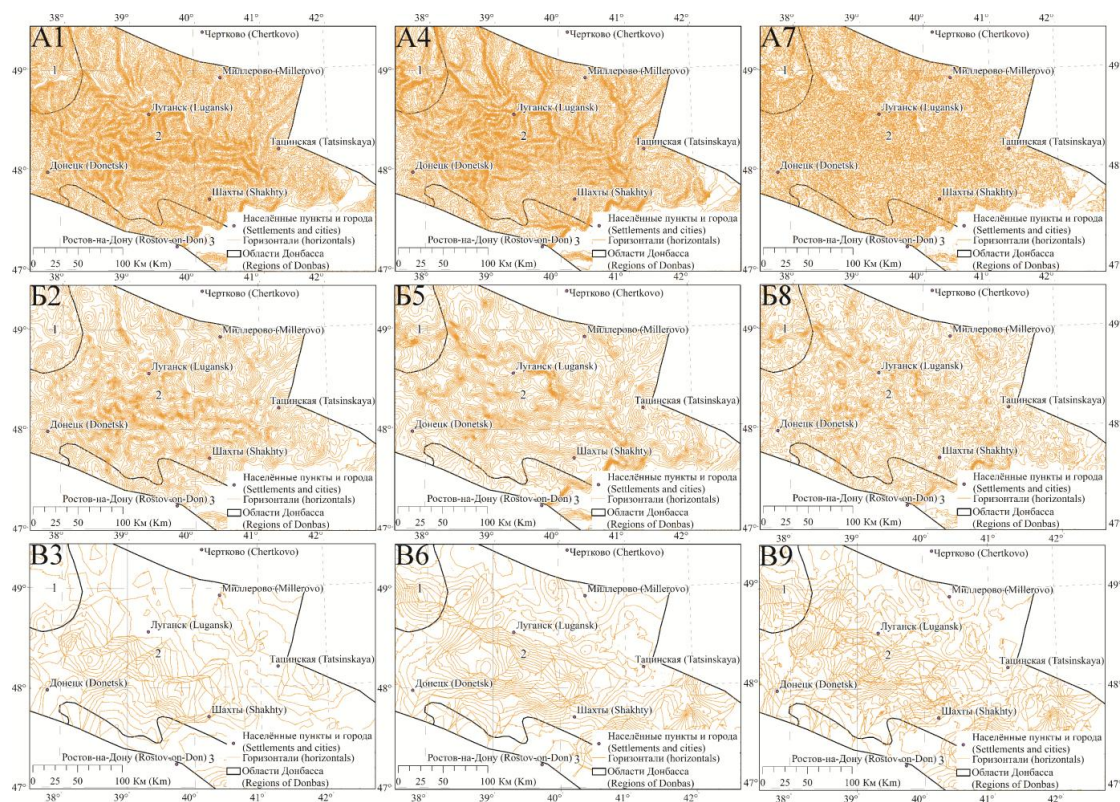


Рис. 2. Примеры карт отстроенных изобазисных (1–3), изовершинных (4–6) поверхностей и энергии рельефа (7–9) для долин 1-го (А), 3-го (Б) и 5-го (В) порядков в изолиниях через 10 метров.

1 – Днепрово-Донецкая впадина; 2 – Донецкое складчатое сооружение; 3 – Вал Карпинского /

Fig. 2. Examples of maps of rebuilt isobase (1–3), isoversical (4–6) surfaces and relief energy (7–9) for valleys of the 1st (A), 3rd (B) and 5th (B) orders in isolines after 10 meters.

1 – Dnieper-Donetsk depression; 2 – Donetsk folded structure; 3 – Karpinsky shaft

Внутреннюю зону поднятия окружает промежуточная зона с максимальной шириной 23 км, и минимальной – 6 км. Она характеризуется относительно малой глубиной

расчленения рельефа (менее 15 м), что может быть связано с резким возрастанием скорости восходящих движений, что привело к значительному отставанию глубинной регрессивной эрозии на склонах быстро растущего поднятия и, как следствие, к изоляции реликтового рельефа в промежуточной зоне общего поднятия. Этот, по сути, реликтовый рельеф продолжает существовать в новых условиях, обусловленных изоляцией от своего регионального базиса денудации.

Внешняя зона поднятия шириной от 7 км (на востоке) до 40 км (на западе) характеризуется наибольшей глубиной эрозионного расчленения рельефа (более 45 м), что связано с возрастанием скорости неотектонического воздымания на завершающем этапе развития пликативной неотектонической структуры.

Следующая, внешняя (условно предгорная) зона соответствует склонам впадин. В этой зоне режим конэрозионного неотектонического воздымания сменяется режимом конаккумулятивного неотектонического погружения. Рельеф этой зоны выположенный. Здесь можно ожидать аккумулятивные образования, сформированные за счёт сносимых со склонов растущего поднятия продуктов денудации.

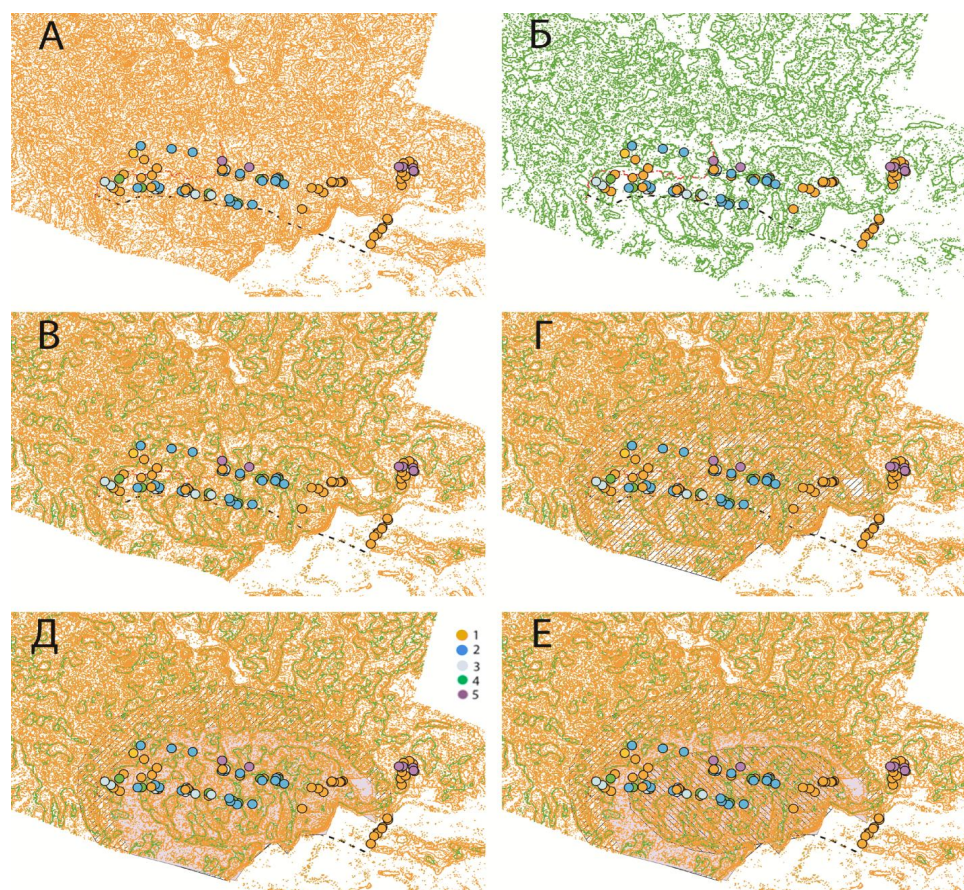


Рис. 3. Карты изолиний глубины расчленения (энергии) рельефа, отстроенные по долинам 1-го порядка отдельно через 10 м (А) и через 25 м (Б), с совмещением изолиний через 10 и 25 м (В), в том числе с отображением куполовидного неотектонического поднятия (Г) с выделенной отдельно периферической зоной (Д), с выделением дополнительно промежуточной и центральной (Е) зон. 1–5 – месторождения и рудопроявления золота и цветных металлов: 1 – золота; 2 – свинца и цинка; 3 – цинка; 4 – меди; 5 – железа /

Fig. 3. Maps of isolines of the depth of dissection (energy) of the relief, rebuilt along the 1st order valleys separately after 10 m (A) and after 25 m (B), with the alignment of isolines after 10 and 25 m (B), including the display of a dome-shaped neotectonic uplift (Г) with a separate peripheral zone (Д), with the allocation of an additional intermediate and central (E) zones. 1–5 – deposits and ore occurrences of gold and non-ferrous metals: 1 – gold; 2 – lead and zinc; 3 – zinc; 4 – copper; 5 – iron

В геологическом отношении выделенная площадь представляет куполовидное поднятие, вытянутое в запад-северо-западном направлении с отношением длины к ширине менее 2. Направление вытянутости поднятия соответствует простиранию всего Днепро-Донецкого авлакогена в целом и ДСС в частности. В геологическом строении ДСС на доступных для изучения глубинах конформной брахиантиклинали глубинной структуры не обнаружено. Из всех полученных трансформант потенциальных полей, выявленному по геоморфологическим признакам поднятию более всего соответствует фоновая компонента гравитационного поля [Давыденко, Парада, 2021]. В этом месте отрицательная в целом аномалия гравитационного поля образует положительную структуру в связи с уменьшением абсолютных значений по направлению к центру неотектонического поднятия. В западной части Донбасса, выявленная морфоструктура также находит отражение в аномальном поле, образующем положительную структуру регионального масштаба на фоне общего отрицательного гравитационного поля [Буланцен и др., 2019]. Обе охарактеризованные структуры гравитационного поля выявлены разными исследователями в разное время. Тем не менее, они хорошо сочленяются между собой. Результаты описанных сопоставлений указывают на возможное наличие глубинной структурно-вещественной неоднородности регионального масштаба, расположенной под выявленным нами неотектоническим куполовидным поднятием.

Приуроченность всех известных в Донбассе проявлений интрузивного магматизма, месторождений и рудопроявлений цветных металлов и золота к выделенному нами неотектоническому поднятию позволяет предположить, что выявленная глубинная неоднородность может быть связана с неоактивизацией долгоживущего мантийного плюма, вызвавшего в мезозое появление обширной области проявлений магматизма в нижних горизонтах земной коры Донбасса. Вытянутость вдоль оси поднятия рудных районов и узлов может быть связана с условиями транспортировки и разгрузки рудоносных растворов по долгоживущим глубинным Персиановскому, Сулино-Константиновскому и другим разломам.

Заключение

Исходя из существующих представлений о рудно-магматических системах [Prokofiev, Naumov, 2020; Goldfarb, Pitcairn, 2023], выявленная нами неотектоническая структура не может иметь генетического отношения к зарождению мезозойских рудно-магматических систем Донбасса. Однако формирование этой структуры обеспечивает выведение на дневную поверхность различных по продуктивности зон единой рудно-магматической колонны. Так, например, Бобриковское месторождение, располагаясь на западном склоне неотектонического поднятия в промежуточной геоморфологической зоне, представляет собой наиболее продуктивную надинтрузивную зону рудно-магматической системы. Именно поэтому там не выявлены проявления магматических пород. В то же время Керчикское рудопроявление, располагаясь в центральной части неотектонического поднятия в его центральной геоморфологической зоне с широким развитием магматических пород, представляет наиболее денудированную часть рудно-магматической колонны, характеризующуюся меньшей продуктивностью.

Выявленные закономерности могут составить научно-методическую основу разработки геоморфологических методов поиска и оценки эндогенного оруденения цветных металлов и золота.

Литература

1. Буланцен В.Г., Халявина Л.Я., Борисюк Т.Е. Характеристики гравитационного поля прогнозных нефтегазоносных площадей ДДВ по данным спутниковой модели EGM08 и гравиметрических измерений начала XX века // Геофизический журнал. – 2019. – Т. 41. № 1. – С. 95–107. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158866.

2. Давыденко Д.Б., Парада С.Г. Опыт разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 22–37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003.
3. Дышук М.Ю. Геолого-промышленная характеристика золото-полиметаллического оруденения Нагольного рудного района // Труды РАНИМИ. – 2025. – № 5(43). – С. 142–154. DOI: 10.24412/2519-2418-2025-543-142-154.
4. Ермолаев О.П., Семёнов Ф.В. Использование цифровых моделей рельефа для морфометрического анализа тектонических структур и поиска россыпей аллювиального генезиса // География и природные ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 142–147.
5. Корженевский А.А., Философов В.П. Морфометрический метод при геологических исследованиях // Материалы Первого межведомственного совещания по морфометрическому методу поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1963. – 263 с.
6. Костенко Н.П. Геоморфология: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 379 с.
7. Невалённый Ю.В., Зеленчиков Г.В. Ресурсы металлических полезных ископаемых // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. – С. 71–84.
8. Панов Д.Г. Общая геоморфология. – М.: Изд-во Высшая школа, 1966. – 427 с.
9. Парада С.Г. Влияние глубины расчленения рельефа на гранулометрический состав золота в россыпях // Геоморфология. – 2008. – № 4. – С. 48–54.
10. Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 95–105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008.
11. Парада С.Г. Чернореченское рудопроявление золота (Восточный Донбасс) // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 112–124. DOI: 10.46698/k7180-2394-5711-d.
12. Рыбин И.В., Шевердяев И.В. Морфометрические исследования средствами пространственного анализа на примере Днепровско-Донецкого авлакогена. // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84. № 4. – С. 28–38. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-28-38.
13. Рыбин И.В., Шевердяев И.В., Мисиров С.А. Морфометрический анализ как метод поиска минерального сырья на примере Днепровско-Донецкого авлакогена // Геодезия и картография. – 2025. – № 4. – С. 48–55. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1018-4-48-55.
14. Симонов Ю.Г. Региональный геоморфологический анализ. – М.: Изд-во Московского университета, 1972. – 255 с.
15. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1960. – 93 с.
16. Философов В.П. Значение карты потенциальной энергии рельефа для геоморфологических и неотектонических исследований // Методы геоморфологических исследований. – Новосибирск: Наука, 1967. – С. 193–198.
17. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1975. – 232 с.
18. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? // Mineralium Deposita. – 2023. – Vol. 58. – pp. 5–35. DOI: 10.1007/s00126-022-01146-8.
19. Horton R.E. Drainage basin characteristics // Transactions American Geophysical Union. – 1932. – Vol. 13. – pp. 350–361.
20. Prokofiev V.Yu., Naumov V.B. Physicochemical parameters and geochemical features of ore-forming fluids for orogenic gold deposits throughout geological time // Minerals. – 2020. – Vol. 10(1). Issue 50. – pp. 1–38. DOI: 10.3390/min10010050.
21. Strahler A.N. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms // Geological Society of America Bulletin. – 1958. – Vol. 69. – pp. 279–300.

References

1. Bulatsen V.G., Khalyavina L.Ya., Borisyuk T.E. Characteristics of the gravity field of predictive oil-gas areas in the DDD region according to satellite model EGM08 and gravity measurements at the beginning of the XX century. Geophysical Journal. 2019. Vol. 41. No. 1. pp. 95–107. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158866. (In Russ.)

2. Davydenko D. B., Parada S. G. Experience of Dividing Potential Fields of Donbass into Background, Residual and Local Components and some Results of Interpretation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 22 – 37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003. (In Russ.)
3. Dyshchuk M. Yu. Geological and industrial characteristics of gold-polymetallic mineralization of the Nagolny ore region. *Transactions of RANIMI*. 2025. No. 5(43). pp. 142–154. DOI: 10.24412/2519-2418-2025-543-142-154. (In Russ.)
4. Ermolaev O.P., Semenov F.V. Use of digital terrain models in morphometric analysis of tectonic structures and prospecting of placers of alluvial genesis. *Geography and Natural Resources*. 2014. No. 1. pp. 142–147. (In Russ.)
5. Korzhenevsky A.A., Filosofov V.P. Morphometric Method in Geological Research. In: *Proceedings of the First Interdepartmental Conference on the Morphometric Method for Searching for Tectonic Structures*. Saratov. Saratov University Press. 1963. 263 p. (In Russ.)
6. Kostenko N.P. *Geomorphology: a textbook for universities*. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow. Moscow State University. 1999. 379 p. (In Russ.)
7. Nevalyon Y.V., Zelenshchikov G.V. Metal mineral resources. In: *Problems and Prospects for the Integrated Development of Mineral Resources in the Eastern Donbass*. Rostov-on-Don. Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2005. pp. 71–84. (In Russ.)
8. Panov D.G. *General Geomorphology*. Moscow. Vysshaya Shkola. 1966. 427 p. (In Russ.)
9. Parada S.G. The influence of the depth of relief dissection on the particle-size distribution of gold in placers. *Geomorphology*. 2008. No. 4. pp. 48–54. (In Russ.)
10. Parada S.G., Hamburg K.Yu. Ore-magmatic Systems of Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 95–105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008. (In Russ.)
11. Parada S.G. Chernorechensk gold ore deposit (Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 112–124. DOI: 110.46698/k7180-2394-5711-d. (In Russ.)
12. Rybin I.V., Sheverdyaev I.V. Morphometric studies through spatial analysis using the example of the Dnieper-Donets Aulacogen. *Geodesy and Cartography*. 2023. Vol. 84. No. 4. pp. 28–38. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-28-38. (In Russ.)
13. Rybin I.V., Sheverdyaev I.V., Misirov S.A. Morphometric analysis as a method of searching for mineral raw materials using the example of the Dnieper-Donetsk Aulacogen. *Geodesy and Cartography*. 2025. No. 4. pp. 48–55. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1018-4-48-55. (In Russ.)
14. Simonov Yu.G. *Regional Geomorphological Analysis*. Moscow. Publishing House of Moscow University. 1972. 255 p. (In Russ.)
15. Filosofov V.P. *A Brief Guide to the Morphometric Method of Searching for Tectonic Structures*. Saratov. Saratov University Press. 1960. 93 p. (In Russ.)
16. Filosofov V.P. The significance of the relief potential energy map for geomorphological and neotectonic studies. In: *Methods of geomorphological research*. Novosibirsk. Nauka. 1967. pp. 193–198. (In Russ.)
17. Filosofov V.P. *Fundamentals of the morphometric method for searching for tectonic structures*. Saratov. Saratov University Press. 1975. 232 p. (In Russ.)
18. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineralium Deposita*. 2023. Vol. 58. pp. 5–35. DOI: 10.1007/s00126-022-01146-8.
19. Horton R.E. Drainage basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*. 1932. Vol. 13. pp. 350–361.
20. Prokofiev V.Yu., Naumov V.B. Physicochemical parameters and geochemical features of ore-forming fluids for orogenic gold deposits throughout geological time. *Minerals*. 2020. Vol. 10(1). Issue 50. pp. 1–38. DOI: 10.3390/min10010050.
21. Strahler A.N. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. *Geological Society of America Bulletin*. 1958. Vol. 69. pp. 279–300.

УДК 550.361

DOI: 10.46698/VNC.2026.35.90.001

Оригинальная статья

Двух- и трехмерные модели геотермического поля Каспийского моря

М.Д. Хуторской¹, В.Ю. Керимов^{2,3}, С.А. Гурянов², Р.Н. Мустаев²

¹ Геологический институт РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1,
e-mail: mdkh1@yandex.ru;

² Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе, Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23;

³ Институт нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской
Республики, Республика Азербайджан, AZ 1000, г. Баку, ул. Ф. Амирова, 9

Статья поступила: 25.04.2026, доработана: 05.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Геолого-экономическое значение акватории Каспийского моря определяется существующими большими нефтегазовыми ресурсами и будет возрастать по мере освоения уже открытых и выявления новых месторождений. В условиях ограниченности инвестиционных ресурсов для проведения дорогостоящих геолого-геофизических исследований в осадочном бассейне приобретают практическое значение относительно недорогие методы косвенной оценки перспектив нефтегазоносности на базе уже имеющихся геолого-геофизических данных. Один из таких методов – это термотомографическое отображение земной коры на основе двух- и трехмерного геотермического моделирования. Построение линейных (двухмерных) и объемных (трехмерных) моделей распределения температур и теплового потока (ТП) позволяет получить карты-срезы геотермического поля на любой глубине и таким образом определить уровень, на котором существуют условия для катагенетического преобразования органического вещества, т.е. в первом приближении возможно прогнозировать глубину размещения месторождений. **Методы исследования.** 1) обзор изученности и составление новой карты регионального теплового потока акватории Каспия и окружающей суши на базе анализа новейшей глобальной базы данных; 2) обоснование задания граничных условий и проведение двухмерного моделирования температурного поля вдоль геотраверсов; 3) построение термотомографических моделей глубинных температур. **Результаты работы.** Проанализировано региональное распределение ТП в рамках классификации условий измерения по глубине моря. Вдоль длинных сейсмических геотраверсов выполнено двухмерное моделирование геотемпературного поля и определены глубинные температуры в верхнемеловых и кайнозойских отложениях осадочного чехла до глубины 4–5 км. Для Южно-Каспийской впадины построена 3D-модель глубинных температур и приводятся карты-срезы температур на глубине 5 и 10 км. Термотомографическое моделирование дает дополнительную информацию для прогнозирования и поисково-разведочных работ на углеводородное сырье.

Ключевые слова: Каспийское море, температура, тепловой поток, численное моделирование, термическая томография, катагенез.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Госбюджетной темы ГИН РАН № 122012700311-2.

Для цитирования: Хуторской М.Д., Керимов В.Ю., Гурянов С.А., Мустаев Р.Н. Двух- и трехмерные модели геотермического поля Каспийского моря. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.35.90.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.35.90.001

Original paper

2D and 3D models of the geothermal field of the Caspian Sea

M.D. Khutorskoy¹, V.Yu. Kerimov^{2,3}, S.A. Guryanov², R.N. Mustaev²

¹ Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7/1 Pyzhevskiy Lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: mdkh1@yandex.ru;

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 23 Miklouho-Maclay Str., Moscow 117997, Russian Federation;

³ Oil and Gas Institute, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, 9 F. Amirov Str., Baku AZ 1000, Azerbaijan

Received: 25.04.2026, revised: 05.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The geological and economic significance of the Caspian Sea offshore area is determined by its existing large oil and gas resources and will increase with the development of already discovered and the identification of new fields. In conditions of limited investment resources for expensive geological and geophysical surveys in the sedimentary basins, relatively inexpensive methods for indirect assessment of hydrocarbon potential based on existing geological and geophysical data are becoming practically important. One such method is thermotomographic imaging of the Earth's crust based on two- and three-dimensional geothermal modeling. The construction of linear (two-dimensional) and volumetric (three-dimensional) models of temperature and heat flow (HF) distribution allows for the creation of cross-section maps of the geothermal field at any depth, and thus to determine the level at which conditions exist for the organic matter catagenetic transformation, i.e., as a first approximation, it is possible to predict the depth of hydrocarbon deposit placement. **Research methods.** 1) Review of existing studies and compilation of a new map of the regional heat flow of the Caspian Sea offshore area and surrounding land based on the analysis of the latest global database; 2) Justification of boundary condition assignment and execution of two-dimensional temperature field modeling along geotraverses; 3) Construction of thermotomographic models of subsurface temperatures. **Results.** The regional distribution of HF has been analyzed within the classification of measurement conditions by sea depth. Two-dimensional modeling of the geothermal field has been performed along long seismic geotraverses, and subsurface temperatures in the Upper Cretaceous and Cenozoic deposits of the sedimentary cover down to a depth of 4–5 km have been determined. For the South Caspian Basin, a 3D model of subsurface temperatures has been constructed, and cross-section maps of temperatures at depths of 5 and 10 km are presented. Thermotomographic modeling provides additional information for hydrocarbon exploration and prospecting.

Keywords: Caspian Sea, temperature, heat flow, numerical modeling, thermal tomography, catagenesis.

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the State Budgetary Theme of the GIN RAS No. 122012700311-2.

For citation: Khutorskoy M.D., Kerimov V.Yu., Guryanov S.A., Mustaev R.N. 2D and 3D models of the geothermal field of the Caspian Sea. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.35.90.001

Введение

Количественные геотермические параметры: температура, геотермический градиент, плотность теплового потока, теплофизические свойства горных пород и отдельных геосфер, измеряемые прямыми методами или оцениваемые косвенно, дают важную информацию о термодинамическом состоянии Земли, о планетарном энергетическом

балансе и энергетике геолого-геофизических процессов, о фазовом состоянии вещества, и, в конечном итоге, о природе движущих сил тектогенеза. Не менее важны и прикладные аспекты исследования геотермического поля. Они связаны, с одной стороны, с оценкой геотермальных ресурсов для их использования в энергетике, теплоснабжении, коммунальном и сельском хозяйстве, а с другой – с применением геотермического метода поисков и разведки рудных и нефтегазовых месторождений на континентах и на акваториях в комплексе с другими геолого-геохимико-геофизическими методами.

Количество измерений на акваториях еще в 70-е годы XX века превысило число континентальных измерений и очень быстро увеличивалось. Если в 1975 г. число измерений в глубоководных частях акваторий приближалось к 4000, то в 1990 г. их было уже более 10 тыс., а в последние годы насчитывается 41 500 [Fuchs et al., 2024]. Однако кондиционных высокоточных измерений теплового потока в средне- и мелкоглубинных акваториях насчитывается относительно немного. Это связано с методическими трудностями при выделении глубинного сигнала на фоне экзогенных искажений, обусловленных сезонными изменениями температуры морского дна и придонного слоя воды в неглубоких акваториях.

В этой связи, акватория Каспийского моря по своим геоморфологическим критериям разделяется на два класса. К «среднеглубинным акваториям» относятся районы Южно-Каспийского бассейна и, частично, Средний Каспий. Но большая часть этого сектора и, особенно, Северный сектор моря относятся к «мелкоглубинным акваториям» и до сих пор остаются «белыми пятнами» в геотермическом отношении.

Данные о тепловом потоке, измеренном в Южно-Каспийском бассейне Каспийского моря, относятся к классу «среднеглубинных измерений». Такие данные получены в глубоких (нешельфовых) внутренних и окраинных морях, на континентальных склонах, в глубоких озерах (Байкал, Танганьика). Диапазон глубин в этой группе изменяется от 300 до 1500 м. При таких глубинах необходимо анализировать изменчивость температуры в водной толще и особенно в придонном слое. Рекомендуется использование многоканальных термозондов для фиксирования возможной нелинейности термограммы в донных осадках и инверсии температуры в придонном слое воды. Получение этой информации дает возможность оценить неискаженное значение геотермического градиента. Погрешность для этой группы измерений составляет 10–15%. Она зависит как от вышеперечисленных условий, так и от кривизны термограммы и влияния конвективной составляющей.

Единичные станции теплового потока, зафиксированные в Северном Каспии, относятся к классу «мелкоглубинных измерений». Они приурочены к районам неглубокого шельфа морей и океанов, а также к неглубоким озерам. Эти измерения искажены влиянием экзогенного фактора, и для выделения глубинного сигнала требуется заглубление зонда на несколько метров в донные осадки (иногда такого заглубления удастся достичь с помощью механических устройств: вибраторов, гидро- или пневмоударных установок и т.д.). Погрешность для этого класса измерений самая высокая – 15–20%. Она может быть и выше, если экзогенные и конвективные влияния полностью экранируют глубинную компоненту. В практике морской геотермии мелкоглубинные измерения применяют в основном в прикладных целях при терморазведке месторождений на шельфе, когда анализируется температурная аномалия над аномалиеобразующим телом по сравнению с «фоновой» температурой при удалении от этого тела.

Геолого-экономическое значение акватории Каспийского моря определяется существующими большими нефтегазовыми ресурсами и будет возрастать по мере освоения уже открытых и выявления новых месторождений.

Один из методов косвенной оценки перспектив нефтегазоносности – это метод термической томографии, при котором термические характеристики (температура осадочного чехла и плотность теплового потока) отображаются на разных глубинах на

основе двух- и трехмерного численного геотермического моделирования. Построение трехмерных (объемных) моделей распределения температур и ТП позволяет получить карты-срезы геотермического поля на любой глубине и таким образом определить уровень, на котором существуют условия для катагенетического преобразования органического вещества, т.е. в первом приближении возможно прогнозировать глубину размещения месторождений.

Методика моделирования геотемпературного поля

Под термином «моделирование» мы понимаем технологию решения уравнения теплопроводности при различных граничных условиях первого или второго рода и при заданных априорно начальных условиях в случае нестационарного теплопереноса [Хуторской и др., 2023а].

Приповерхностные и глубинные теплофизические неоднородности создают пертурбацию теплового потока, который в случае плоскопараллельного геологического разреза ортогонален к поверхности Земли, а при наличии структурно-геологических неоднородностей испытывает рефракцию, которая выражается в концентрации плотности теплового потока в среде с высокой теплопроводностью и, соответственно, в его разрежении в низко проводящих толщах. При численном моделировании рассчитываются реальные температуры среды и тепловой поток, искаженный такими факторами, как рельеф, контраст теплопроводности, образование шарьяжей, «быстрые» неотектонические движения (орогенез и седиментация), остывание магматического очага и др.

Для решения задачи о распределении температур в разрезе мы используем численный метод конечных элементов с квадратичной аппроксимацией функции температуры между узлами прямоугольной сетки. В оригинальной программе “TERMGRAF”, составленной нами [Хуторской, 1996], предусматривается сетка 41х41 узел (т.е. решается двумерная задача), линейные размеры узла по осям X и Z возможно изменять по требованию оператора. Внутри области моделирования задается конфигурация контрастных сред и их теплофизические свойства: температуропроводность a , ($\text{м}^2/\text{с}$), теплопроводность k , ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) и нормированная плотность тепловых источников (Q) $Q/(c \cdot \rho)$ ($\text{К}/\text{с}$), где c – теплоемкость слоя литосферы, ρ – его плотность. В расчетной части комплекса задаются линейные размеры области моделирования (L_x и L_z , в км), которые определяют линейные размеры узла ($L_x/41$ и $L_z/41$), а также временной интервал дискретизации решения (в млн лет). Временной шаг итерационного процесса выбирается программой и рассчитывается как $\tau = 10^{-7} \cdot (Z^2/4a)$, где Z – толщина области моделирования.

В результате численного решения уравнения теплопроводности:

$$(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + A(x, z) = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau},$$

где τ – время, мы получаем распределение температур и тепловых потоков $q(z)$ и $q(x)$ для принятой теплофизической среды в конечный момент временного этапа дискретизации. Полученный файл результатов переименовывается в файл начальных температур и на следующем этапе расчет начинается с конечного момента предыдущего этапа. Эту процедуру можно сравнить с последовательным фотографированием движущегося поезда наблюдателем на платформе. На каждом кадре положение состава меняется, но можно зафиксировать его состояние в любой прошедший момент. Возможность дискретизации решения удобна, если есть необходимость изменить теплофизическую среду в связи со структурно-вещественными перестройками геологического разреза, задать распределение новых источников и стоков тепла, а также просмотреть результаты расчета палеотемпературного поля. Если в модели требуется задать теплоперенос, то его можно имитировать установкой граничных температур и/или адвективного градиента в интервале глубин, на которые распространяется адвекция.

Для каждого профиля при моделировании задается краевая температура на верхней границе (на «нейтральном слое») в соответствии с метеорологическими данными, и ТП – на нижней границе ($q_{гр.}$), соответствующий измеренному или оцененному в ближайших скважинах значению ($q_{набл.}$), за вычетом ТП, генерируемого в слое земной коры выше нижней границы области моделирования при спонтанном распаде долгоживущих радиоизотопов ($q_{р.}$), т.е.

$$q_{гр.} = q_{набл.} - q_{р.}$$

Последний рассчитывается на основании сейсмической информации о мощности слоя (z_i) и его составе, а также из общепринятых традиционных величин удельной теплогенерации ($A(x, z)$) для соответствующего типа пород: $(q_p)_i = A(x, z) \cdot z_i$ [Смыслов и др., 1979; Rybach, Buntebarth, 1982]. В наших моделях по Каспийской акватории теплогенерация принималась равной 1 мкВт/м^3 , что отвечает значению этого параметра для терригенных песчано-глинистых отложений морского дна с учетом средних концентраций в них ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K .

Построение трехмерной региональной геотермической модели производится с помощью пакета трехмерной графики “TECPLOT v.9.0” (Amtec Engineering Inc.), который позволяет провести объемную интерполяцию наблюдаемого поля (в нашем случае температуры, теплового потока, а также структурных сейсмотомографических границ) в координатах: широта-долгота-глубина. Для подготовки файлов данных в формате “TECPLOT v.9.0” нами была написана специальная программа, которая при задании координат начала и конца профиля, а также интервала разбиения по глубине производит трансформацию текстового файла, содержащего результаты термического моделирования, в формат базы данных “TECPLOT”. Программа “TECPLOT” предусматривает трехмерную интерполяцию по сетке любой конфигурации. В большинстве случаев используется неравномерная сетка, «привязанная» к простирацию сейсмических профилей, вдоль которых выполнялись двумерные расчеты глубинных температур. Таким образом, уравнение (1) дополняется третьей недостающей производной ($k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$) и «превращается» в трехмерное уравнение теплопроводности.

Результаты расчета температурного поля с помощью интерполяционного приближения будут отличаться от результатов, получаемых с помощью решения прямой задачи для трехмерной среды, только на величину искажений, обусловленных пертурбацией теплового потока вдоль оси Y. Поэтому, чем меньшее расстояние существует между соседними геотраверсами, тем будет точнее интерполяционное приближение к 3D-модели. Однако наш многолетний опыт двухмерного термического моделирования показывает, что величина искажений теплового потока вдоль оси Y ничтожно мала. Например, для типичного осадочного бассейна горизонтальная компонента теплового потока вдоль оси Y составляет не более $0,04 \text{ мВт/м}^2$, т.е. на три порядка ниже фоновой величины глубинного теплового потока. Следовательно, получение трехмерного распределения температур с помощью объемной интерполяции практически адекватно решению прямой задачи для объемного теплового поля.

Использование трехмерного геотермического моделирования, которое мы идентифицировали как метод термической томографии [Хуторской и др., 2023a], основан на объемной интерполяции геотермического поля. Применение этого метода открыло возможности для обнаружения аномалий температуры и теплового потока, которые совершенно не проявлялись при анализе одно- или двухмерного распределения этих параметров. Особенно ярко большая информативность 3D-геотермических моделей по сравнению с 1D- и 2D-моделями проявляется в изометричных структурах, которыми в большинстве случаев являются впадины осадочных бассейнов.

Практическое значение термотомографической методики заключается в нахождении температурных границ, контролирующих тот или иной процесс генерации или транс-

формации вещества. Например, для прогнозирования нефтегазоносности с помощью термотомографии оценивается глубина температурного интервала, в пределах которого происходят катагенетические изменения органического вещества. С помощью той же методики можно определить глубину температурных интервалов, контролирующих гидротермальное рудообразование, глубину изотермы Кюри, РТ-условия фаций регионального метаморфизма в конкретном регионе. Таким образом, 3D-геотермические модели обусловили появление дополнительного поискового признака при разведке углеводородов в осадочных бассейнах в акваториях и на суше.

Метод термотомографии может применяться при любом масштабе исследований – от осадочного бассейна в целом до локальной его структуры. В первом случае он может рассматриваться как прогнозный, а во втором – как поисково-разведочный. Естественно, мы отдаем себе отчет в том, что эта методика не должна применяться автономно, а только в комплексе геолого-геофизических поисково-разведочных работ на углеводородное сырье.

Для реализации метода необходима информация о структуре разреза, получаемая по данным бурения и/или сейсмического профилирования, а также о величине фонового теплового потока для конкретного региона, что позволяет задать краевые условия для последующего численного моделирования.

Точность расчетов оценивается по двум критериям: во-первых, по совпадению модельного и измеренного в скважинах или в морском дне погружными зондами теплового потока; во-вторых, по совпадению температур на пересечении профилей. Расчет погрешности методом наименьших квадратов показал, что она составляет от 0,5 до 1,0%. В диапазоне температур, наблюдаемых вдоль профилей (от 4 до 40°C), абсолютная погрешность составит 0,2–0,4°C при расчете температур, или 4–5 мВт/м² – при расчете плотности ТП.

Результаты исследования и их обсуждение

Изученность геотермического поля Каспийского региона

Геотермическому изучению акватории Каспийского моря и прилегающей суши посвящен ряд работ [Любимова и др., 1974; Мухтаров, 2004; Фар, Зуй, 2019 и др.] На этой базе составлено несколько карт распределения теплового потока. На них конфигурация изолиний потока значительно отличалась. На карте теплового потока Каспийского моря А.Ш. Мухтарова [Мухтаров, 2004] отражено его распределение в средней части Каспия и в азербайджанской части Южно-Каспийского бассейна. На карте С.М. Фар и В.И. Зуя отмечаются две обширные аномалии теплового потока в северо-западном Иране и к северу от Апшеронского полуострова. Северная и южная (иранская) части акватории Каспийского моря оставались слабоизученными. Карта теплового потока И.Ф. Глумова с соавторами [Глумов и др., 2004] основана на той же базе данных [Chapman, Pollack, 1980]. В северо-западной части Ирана, граничащей с Каспием, оценки плотности теплового потока были получены с использованием косвенного подхода на основе анализа магнитного поля, при котором на основе аналитического продолжения в нижнее полупространство рассчитывалась глубина до поверхности Кюри (+580°C). Таким образом, зная глубину основания магнитоактивного слоя и его температуру, оценивалась плотность теплового потока [Khojamli et al., 2016].

В результате проведенных исследований и появления новейших глобальных баз данных о тепловом потоке [Fuchs et al., 2024] нами составлена новая карта фактических измерений теплового потока (рис. 1) Каспийского региона и карта в изолиниях теплового потока (мВт/м²) (рис. 2). В северной части Каспия измерения проводились на мелководье, и они, естественно, подвержены влиянию экзогенных факторов. Изолинии теплового потока в пределах Северо-Каспийской впадины лишь частично основаны на существующих определениях теплового потока, но в пределах преобладающей части этой области они были построены в результате интерполяции. Они требуют дальней-

шего уточнения после накопления новых данных. Поэтому отображение информации в изолиниях в этой части моря (см. рис. 2) лучше считать условным, прогнозным, и не использовать пока эти данные при дальнейшей интерпретации.

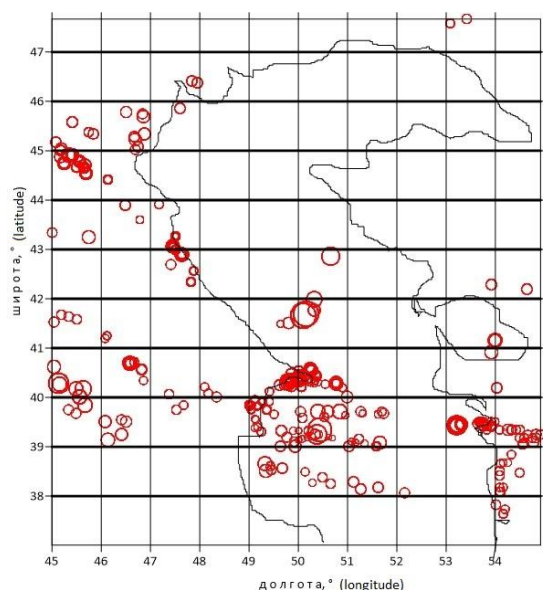


Рис. 1. Расположение точек измерения теплового потока в Каспийском регионе (диаметр кружков пропорционален значению теплового потока) / Fig. 1. Locations of heat flow measurement points in the Caspian region (the diameter of the circles is proportional to the heat flow value)

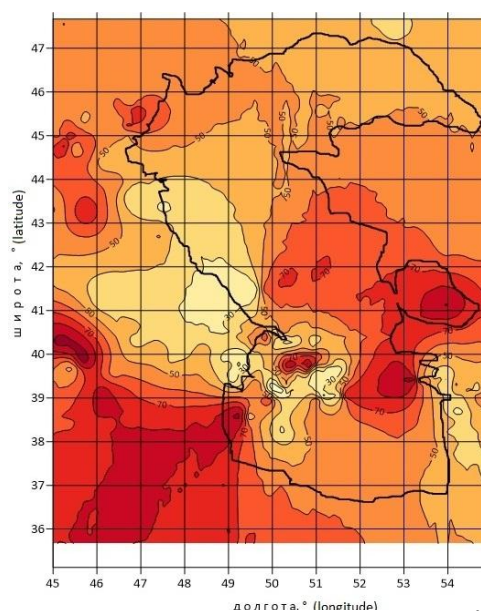


Рис. 2. Карта теплового потока ($\text{мВт}/\text{м}^2$) Каспийского региона / Fig. 2. Heat flow map (mW/m^2) of the Caspian region

На суше, прилегающей к Каспийскому морю, наиболее изученными являются территории Азербайджана, Дагестана и Астраханского газоконденсатного месторождения [Хуторской, 2023б]. Здесь тепловой поток определялся по многочисленным скважинам, пробуренным, главным образом, в процессе разведки углеводородов. Многие определения теплового потока в скважинах морского бурения и зондовым методом были выполнены в пределах Каспийского моря, прилегающего к побережью Азербайджана и Дагестана. Ряд нефтяных скважин также был геотермически изучен в пределах Западно-Туркменской впадины. Гистограмма теплового потока для морской территории региона представлена на рисунке 3. Она построена по данным измерений в морском дне и в скважинах.

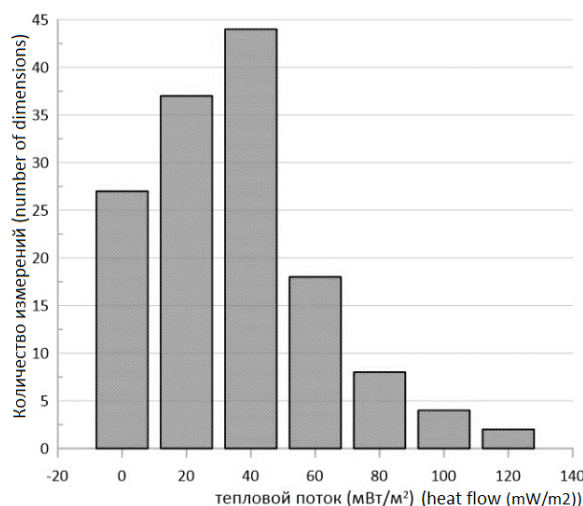


Рис. 3. Гистограмма измерений ТП на акватории Каспийского моря / Fig. 3. Histogram of heat flow measurements in the Caspian Sea area

Основная часть значений ТП Каспийского моря попадает в интервалы 34–59 мВт/м². Реже поток достигает одиночных высоких значений (100–117 мВт/м²). Его определения по прилегающей суше в рамках карты базируются на термограммах скважин и лабораторных измерениях теплопроводности образцов горных пород.

Обширные положительные аномалии потока более 70 мВт/м², обнаружены в центральной части Каспия (Дербентская впадина), Кара-Богаз-Гол и offshore п-ва Челекен.

Протяженная полоса низкого ТП СЗ–ЮВ направления выделяется в Каспийском море вдоль Апшерон-Балханского поднятия. Значения потока 20–40 мВт/м² по скважинам Бакинского архипелага и Апшеронского полуострова в целом оказались ниже, чем в прилегающей акватории, полученных А.Ш. Мухтаровым [Мухтаров, 2008] с помощью морских геотермических зондов (30–50 мВт/м² и более). Распределение ТП коррелирует с особенностями строения земной коры: степенью раздробленности, глубинными разломами, отчасти – грязевыми вулканами и др. Поток имеет контрастный вид в южной части Каспия (от 20 до 70 мВт/м²). В его восточной части он более однороден. В Среднем Каспии фоновые значения теплового потока около 50 мВт/м².

Гистограмма для участков суши, прилегающих к Каспийскому морю на территориях России, Азербайджана, Ирана, Туркменистана и Казахстана, представлена на рисунке 4. Практически все определения теплового потока здесь были выполнены с использованием термограмм и теплопроводности образцов горных пород, отобранных из кернов и измеренных в лабораторных условиях многими исследователями из Азербайджана, России и Туркменистана. Тепловой поток варьируется от 17 до 120 мВт/м², и гистограмма имеет более симметричную форму.

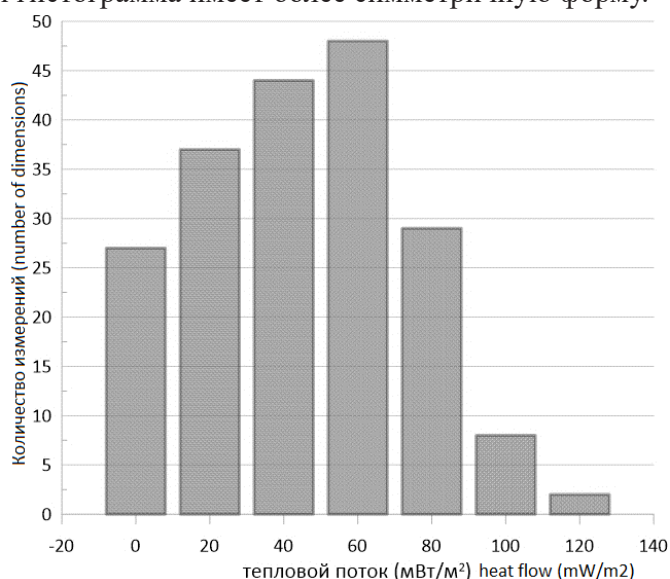


Рис. 4. Гистограмма измерений ТП на суше вокруг акватории Каспийского моря /

Fig. 4. Histogram of heat flow measurements on land around the Caspian Sea area

Широкий диапазон значений теплового потока обусловлен влиянием множества факторов, таких как локальная тектоническая активизация, циркуляция подземных вод, теплофизические неоднородности, возраст складчатости, близость глубоких разломов к изучаемым скважинам и их активность, проявления грязевого вулканизма и т. д.

Можно сделать вывод, что преобладающие значения теплового потока в пределах всего рассматриваемого региона составляют 50–55 мВт/м², что характерно и для прилегающих блоков докембрийской земной коры.

Двухмерные геотермические модели Каспийского моря

Для оценки температуры на глубинах, не достигнутых бурением, а также глубины нахождения характерных температурных границ в литосфере, связанных с прогнози-

рованием нефтегазоносности, применяется описанная выше технология численного моделирования, которое может применяться в двух- и трехмерном пространстве. Для линейных геологических объектов двухмерное геотермическое моделирование вполне адекватно отражает реальное состояние геотемпературного поля, но для мозаичных или изометричных структур, к которым в большинстве случаев относятся осадочные бассейны, переход к трехмерным моделям оправдан и логичен.

Однако, мы должны соизмерять возможности интерпретации с изученностью объекта: без достаточно представительного материала по бурению, сейсмотомографическому профилированию и картированию потенциальных геофизических полей рассчитывать на представительное и высокоточное геотермическое моделирование не приходится, потому что при этом нужно делать много допущений о структурно-геологических неоднородностях и о физических свойствах вещества земной коры.

В Каспийском море степень геолого-геофизической изученности неоднородна в его различных акваториях и напрямую связана с вероятностью открытия новых перспективных нефтегазоносных объектов. Традиционно изучение акватории начинается с проведения регионального сеймопрофилирования для описания геологического строения и мощности основных структурно-формационных комплексов.

Полученный таким образом материал может являться основой для проведения двухмерного геотермического моделирования и определения фоновых температур и плотности теплового потока во всем регионе, который сечет проложенный профиль. В Среднем Каспии такими «реперными» объектами являются профили через Карпинско-Мангышлакскую и Прикумско-Центрально-Каспийскую структуры. Нами проведено двухмерное численное моделирование геотемпературного поля именно вдоль этих профилей.

Карпинско-Мангышлакская нефтегазоносная область, как единый элемент нефтегазогеологического районирования, может быть выделена только по горизонтам осадочного чехла. Данная область делится на три нефтегазоносных района: Полдневско-Бузачинский, Каспийско-Центрально-Мангышлакский и Джанайско-Южно-Бузачинский. В пределах первого района промышленная нефтегазоносность установлена в юрских и меловых отложениях. В двух других районах нефтеносность связана с юрскими, меловыми и триасовыми отложениями [Серебряков, Мукашева, 2016].

Наиболее перспективные зоны и участки для выявления нефтяных залежей выделяются в пределах Прикумской системы поднятий. В этой зоне отмечается повышенное количество флексуно-разрывных нарушений при анализе сейсмических данных. В составе Прикумской системы поднятий можно выделить шесть зон нефтегазоаккумуляций, перспективность которых на открытие нефтяных залежей весьма высока [Исмаилов, 2022; Kerimov et al., 2016].

Профиль вкост Карпинско-Мангышлакской зоны (рис. 5) проинтерпретирован до глубины 4 км и отображает структуру верхнемеловых и кайнозойских комплексов. Здесь не проявляются резкие контрастные теплофизические неоднородности. Теплопроводность плавно увеличивается с глубиной, составляя в новейших песчано-глинистых толщах антропогена $1,6 \text{ Вт/(м·К)}$, а в наиболее древних на профиле аргиллитах верхнего мела – $2,7 \text{ Вт/(м·К)}$. Максимальные температуры, рассчитанные с учетом рефракции теплового потока в контрастных по теплопроводности и в проницаемых толщах, отображенных на рисунке, составляют 90°C (см. рис. 5). Профиль плотности теплового потока (q) рассчитывается автоматически, т.к. в температурную модель уже заложены значения теплопроводности (k) и геотермического градиента ($G = (T_2 - T_1)/(z_2 - z_1)$); $q = k \cdot G$. Он изменяется в незначительных пределах – от 53 до 61 Вт/м^2 , увеличиваясь в зонах куполообразного поднятия позднемезозойских пород с повышенной теплопроводностью.

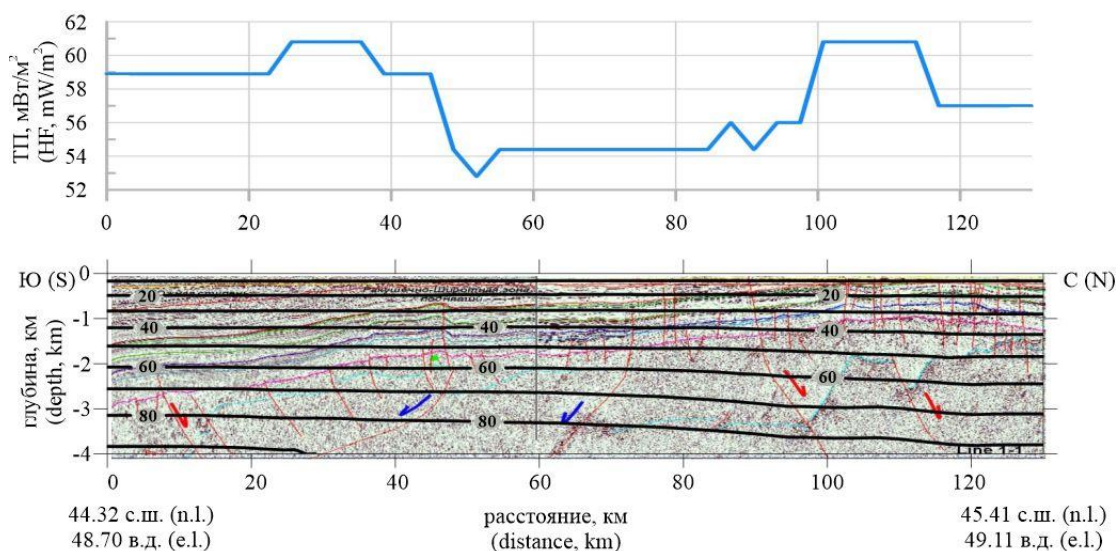


Рис. 5. Геотермическая модель вкост Карпинско-Мангышлакской структурной зоны.
Внизу – распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) вдоль субмеридионального профиля;
вверху – рассчитанный тепловой поток ($\text{мВт}/\text{м}^2$) /

Fig. 5. Geothermal model across the Karpinsky-Mangyshlak structural zone.
Bottom – temperature distribution ($^{\circ}\text{C}$) along the sub-meridional profile;
top – calculated heat flow (mW/m^2)

Фоновое значение теплового потока для конкретного профиля оценивается путем осреднения рассчитанных по профилю тепловых потоков для каждой ячейки. Докажем справедливость этого утверждения.

Рассмотрим тепловую неоднородность, находящуюся в среде с постоянной теплопроводностью. Пусть тепловой поток, входящий в эту область, равен q_0 . Этот поток еще не претерпел искажений, поэтому может быть определен как фоновый, или глубинный. Если внутри искажающего тела объемом V нет источников тепла, то по теореме Гаусса:

$$\int_V \text{div} \mathbf{q} \cdot dV = \int_{S_1} q_n \cdot dS + \int_{S_2} q_n \cdot dS = 0,$$

где q_n – нормально направленный тепловой поток к поверхности, положительное направление принято наружу области G ; S_2 и S_1 – соответственно, площади нижней и верхней поверхности области G . Изменив направление нормальной составляющей теплового потока с поверхности S_2 на обратное и приняв во внимание, что q_n на $S_2 = q_0$, получим:

$$\int_{S_1} q_n \cdot dS = \int_{S_2} q_0 \cdot dS = q_0 S_2, \text{ отсюда } q_0 = 1/S_2 \int_{S_1} q_n \cdot dS,$$

т.е., по определению, q_0 является осредненной по площади величиной. Аналогично, для плоской задачи:

$$q_0 = 1/L \int_L q_n \cdot dL,$$

где L – длина профиля осреднения.

Для конечного разбиения имеем:

$$q_0 = \sum_{i=1}^n q_n S_i / \sum_{i=1}^n S_i \text{ и } q_0 = \sum_{i=1}^n q_n L_i / \sum_{i=1}^n L_i.$$

Итак, применяя описанную методику, мы получаем величину глубинного теплового потока на конкретном геологическом объекте. На данном профиле средний ТП составляет 56 мВт/м^2 .

Заметим, что на этом профиле до глубины 4 км не достигаются температуры катагенеза ОВ. По расчетам начальные температуры катагенеза ($\sim 110^\circ\text{C}$), будут встречены на глубине 5 км на южном фланге профиля и 5,5 км – на его северном фланге.

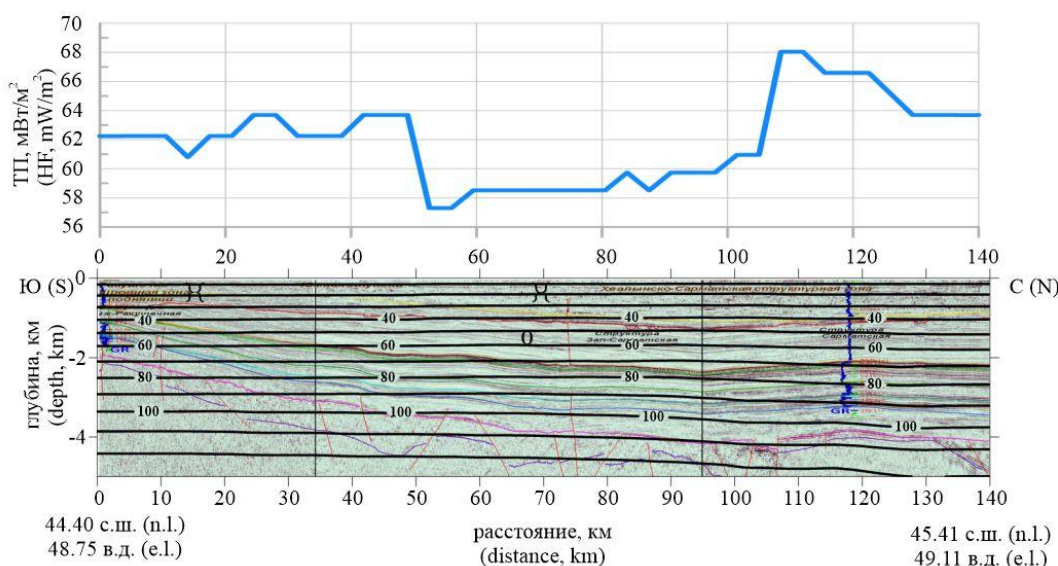


Рис. 6. Геотермическая модель вкрест Прикумско-Ц.Каспийской структурной зоны. Внизу – распределение температур ($^\circ\text{C}$) вдоль субмеридионального профиля;верху – рассчитанный тепловой поток (мВт/м^2) / Fig. 6. Geothermal model across the Prikumsk-Central Caspian structural zone. Bottom – temperature distribution ($^\circ\text{C}$) along the sub-meridional profile; top – calculated heat flow (mW/m^2)

Профиль вкрест Прикумско-Ц.Каспийской структурной зоны (рис. 6) рассчитан до глубины 6 км, поэтому диапазон температур здесь несколько больший. Кроме того, в этом районе моря зафиксирован более высокий фоновый тепловой поток. Это было учтено при задании краевых условиях II рода на нижней границе области моделирования. Максимальные температуры на нижней границе профиля составляют 125°C . Рассчитанный тепловой поток отражает фактическое повышение этого параметра и изменяется в пределах от 57 до 68 мВт/м^2 (среднее фоновое значение ТП – 60 мВт/м^2).

Таким образом, двухмерные геотермические модели позволили оценить глубинные температуры и глубину интервала катагенеза ОВ в акватории Среднего Каспия для стратиграфического интервала от позднемеловых до современных отложений.

Трехмерная термотомографическая модель Южно-Каспийского бассейна

Томографический метод в геофизике развивается в наше время не менее активно, чем в медицине, астрономии или технике. Термин «томография» стал применяться в науках о Земле лишь 30–40 лет назад, хотя эта методика под названием «изучение глубинного строения Земли», используется уже сто лет.

Преимущество томографической модели заключается в построении объемных, трехмерных изображений объектов, в возможности их рассмотреть «со всех сторон». Для томографии не имеет значения, какую структуру или какое геофизическое поле отображается, и это обусловило появление нескольких видов геофизической томографии: сейсмическая томография в различных вариантах обработки сейсмических волн, гравитационная, электромагнитная и т.д. Успехи применения сейсмотомографии

[Dziewonski, 1984; Dziewonski, Anderson, 1984; Seismic tomography..., 1993], ярко продемонстрировавшей наличие глубинных неоднородностей, естественно стимулировали разработку подобного подхода и для других полей [Тараканов, 1997; Спичак, 1999], в которых также можно видеть объемные неоднородные объекты, или как сейчас многие полагают, нелинейные геологические структуры [Пушаровский, 1993; Николаев, 1997].

Трехмерное геотермическое моделирование позволяет прогнозировать глубину и конфигурацию поверхностей, ограничивающих интервал возможного нахождения углеводородных залежей, и этим оно отличается от двухмерного моделирования, которое дает расчет глубины катагенеза ОВ только на линии профиля и не позволяет «заглянуть» за эту линию. Особенно сильные различия в результатах оценки перспектив нефтегазоносности по геотермическим данным могут быть в случае изометричных, а не линейных структур. При изометричности, которая характерна для Южно-Каспийского бассейна, оценки глубин нахождения катагенетических температур по двухмерной и по трехмерной моделям могут отличаться на 10–15%. [Gordadze et al., 2018]. Этот факт не требует специальных доказательств, т.к. хорошо известен из классических работ по теории теплопроводности (см. напр. Карслоу, Егер, 1964).

Для того, чтобы перейти к трехмерной модели, для всех профильных створов (рис. 7–11) рассчитываются температуры с помощью пакета TERMGRAF, а затем помещаются на единый трехмерный плот в координатах: «широта-долгота-глубина». Туда же помещаются двухмерные профили, отображенные на рисунках 5 и 6 (рис. 12).

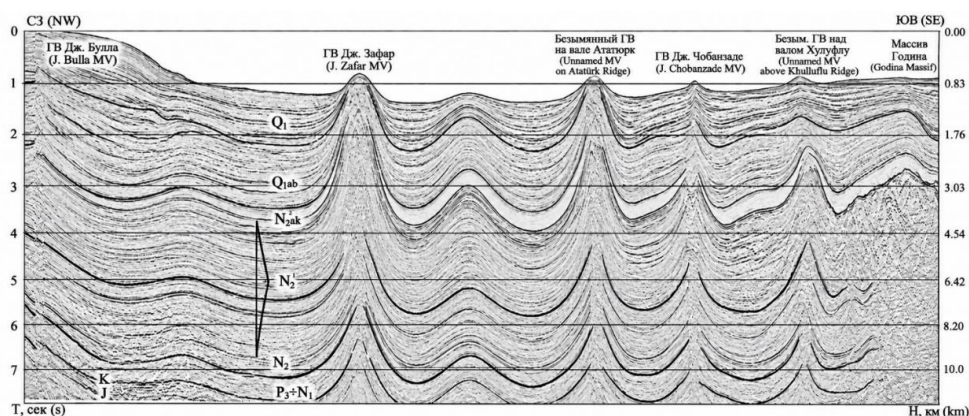


Рис. 7. Временной разрез по линии «Дж. Булла – Массив Година» («ГВ» – грязевые вулканы) / Fig. 7. Time section along the “J. Bulla – Godin Massif” line (“MV” – mud volcanoes)

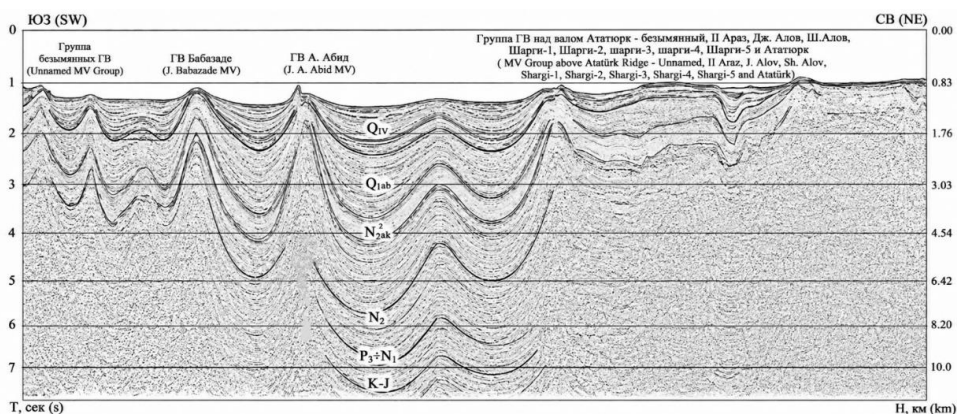


Рис. 8. Временной разрез через группу ГВ над вальом Атаюрк / Fig. 8. Time section through a group of mud volcanoes (MV) over the Ataturk Rise

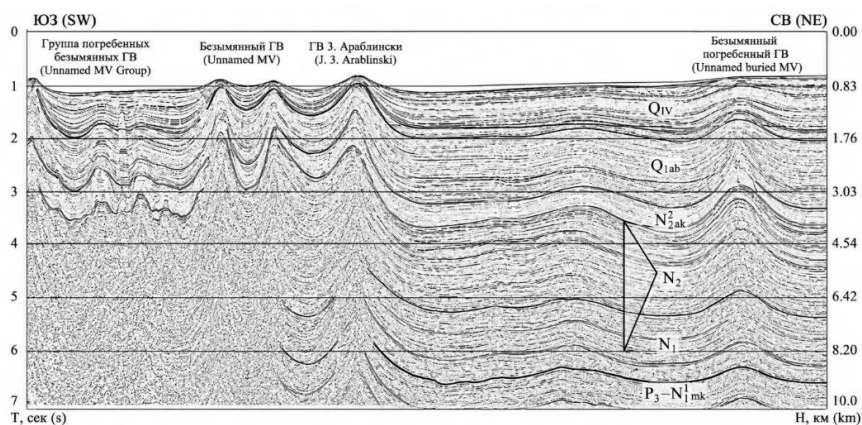


Рис. 9. Временной разрез через ГВ Араблинский /
Fig. 9. Time section through the Arablinsky mud volcano (MV)

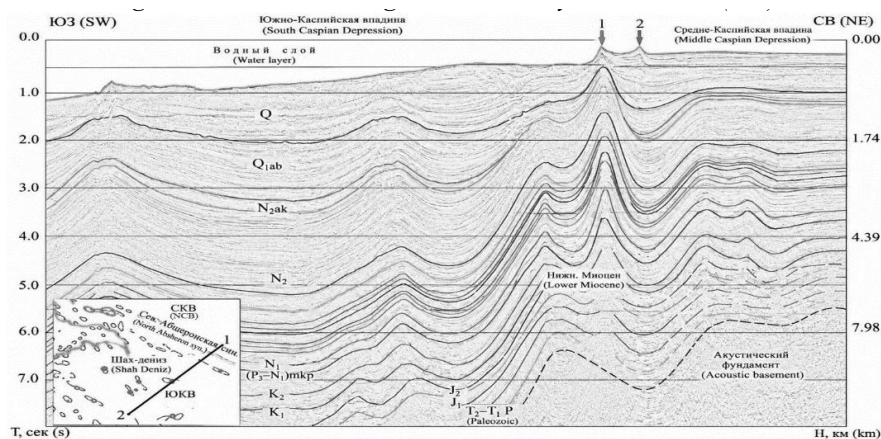


Рис. 10. Временной профиль через Южно- и Среднекаспийскую впадины
(проходит в 80 км от Апишеронского п-ва) /

Fig. 10. Time profile through the South and Middle Caspian basins
(passes 80 km from the Absheron Peninsula)

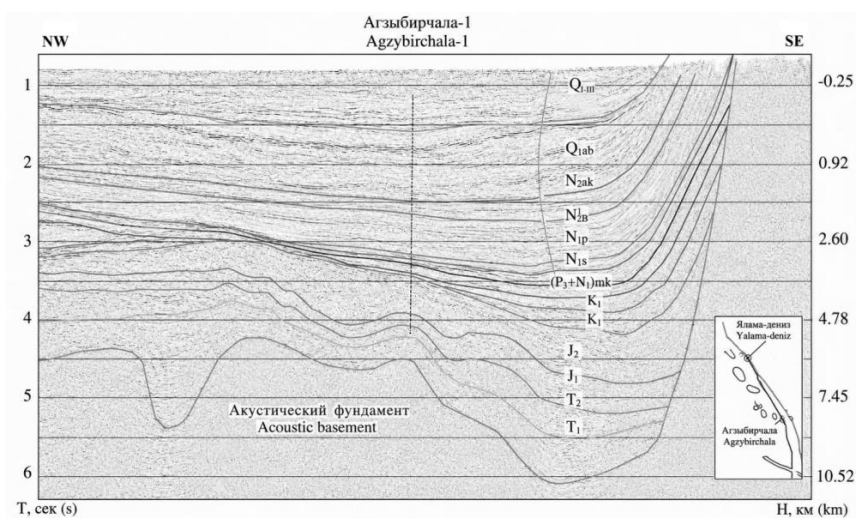


Рис. 11. Временной профиль «Агзыбирчала-1» вдоль береговой линии Каспийского моря /

Fig. 11. Time profile "Agzyburchala-1" along the Caspian Sea coastline

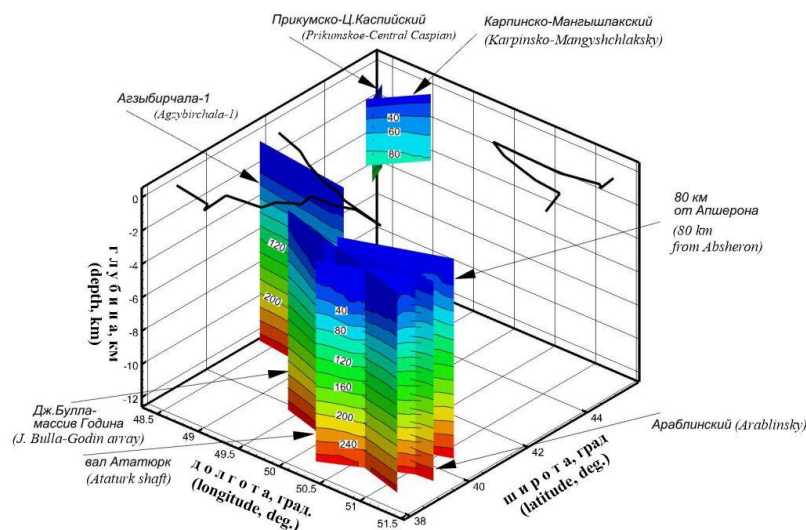


Рис. 12. 2D-профили, размещенные в координатах «широта-долгота-глубина» (стрелками показан температурный разрез по профилям (см. рис. 5–11)) /

Fig. 12. 2D profiles plotted in “latitude-longitude-depth” coordinates (arrows indicate the temperature section along the profiles (see Fig. 5–11))

В программном пакете TECPLOT, воспользовавшись опцией трехмерной интерполяции, получаем трехмерный плот в координатах расположения профилей (рис. 13). Для удобства визуализации глубинных температур этот плот показан с бланкингом (вырезом).

На трехмерном плоту заметны «искривления» изотерм, адекватные тем вариациям теплового потока, которые отмечены на карте и описаны выше. Но главное достоинство такого представления данных – это возможность изобразить срез температур на любой глубине или построить изотермическую поверхность любого значения температур.

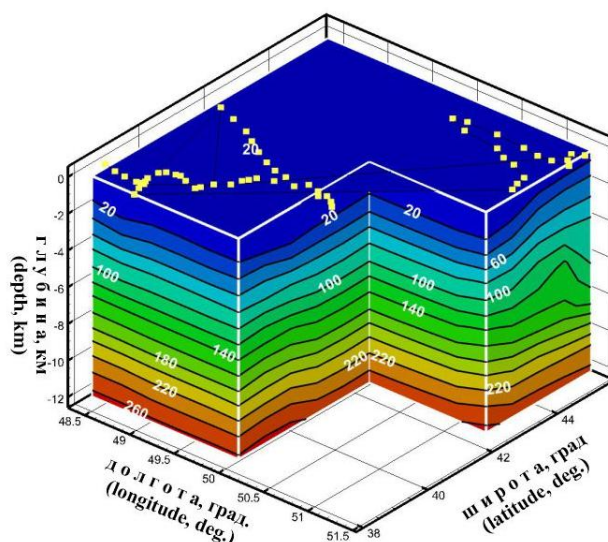


Рис. 13. 3D-плот температур (°C) / Fig. 13. 3D plot of temperatures (°C)

На рисунках 14 и 15 демонстрируются примеры таких трансформаций. На срезе на глубине 5 км (см. рис. 14) хорошо видно повышение температуры в северном направлении. На широте Баку температура на этом уровне составляет 100°C, а на широте г. Бекдаш (залив Кара-Богаз-Гол) – 120°C.

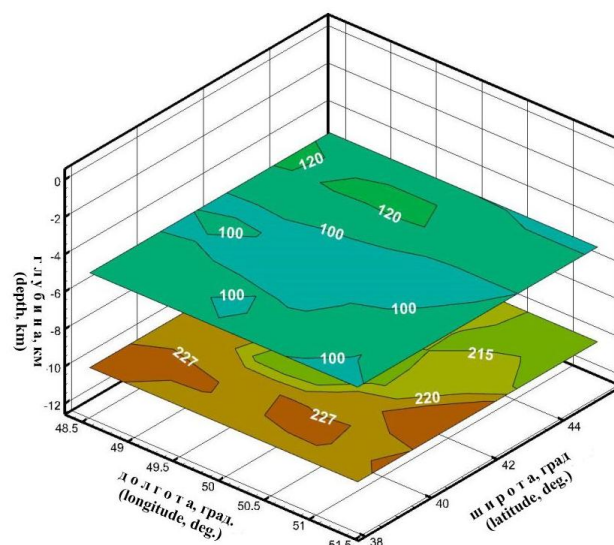


Рис. 14. Карты-срезы температуры ($^{\circ}\text{C}$) на глубинах 5 и 10 км /
Fig. 14. Temperature slice maps ($^{\circ}\text{C}$) at depths of 5 and 10 km

Выводы

Анализируя геотермическое поле акватории Каспия, можно высказать сожаление, что изученность теплового поля очень неравномерная. Кондиционную интерпретацию и расчет глубинных температур можно выполнить только в южной половине моря – от 37 до 43° с.ш.

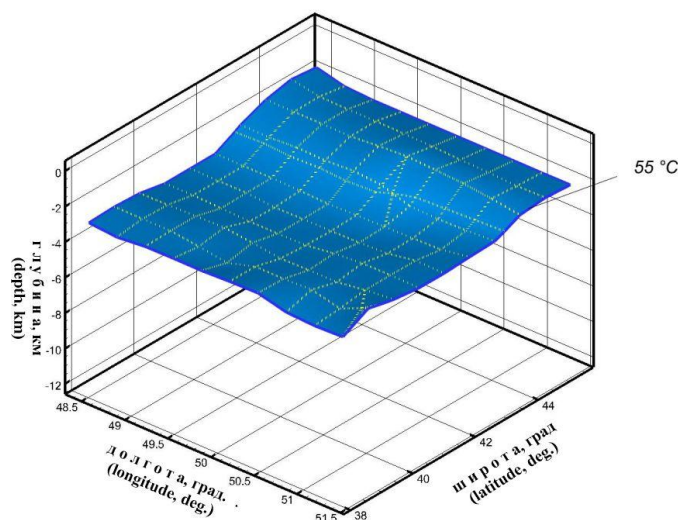


Рис. 15. Положение изотермической поверхности 55°C /
Fig. 15. Position of the 55°C isothermal surface

Севернее, вплоть до 47° с.ш. нет никаких определений теплового потока, что связано с объективными причинами – влиянием экзогенных искажений теплового потока, которые иногда на два порядка превышают его фоновую величину. При таком мелком море оценить фоновый тепловой поток можно только с помощью скважинных измерений, которые, по-видимому, проводились во время поисково-разведочных работ на углеводородное сырьё, но до сих пор не опубликованы. Как было замечено выше, проведение изолиний теплового потока в северном Каспии является «интерполяционным», не подтвержденным прямыми измерениями.

В Среднем и Южном Каспии мы отмечаем дифференцированный тепловой поток, величина которого обусловлена рядом геологических и тектонических процессов. Перечислим основные из них. Это неотектонические проявления: разломы, прогибание дна и быстрое осадконакопление, грязевой вулканизм, а также гидродинамические факторы, обусловленные разгрузкой подземных вод на морское дно.

Применение численного моделирования процессов тепломассопереноса на акватории Каспия позволяет приблизиться к оценке фонового кондуктивного теплового потока и будет тем точнее, чем больший объем дополнительной геолого-геофизической информации будет привлечен для обоснования граничных и начальных условий моделирования, а также теплофизических параметров модели. Сравнивая информативность 2D- и 3D-моделей расчета глубинных температур, мы констатируем несомненное преимущество последних для изометричных геологических структур, каковой является, например, Южно-Каспийская впадина.

Таким образом, проводя интерпретацию температурного режима осадочного чехла с целью прогнозирования температурного интервала катагенеза ОВ, нужно, несомненно, переходить к трехмерным геотермическим моделям.

Литература

1. Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. – М.: Недра, 2004. – 342 с.
2. Исмаилов Д.Д. Условия формирования олигоцен-миоценовой углеводородной системы на территории Терско-Каспийского нефтегазоносного бассейна и перспективы поисков скоплений нефти и газа: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.12 / Исмаилов Джавидан Джейхунович. – М.: МГРИ, 2022. – 23 с.
3. Карслоу Г.С., Егер Д.К. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
4. Любимова Е.А., Томара Г.А., Власенко В.И., Смирнова Е.В., Зекцер И.С., Месхетели А.И. Первые данные об изучении тепловых потоков через дно Каспийского моря // Известия Академии наук СССР. Серия: Физика Земли. – 1974. – № 4. – С. 98–103.
5. Мухтаров А.Ш. Некоторые аспекты формирования теплового потока в Прикаспийском регионе // Известия Геологического института НАН РА. – 2004. – Т. 31. – С. 141–146.
6. Мухтаров А.Ш. Тепловой поток в восточной части зоны Кавказского разлома. В кн.: Попов Ю.А., ред. Тепловой поток Земли и методы его изучения. – М.: Российский государственный геологоразведочный ун-т. 2008. – С. 155–160.
7. Николаев А.В. Проблемы геотомографии // Проблемы геотомографии. – М.: Наука, 1997. – С. 4–38.
8. Пущаровский Ю.М. Нелинейная геодинамика (кредо автора) // Геотектоника. – 1993. – № 1. – С. 3–6.
9. Серебряков О.И., Мукашева А.Х. Нефтегазогеологическое районирование обрамления Северного и Среднего Каспия и его акватории // Геология, география и глобальная энергия. – 2016. – № 4(63). – С. 18–23.
10. Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З. Тепловой режим и радиоактивность Земли. – Л.: Недра, 1979. – 191 с.
11. Спичак В.В. Магнитотеллурические поля в трехмерных моделях геоэлектрики. – М.: Научный мир, 1999. – 204 с.
12. Тараканов Ю.А. Гравитационная томография // Проблемы геотомографии. – М.: Наука, 1997. – С. 236–265.
13. Фар С.М., Зуй В.И. Геотермическое поле и геология региона Каспийского моря // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2019. – № 1. – С. 104–118.
14. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. – М.: Изд-во РУДН, 1996. – 328 с.
15. Хуторской М.Д., Гнатусь Н.А., Демежко Д.Ю., Ермаков А.В., Никитин Д.С., Поляк Б.Г., Тевелева Е.А. Геотермия: XX–XXI век. – М.: ГЕОС, 2023а. – 458 с.

16. Хуторской М.Д. Региональное тепловое поле и геотермальные ресурсы Кавказского региона // Геология и геофизика Юга России. – 2023б. – Т. 13. № 3. – С. 73–88. DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006.
17. Chapman D., Pollack H. Global heat flow: spherical harmonic representation // Transactions American Geophysical Union. – 1980. – Vol. 61. – p. 383.
18. Dziewonski A.M. Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P-velocity up to degree and order 6 // Journal of Geophysical Research. – 1984. – Vol. 89. – pp. 5929–5952. DOI: 10.1029/JB089iB07p05929.
19. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Seismic tomography of the Earth's interior // American Scientist. – 1984. – Vol. 72. No. 5. – pp. 483–494.
20. Fuchs S., Neumann F., Norden B., Balkan-Pazvantoglu E. et al. The global heat flow database: Release // GFZ Data Services. – 2024. – DOI: 10.5880/fidgeo.2024.014.
21. Gordadze G., Kerimov V., Giruts M., Poshibaeva A., Koshelev V. Genesis of the asphaltite of the Ivanovskoe field in the Orenburg region, Russia // Fuel. – 2018. – Vol. 216. – pp. 835–842. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.11.146.
22. Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Bondarev A.V. Evaluation of the organic carbon content in the low-permeability shale formations (as in the case of the Khadum suite in the Ciscaucasia region) // Oriental Journal of Chemistry. – 2016. – Vol. 32(6). – pp. 3235–3241.
23. Khojamli A., Doulati Ardejani F., Moradzadeh A., Nejati Kalate A., Roshandel Kahoo A., Porkhial S. Estimation of Curie point depths and heat flow from Ardebil province, Iran, using aeromagnetic data // Arab Journal Geosciences. – 2016. – Vol. 9. – pp. 383–386.
24. Rybach L., Buntbarth G. Relationship between the petrophysical properties, density, seismic velocity, heat generation and mineralogical construction // Earth and Planetary Science Letters. – 1982. – Vol. 57. – pp. 367–376.
25. Seismic tomography: Theory and practice / Eds. H.M. Iyer, K. Hirahara. – London: Chapman and Hall, 1993. – pp. 519–584.

References

1. Glumov I.F., Malovitskiy Ya.P., Novikov A.A., Senin B.V. Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea. Moscow. Nedra. 2004. 342 p. (In Russ.)
2. Ismailov D.D. Conditions for the formation of the Oligocene-Miocene hydrocarbon system in the Terek-Caspian oil and gas basin and prospects for searching for oil and gas accumulations. The abstract of the dissertation of. cand. geol.-mineral sciences. Moscow. MGRI. 2022. 23 p. (In Russ.)
3. Carslaw H.S., Jaeger, J.C. Conduction of heat in solids. Russian trans. Moscow. Nauka. 1964. 487 p. (In Russ.)
4. Lyubimova E.A., Tomara G.A., Vlasenko V.I., Smirnova E.V., Zektser I.S., Meskheteli A.I. First data on the study of heat flows through the bottom of the Caspian Sea. Izvestiya, Academy of Sciences USSR. Physics of the Solid Earth 1974. No. 4. pp. 98–103. (In Russ.)
5. Mukhtarov A.Sh. Some aspects of heat flow formation in the Caspian region. Proceedings of the Geological Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences. 2004. Vol. 31. pp. 141–146. (In Russ.)
6. Mukhtarov A.Sh. Heat flow in the eastern part of the Caucasian fault zone. In: Yu.A. Popov (Ed.). Earth's heat flow and methods for its study. Moscow. Russian State Geological Prospecting University. 2008. pp. 155–160. (In Russ.)
7. Nikolaev A.V. Problems of geotomography. In: Problems of geotomography. Moscow. Nauka. 1997. pp. 4–38. (In Russ.)
8. Pushcharovsky Yu.M. Nonlinear geodynamics (author's credo). Geotectonics. 1993. No. 1. pp. 3–6. (In Russ.)
9. Serebryakov O.I., Mukasheva A.Kh. Oil and gas geological zoning of the frame of the Northern and Middle Caspian and its water area. Geology, Geography and Global Energy. 2016. No. 4(63). pp. 18–23. (In Russ.)
10. Smyslov A.A., Moiseenko U.I., Chadovich T.Z. Thermal regime and radioactivity of the Earth. Leningrad. Nedra. 1979. 191 p. (In Russ.)
11. Spichak V.V. Magnetotelluric fields in three-dimensional geoelectric models. Moscow. Nauchnyi Mir. 1999. 204 p. (In Russ.)

12. Tarakanov Yu.A. Gravitational tomography. In: Problems of geotomography. Moscow. Nauka. 1997. pp. 236–265. (In Russ.)
13. Far S.M., Zui V.I. Geothermal field and geology of the Caspian Sea region. Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology. 2019. No. 1. pp. 104–118.
14. Khutorskoy M.D. Geothermy of the Central Asian fold belt. Moscow. RUDN Publishing House. 1996. 328 p. (In Russ.)
15. Khutorskoy M.D., Gnatus N.A., Demezhko D.Yu., Ermakov V.A., Nikitin D.S., Polyak B.G., Teveleva E.A. Geothermy: XX-XXI century. Moscow. GEOS. 2023. 458 p. (In Russ.)
16. 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.)
17. Chapman D., Pollack H. Global heat flow: spherical harmonic representation. Transactions American Geophysical Union. 1980. Vol. 61. p. 383.
18. Dziewonski A.M. Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P- velocity up to degree and order 6. Journal of Geophysical Research. 1984. Vol. 89. pp. 5929–5952. DOI: 10.1029/JB089iB07p05929.
19. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Seismic tomography of the Earth's interior. American Scientist. 1984. Vol. 72. No. 5. pp. 483–494.
20. Fuchs S., Neumann F., Norden B., Balkan-Pazvantoglu E. et al. The global heat flow database: Release. GFZ Data Services. 2024. DOI: 10.5880/fidgeo.2024.014.
21. Gordadze G., Kerimov V., Giruts M., Poshibaeva A., Koshelev V. Genesis of the asphaltite of the Ivanovskoe field in the Orenburg region, Russia. Fuel. 2018. Vol. 216. pp. 835–842. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.11.146.
22. Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Bondarev A.V. Evaluation of the organic carbon content in the low-permeability shale formations (as in the case of the Khadum suite in the Ciscaucasia region). Oriental Journal of Chemistry. 2016. Vol. 32(6). pp. 3235–3241.
23. Khojamli A., Doulati Ardejani F., Moradzadeh A., Nejati Kalate A., Roshandel Kahoo A., Porkhial S. Estimation of Curie point depths and heat flow from Ardebil province, Iran, using aeromagnetic data. Arabian Journal Geosciences. 2016. Vol. 9. pp. 383–386.
24. Rybach L., Buntebarth G. Relationship between the petrophysical properties, density, seismic velocity, heat generation and mineralogical construction. Earth and Planetary Science Letters. 1982. Vol. 57. pp. 367–376.
25. Seismic tomography: Theory and practice. Eds. H.M. Iyer, K. Hirahara. London. Chapman and Hall. 1993. pp. 519–584.

УДК 911.52:528.94:004.9(470.6+479.24+55)

DOI: 10.46698/VNC.2026.44.20.001

Оригинальная статья

Геоинформационное среднемасштабное ландшафтное картографирование трансграничных бассейнов горных рек Прикаспийского региона Кавказа

З.В. Атаев[✉], И.А. Керимов[✉]

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100,
e-mail: zagir05@mail.ru, ibragim_kerimov@mail.ru

Статья поступила: 15.06.2026, доработана: 31.08.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Трансграничные бассейны горных рек требуют единой пространственной основы, поскольку формирование стока, перенос вещества, опасные процессы и хозяйственное воздействие не совпадают с административными границами. Для Прикаспийского региона Кавказа и сопредельного североиранского сектора задача осложняется большой высотной амплитудой, ландшафтной контрастностью и неоднородностью исходных карт. **Цель исследования** – разработать геоинформационную основу среднемасштабного ландшафтного картографирования трансграничных бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Северного Ирана для межбассейнового сопоставления и геоэкологического мониторинга. **Методы.** Исследованы бассейны Сунжи, Сулака, Шура-озени, Уллучая, Самура, Гарачая, Атачая, Хераза и Горгана. Используются бассейновый, ландшафтный, сравнительно-географический и геоинформационный подходы; цифровые модели рельефа SRTM, Copernicus, ALOS и ASTER; снимки Sentinel-2 и Landsat-8/9; продукты MODIS; тематические карты и материалы полевых исследований 2024–2025 гг. Картографирование выполнено в рабочем масштабе 1:500 000 с последующей генерализацией. **Результаты.** Сформирована согласованная многослойная ГИС, объединяющая российский, азербайджанский и иранский секторы единой типологической легендой. Выделены два класса, шесть укрупненных групп и около 28 родов ландшафтов, охарактеризована их высотная и бассейновая организация. Определены основные зоны геоэкологической чувствительности: крутые склоны, предгорные узлы геосистемного напряжения, долино-пойменные и дельтовые комплексы, а также участки интенсивной антропогенной трансформации. Межбассейновое сопоставление показало, что наиболее полная вертикальная структура характерна для Сулака и Самура, тогда как малые бассейны отличаются более резкими переходами от горных к аридным равнинным комплексам. Достоверность выделения контуров обеспечена согласованием данных разного разрешения и полевой проверкой ключевых участков. Карты Самура и Кавказского сектора служат примерами регионального и бассейнового уровней представления результатов. **Практическая значимость.** Полученная основа пригодна для сопоставления бассейнов, уточнения полевых маршрутов, комплексной оценки природных рисков и регулярного мониторинга изменений земного покрова и водосборных геосистем.

Ключевые слова: ландшафтное картографирование, геоинформационные системы, трансграничные бассейны, горные реки, бассейновый подход, геоэкологический мониторинг, Северо-Восточный Кавказ, Прикаспийский регион Кавказа.

Благодарности: Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Для цитирования: Атаев З.В., Керимов И.А. Геоинформационное среднемасштабное ландшафтное картографирование трансграничных бассейнов горных рек Прикаспийского региона Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.44.20.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.44.20.001

Original paper

Geoinformation medium-scale landscape mapping of transboundary mountain-river basins in the Caspian region of the Caucasus

Z.V. Ataev, **I.A. Kerimov**

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: zagir05@mail.ru, ibragim_kerimov@mail.ru

Received: 15.06.2026, revised: 31.08.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Transboundary mountain-river basins require a unified spatial framework because runoff formation, material transport, hazardous processes and human impacts do not coincide with administrative boundaries. In the Caspian region of the Caucasus and the adjacent Northern Iranian sector, this task is complicated by large altitudinal gradients, strong landscape contrasts and heterogeneous source maps. **Aim.** To develop a geoinformation framework for medium-scale landscape mapping of transboundary mountain-river basins in the North-Eastern Caucasus, Azerbaijan and Northern Iran for inter-basin comparison and geoecological monitoring. **Methods.** The Sunzha, Sulak, Shura-Ozen, Ulluchay, Samur, Garachay, Atachay, Haraz and Gorgan basins were analysed using basin, landscape, comparative-geographical and geoinformation approaches. The source data included SRTM, Copernicus, ALOS and ASTER digital elevation models; Sentinel-2 and Landsat-8/9 imagery; MODIS products; thematic maps; and field materials collected in 2024-2025. Mapping was conducted at a working scale of 1:500,000 followed by cartographic generalization. **Results.** A harmonized multilayer GIS was created for the Russian, Azerbaijani and Iranian sectors using a common typological legend. Two landscape classes, six generalized groups and about 28 landscape genera were identified, and their altitudinal and basin organization was characterized. The main areas of geoecological sensitivity are steep slopes, foothill nodes of geosystem stress, valley-floodplain and deltaic complexes, and territories undergoing intensive anthropogenic transformation. Inter-basin comparison showed the fullest vertical structure in the Sulak and Samur basins, whereas smaller basins display sharper mountain-to-arid-plain transitions. **Practical significance.** The resulting framework can be used for basin comparison, refinement of field routes, natural-risk assessment and regular monitoring of land-cover and catchment-geosystem changes.

Keywords: landscape mapping, geoinformation systems, transboundary basins, mountain rivers, basin approach, geoecological monitoring, North-Eastern Caucasus, Caspian region of the Caucasus.

Acknowledgements: *The work was carried out within the framework of the major scientific project "Dynamics of the geoecological state of the mountain river basins of the North-Eastern Caucasus, Azerbaijan and Iran under climate change and increasing anthropogenic pressure" (Agreement No. 075-15-2024-644).*

For citation: Ataev Z.V., Kerimov I.A. Geoinformation medium-scale landscape mapping of transboundary mountain-river basins in the Caspian region of the Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.44.20.001

Введение

Горные речные бассейны представляют собой целостные природные системы, в которых рельеф, климат, сток, почвенно-растительный покров и природопользование связаны потоками воды, вещества и энергии [Хортон, 1948; Солнцев, 1949; Исаченко, 1991]. Бассейновая организация особенно значима для трансграничных территорий: процессы, возникающие в верхних и средних звеньях водосбора, проявляются ниже

по течению и могут выходить за государственные границы [Дёмин, Шаталова, 2015; Dadparvar et al., 2025].

В Прикаспийском регионе Кавказа и на северных склонах Эльбурса климатическая изменчивость сочетается с ростом селитебной, аграрной, транспортной и водохозяйственной нагрузки. Учащение экстремальных осадков и засухливых периодов, сокращение оледенения, изменение землепользования и современная регрессия Каспийского моря усиливают различия между зонами формирования, транзита и аккумуляции стока [Winkler et al., 2021; Росгидромет..., 2022; Tielidze et al., 2022; Samant, Prange, 2023].

Существующие карты обычно создавались для отдельных государств или административных регионов и различаются масштабом, классификационной основой и степенью генерализации. Это ограничивает сопоставление бассейнов и организацию согласованного мониторинга. Современные цифровые модели рельефа, многолетние ряды спутниковых данных и ГИС позволяют объединить разнородные материалы в единой пространственной системе [Лурье, 2008; Zhang et al., 2022, 2024].

Цель работы – разработать геоинформационную основу среднемасштабного ландшафтного картографирования трансграничных бассейнов горных рек Прикаспийского региона Кавказа, включая сопредельный североиранский сектор, и определить возможности ее использования для геоэкологического анализа. Новизна состоит в применении общей бассейново-ландшафтной схемы и единой типологической легенды к девяти водосборам трех стран.

Район исследования

Исследование охватывает бассейны Сунжи, Сулака, Шура-озени, Уллучая, Самура, Гарачая, Атачая, Хераза и Горгана, образующие пространственную последовательность с северо-запада на юго-восток. Она включает крупные горно-предгорные системы Северо-Восточного Кавказа, малые и средние водосборы Восточного Кавказа, трансграничный бассейн Самура и североиранские бассейны склонов Эльбурса. Высотный диапазон объединяет нивально-гляциальные, субальпийские, горно-луговые, лесные, степные, предгорные, полупустынные, пойменные и дельтовые комплексы [Федина, 1972; Беручашвили, 1980].

Российский сектор представлен бассейнами Сунжи, Сулака, Шура-озени, Уллучая и Самура. Сунжа отличается высокой селитебной и транспортной нагрузкой; Сулак – наибольшей полнотой высотной поясности и развитым водохозяйственным регулированием; Шура-озень и Уллучай – быстрым переходом от горных к аридным приморским комплексам; Самур – трансграничной горно-долинной структурой и чувствительной дельтово-пойменной зоной [Гюль и др., 1961; Абдулаев и др., 2011; Братков, Атаев, 2017].

Гарачай и Атачай отражают ландшафтную контрастность северо-восточного склона Большого Кавказа, где аграрное освоение и нарушение склонов повышают экогеоморфологические риски [Будагов, 1988; Кучинская, 2011; Ализаде, Тарихазер, 2015]. Хераз и Горган характеризуют североиранский сектор: здесь влажные каспийские и горно-лесные комплексы соседствуют с интенсивно используемыми предгорьями и равнинами [Emlaei et al., 2022; Yaghoobi et al., 2024]. Такой набор объектов обеспечивает сопоставление водосборов, различающихся площадью, высотной амплитудой, водностью и типом природопользования.

Материалы и методы

Методическая схема объединяет бассейновый, ландшафтный, сравнительно-географический и геоинформационный подходы. Речной бассейн принят основной единицей анализа, а ландшафтная структура – средством интерпретации связей между зонами формирования, транзита и аккумуляции стока [Хортон, 1948; Исаченко, 1991].

Картографирование выполнялось в рабочем масштабе 1:500 000. Морфометрическая основа формировалась по SRTM DEM 30 м, Copernicus DEM 30/90 м, ALOS и ASTER GDEM; границы водосборов проверялись по топографическим картам и гидрографической сети [Tabunshchik et al., 2023]. Ландшафтные контуры уточнялись по Sentinel-2 MSI (10–20 м), Landsat-8/9 OLI/TIRS (30 м), продуктам MODIS, тематическим картам и полевым наблюдениям 2024–2025 гг. (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Исходные пространственные данные и направления их использования /
Source spatial data and their uses**

Группа данных / Data group	Материалы / Source materials	Назначение / Use
Цифровые модели рельефа / <i>Digital elevation models</i>	SRTM DEM 30 m; Copernicus DEM 30/90 m; ALOS; ASTER GDEM	Границы водосборов, высоты, уклоны, экспозиция и расчлененность / <i>Watershed boundaries, elevation, slope, aspect and dissection</i>
Мультиспектральные снимки / <i>Multispectral imagery</i>	Sentinel-2 MSI 10–20 m; Landsat-8/9 OLI/TIRS 30 m	Дешифрирование контуров, растительности, землепользования и нарушений / <i>Interpretation of landscape units, vegetation, land use and disturbances</i>
Сезонные спутниковые продукты / <i>Seasonal satellite products</i>	MODIS NDVI/EVI; MODIS Snow Cover	Сезонная динамика растительности и снежного покрова / <i>Seasonal dynamics of vegetation and snow cover</i>
Топографические и тематические карты / <i>Topographic and thematic maps</i>	Гидрография; геологические, почвенные, геоботанические и ландшафтные карты / <i>Hydrography; geological, soil, geobotanical and landscape maps</i>	Уточнение сети и формирование типологической легенды / <i>Network refinement and development of the typological legend</i>
Полевые данные и землепользование / <i>Field and land-use data</i>	Маршруты, фациальные описания, фотографии, ООПТ, дороги, карьеры / <i>Routes, facies descriptions, photographs, protected areas, roads and quarries</i>	Верификация контуров и оценка антропогенной трансформации / <i>Unit verification and assessment of anthropogenic transformation</i>
Программная среда / <i>Software environment</i>	ArcGIS Pro; QGIS; Google Earth Pro; SAGA GIS; GRASS GIS; Python/GDAL	Морфометрия, векторизация, пространственный анализ и оформление / <i>Morphometry, vectorization, spatial analysis and cartographic design</i>

Обработка выполнена в ArcGIS Pro, QGIS, Google Earth Pro, SAGA GIS и GRASS GIS; для растровых и векторных операций использованы GDAL, Rasterio, GeoPandas и NumPy. Рабочая последовательность включала формирование общей базы, выделение водосборов, морфометрический анализ, дешифрирование, классификацию, векторизацию, полевую верификацию, геоэкологическую интерпретацию и генерализацию.

Классификация строилась по иерархии «класс – тип – подтип – род – контур». Для публикационного уровня выделены два класса: равнинные и предгорно-холмистые, а также горные; шесть укрупненных групп, около 28 родов и ориентировочно 650 контуров. Основными диагностическими признаками служили высота, морфология и литология рельефа, увлажнение, почвенно-растительный покров, положение в бассейне и степень антропогенной трансформации [Беручашвили, 1980; Атаев, 2025]. Региональная основа показана на рисунке 1; детальные слои подтипов и родов сохранены в ГИС.

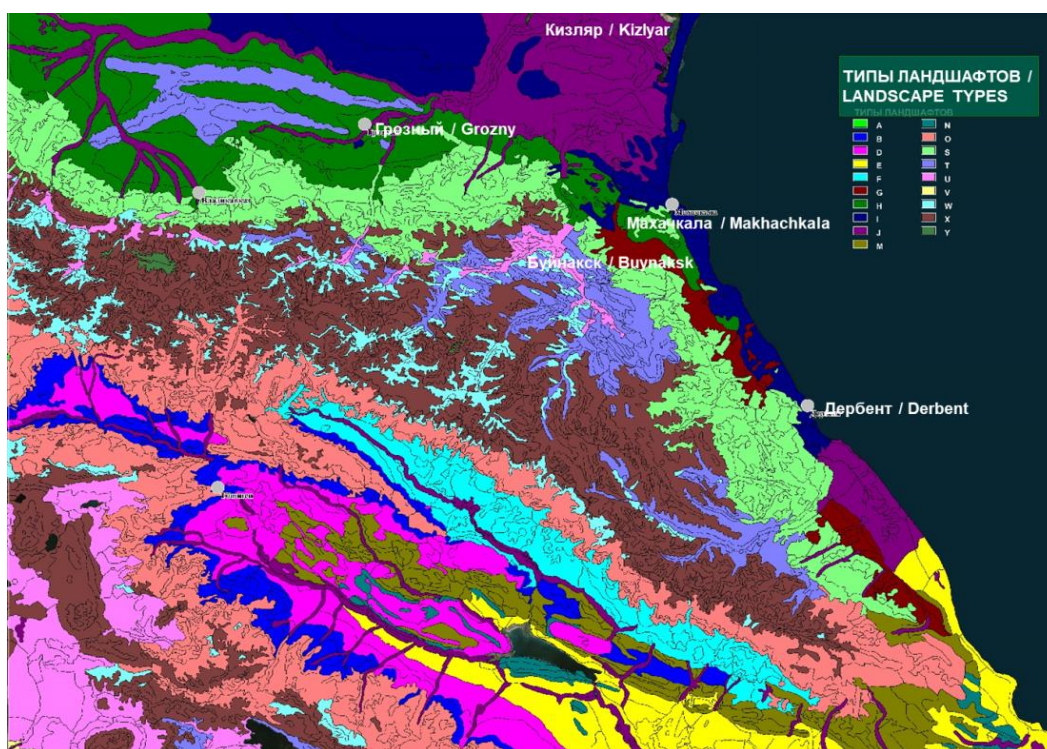


Рис. 1. Ландшафтная карта Кавказского сектора исследуемого региона (типы ландшафтов) /

Fig. 1. Landscape map of the Caucasian sector of the study region (landscape types)

Составлена по материалам авторского картографирования, цифровым моделям рельефа, данным ДЗЗ и полевым исследованиям 2024–2025 гг. /

Compiled from original mapping, digital elevation models, remote sensing data and field studies of 2024–2025.

Условные обозначения (типы ландшафтов) / Legend (landscape types)

I. Равнинные и предгорно-холмистые ландшафты / Plain and foothill-hilly landscapes

A. Равнинные и предгорно-холмистые субтропические гумидные / Plain and foothill-hilly subtropical humid;

B. Равнинные и холмистые субсредиземноморские семигумидные / Plain and hilly sub-Mediterranean semi-humid;

D. Равнинные и холмистые субтропические семиаридные / Plain and hilly subtropical semi-arid;

E. Равнинные и холмистые субтропические аридные / Plain and hilly subtropical arid;

F. Равнинные теплоумеренные семигумидные / Plain warm-temperate semi-humid;

G. Равнинные и холмистые теплоумеренные и умеренные семигумидные и семиаридные / Plain and hilly warm-temperate and temperate semi-humid and semi-arid;

H. Равнинные и холмистые теплоумеренные и умеренные семиаридные / Plain and hilly warm-temperate and temperate semi-arid;

II. Равнинные умеренные аридные / Plain temperate arid;

J. Гидроморфные и субгидроморфные / Hydromorphic and subhydromorphic.

III. Горные ландшафты / Mountain landscapes

M. Горные субтропические семиаридные / Mountain subtropical semi-arid;

N. Горные субтропические аридные / Mountain subtropical arid;

O. Горные теплоумеренные гумидные / Mountain warm-temperate humid;

S. Горные умеренные гумидные / Mountain temperate humid;

T. Горные умеренные семигумидные / Mountain temperate semi-humid;

U. Горные умеренные семиаридные / Mountain temperate semi-arid;

V. Горные умеренные аридные / Mountain temperate arid;

W. Горные холодноумеренные / Mountain cold-temperate;

X. Высокогорные луговые / High-mountain meadow;

Y. Гляциально-нивальные / Glacial-nival.

Подписи на карте / Map labels: Грозный / Grozny; Кизляр / Kizlyar; Махачкала / Makhachkala; Буйнакск / Buynaksk; Дербент / Derbent.

Для каждого ландшафтного контура в атрибутивной таблице фиксировались положение в бассейне, диапазон абсолютных высот, преобладающие уклоны и экспозиции, морфологический тип рельефа, литологическая основа, условия увлажнения, растительный покров, современное землепользование и признаки нарушения. Единый набор полей применялся во всех национальных секторах, что исключало несопоставимость легенд и позволяло выполнять одинаковые пространственные запросы для разных бассейнов [Лурье, 2008].

Генерализация включала согласование береговой линии и гидрографии, устранение топологических ошибок, объединение мелких смежных полигонов одного типа и сохранение контуров, имеющих функциональное значение для стока или природных рисков. Особое внимание уделялось переходам «горы – предгорья – равнина», поймам и дельтам: чрезмерное сглаживание этих границ снижало бы аналитическую ценность карты. Согласованность проверялась сопоставлением DEM, разновременных спутниковых изображений, тематических карт и авторских материалов [Tabunshchik et al., 2023; Zhang et al., 2024].

Полевые маршруты использовались для проверки границ контрастных комплексов, уточнения состава растительности и распознавания антропогенных нарушений, которые недостаточно надежно определяются по одному спектральному признаку. Геоэкологическая интерпретация проводилась путем совмещения ландшафтного слоя с уклонами, гидрографией, землепользованием, дорожной сетью, населенными пунктами и карьерами. Участки повышенной чувствительности выделялись при совпадении природной неустойчивости и интенсивного хозяйственного воздействия; количественная балльная оценка не применялась.

Результаты и обсуждение

Геоинформационная структура и бассейновая организация

Сформирована многослойная геоинформационная модель, включающая орографический, гидрографический, морфометрический, ландшафтный, климатический, антропогенный и геоэкологический блоки. Единая система координат, масштаб и типологическая легенда обеспечивают сопоставимость российского, азербайджанского и иранского секторов. Карта используется не только как инвентаризационный материал, но и как аналитическая основа для выявления функциональных связей и зон напряжения.

Бассейновая модель показала закономерную продольную дифференциацию: верхние части водосборов формируют основную долю стока и отличаются высокой энергией рельефа; средние выполняют транзитную функцию; нижние связаны с расширением долин, аккумуляцией наносов и ростом хозяйственной нагрузки. В бассейне Самура эта связь дополнена трансграничным водопользованием и изменениями дельты, в бассейне Сунжи – высокой концентрацией поселений и инфраструктуры [Дёмин, Шаталова, 2015; Court et al., 2025].

Высотная и типологическая дифференциация

Высотная поясность образует главный природный каркас исследуемых бассейнов. Высокогорья представлены гляциально-нивальными, скально-осыпными, альпийскими и субальпийскими комплексами; среднегорья – лесными, луговыми, степными и кустарниковыми; низкогорья и предгорья выполняют переходную функцию; поймы, равнины и дельты аккумулируют природные и антропогенные воздействия [Абдулаев и др., 2011; Tielidze et al., 2022]. Обобщенная схема приведена в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Обобщенная ландшафтная классификация и геоэкологическая чувствительность /
Generalized landscape classification and geoecological sensitivity**

Группа ландшафтов / Landscape group	Характерные комплексы / Representative complexes	Ведущая чувствительность / Main sensitivity
Высокогорные / <i>High-mountain</i>	Гляциально-нивальные, скально-осыпные, альпийские и субальпийские / <i>Glacial-nival, rocky-scrree, alpine and subalpine</i>	Формирование стока; климатическая, селевая и лавинная чувствительность / <i>Runoff formation; climatic, debris-flow and avalanche sensitivity</i>
Среднегорные / <i>Middle-mountain</i>	Лесные, луговые, степные, кустарниковые и редколесные / <i>Forest, meadow, steppe, shrub and open-forest</i>	Эрозия, оползни, пастбищная и лесохозяйственная нагрузка / <i>Erosion, landslides, grazing and forestry pressure</i>
Низкогорные и предгорные / <i>Low-mountain and foothill</i>	Лесостепные, степные, лугостепные, шибляковые и аграрные / <i>Forest-steppe, steppe, meadow-steppe, shiblyak and agricultural</i>	Узлы концентрации стока, расселения и хозяйственного освоения / <i>Nodes of runoff, settlement and economic-development concentration</i>
Долинные и пойменные / <i>Valley and floodplain</i>	Русла, поймы, террасы, галечники и тугайные участки / <i>Channels, floodplains, terraces, gravel bars and tugai areas</i>	Зависимость от паводков, русловой динамики и водозабора / <i>Dependence on floods, channel dynamics and water abstraction</i>
Равнинные и дельтовые / <i>Plain and deltaic</i>	Полупустынные, приморские, лугово-болотные, песчано-дюнные / <i>Semi-desert, coastal, meadow-wetland and sandy-dune</i>	Аридизация, засоление, дефляция и изменение уровня Каспия / <i>Aridization, salinization, deflation and Caspian Sea-level change</i>
Антропогенно преобразованные / <i>Anthropogenically transformed</i>	Города, сельхозугодья, дороги, карьеры и регулируемые водные объекты / <i>Urban areas, farmland, roads, quarries and regulated water bodies</i>	Фрагментация, загрязнение и утрата естественной структуры / <i>Fragmentation, pollution and loss of natural structure</i>

Наиболее полная вертикальная последовательность установлена для Сулака и Самура. В бассейнах Шура-озени, Гарачая и Атачая меньшая площадь сочетается с резкими переходами от горных и предгорных комплексов к аридным равнинам. Хераз и Горган отличаются сочетанием влажных южнокаспийских и горно-лесных ландшафтов с интенсивно освоенными предгорьями [Emlaei et al., 2022; Yaghoobi et al., 2024].

Картографический результат и геоэкологическая чувствительность

Сопоставление ландшафтной структуры, рельефа и землепользования позволило выделить пять типов чувствительных территорий. Крутые среднегорные и низкогорные склоны подвержены эрозионным, оползневым, обвально-осыпным и селевым процессам; предгорья выступают узлами концентрации стока и хозяйственной нагрузки; долинно-пойменные комплексы зависят от водности и русловой динамики; равнинно-дельтовые территории уязвимы к изменению водного баланса, засолению и регрессии Каспия; урбанизированные, аграрные, карьерные и транспортные участки характеризуются наибольшей антропогенной трансформацией [Ализаде, Тарихазер, 2015; Росгидромет..., 2022; Samant, Prange, 2023].

Карта бассейна реки Самур (рис. 2) демонстрирует применение общей методики к крупной трансграничной системе: от высокогорных зон формирования стока через среднегорные и долинные комплексы к дельтово-пойменному звену. Она связывает типологическое картографирование с оценкой водопользования, русловых процессов и современной трансформации прибрежных экосистем.

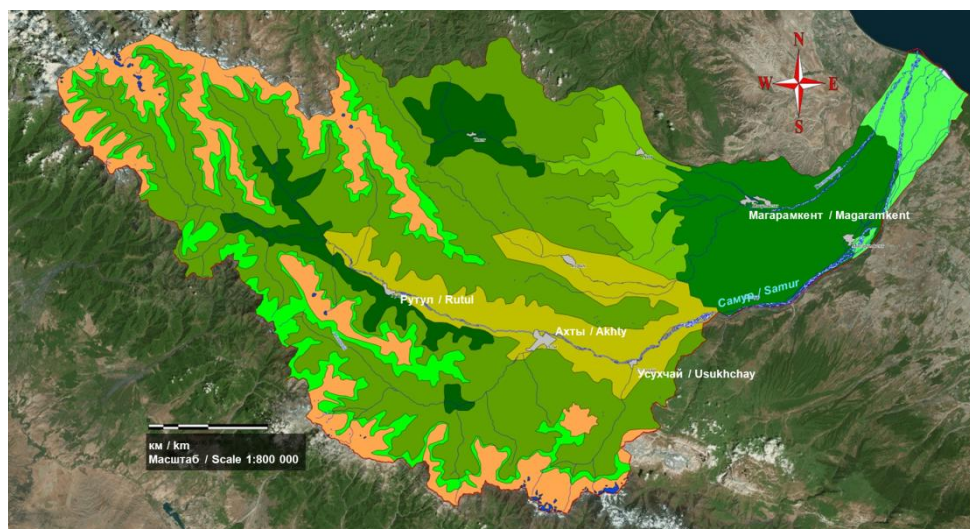


Рис. 2. Ландшафтное разнообразие бассейна реки Самур /
Fig. 2. Landscape diversity of the Samur River basin

Условные обозначения / Legend

Подтипы ландшафтов / Subtypes of landscapes

- Дельтовые и пойменные / Deltaic and floodplain
- Нижнегорно-лесные / Lower-mountain forest
- Среднегорно-лесные / Middle-mountain forest
- Среднегорные луговые, степные, шибляковые и фригановые / Middle-mountain meadow; steppe, shiblyak and phrygana
- Верхнегорные сосновые и берзовые лесные / Upper-mountain pine and birch forest
- Высокогорные субальпийские лесо-кустарниково-луговые / High-mountain subalpine forest-shrub-meadow
- Высокогорные альпийские кустарниково-луговые / High-mountain alpine shrub-meadow
- Высокогорные субнивальные / High-mountain subnival
- Гляциально-нивальные / Glacial-nival

Подписи на карте / Map labels: Самур / Samur; Рутул / Rutul; Ахты / Akhty; Усукчай / Usukhchay; Магарамкент / Magaramkent.

Значение для мониторинга

Практическое значение составленной геоинформационной базы заключается в возможности регулярно обновлять спутниковые слои и отслеживать динамику растительности, снежного покрова, нарушенных земель, пойменных и дельтовых экосистем. Продукты глобального мониторинга земного покрова расширяют временной ряд и позволяют унифицировать контроль изменений в разных странах [Zhang et al., 2022, 2024].

Методическое преимущество подхода состоит в замене административной рамки естественными границами водосбора и в сохранении сопоставимой иерархии ландшафтных единиц. Это создает основу для межбассейнового анализа, выбора ключевых участков полевых наблюдений и последующих тематических оценок природных рисков и устойчивости природно-хозяйственных систем.

Заключение

Выполненное исследование позволило разработать геоинформационную основу среднемасштабного ландшафтного картографирования трансграничных бассейнов горных рек кавказского и североиранского секторов Прикаспийского региона. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность сочетания бассейнового, ландшафтного и геоинформационного подходов при изучении сложных горно-предгорно-равнинных систем, находящихся в условиях климатической изменчивости и возрастающей антропогенной нагрузки.

Выводы по проведенному исследованию сводятся к следующему.

1. Разработана единая геоинформационная основа среднемасштабного ландшафтного картографирования девяти бассейнов Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Северного Ирана. Общие масштаб, система координат и типологическая легенда обеспечивают межбассейновое и трансграничное сопоставление.

2. Подтверждено, что естественные границы водосбора корректнее административных рубежей отражают функциональные связи между зонами формирования, транзита и аккумуляции стока.

3. Высотная поясность определяет основной каркас ландшафтной организации. На публикационном уровне выделены два класса, шесть укрупненных групп и около 28 родов ландшафтов; наиболее полная вертикальная последовательность свойственна бассейнам Сулака и Самура.

4. К зонам повышенной геоэкологической чувствительности отнесены крутые склоны, предгорные узлы геосистемного напряжения, долинно-пойменные и дельтовые комплексы, а также территории интенсивной антропогенной трансформации.

5. Созданная ГИС пригодна для регулярного мониторинга изменений земного покрова, уточнения полевых маршрутов, оценки природных рисков и подготовки согласованных мер управления трансграничными водосборными территориями.

Литература

1. Абдулаев К.А., Атаев З.В., Братков В.В. Современные ландшафты Горного Дагестана. – Махачкала: ДГПУ, 2011. – 116 с.
2. Ализаде Э.К., Тарихазер С.А. Экогеоморфологическая опасность и риск на Большом Кавказе: в пределах Азербайджана. – М.: МАКС-Пресс, 2015. – 208 с.
3. Атаев З.В. Теоретико-методологические основы и региональные особенности выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных геосистем // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v.
4. Беручашвили Н.Л. Объяснительная записка к Ландшафтной карте Кавказа. – Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1980. – 54 с.
5. Братков В.В., Атаев З.В. Оценка влияния современных климатических условий на природно-территориальные комплексы Северо-Восточного Кавказа (по материалам дистанционного зондирования Земли) // Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 2(31). – С. 6–14.
6. Будагов Б.А. Современные естественные ландшафты Азербайджана. – Баку: Элм, 1988. – 134 с.
7. Гюль К.К., Власова С.В., Кисин И.М., Тертеров А.А. Реки Дагестанской АССР. – Махачкала: Дагкнигоиздат, 1961. – 370 с.
8. Дёмин А.П., Шаталова К.Ю. Принципы и практика распределения водных ресурсов трансграничных рек России // География и природные ресурсы. – 2015. – № 1. – С. 22–29.
9. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. – М.: Высшая школа, 1991. – 366 с.
10. Кучинская И.Я. Ландшафтно-экологическая дифференциация горных геосистем: на примере северного склона Юго-Восточного Кавказа. – Баку: Victory, 2011. – 195 с.
11. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.
12. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с.
13. Солнцев Н.А. О морфологии природного географического ландшафта // Вопросы географии. – 1949. – Сб. 16. – С. 61–86.
14. Федина А.Е. Физико-географическое районирование восточной части северного склона Большого Кавказа // Ландшафтное картографирование и физико-географическое районирование горных областей. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – С. 5–96.
15. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов: гидрофизический подход к количественной морфологии / пер. с англ. Д.Л. Арманда, В.А. Троицкого; под ред. М.А. Великанова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1948. – 158 с.

16. Court R., Lattuada M., Shumeyko N., Baimukanov M., Eybatov T., Kaidarova A., Mamedov E.V., Rustamov E., Tasmagambetova A., Prange M., Wilke T., Hassall C., Goodman S.J. Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure // *Communications Earth and Environment*. – 2025. – Vol. 6. – Art. No. 261. DOI: 10.1038/s43247-025-02212-5.
17. Dadparvar S., Mianabadi A., Mianabadi H., Amoghin S.N., Anvari S. Assessment of drought trends in the Aras River Basin: Spatiotemporal changes and implications for transboundary water management // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2025. – Vol. 61. – Art. No. 102761. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102761.
18. Emlaei Z., Pourebrahim S., Heidari H., Lee K.E. The impact of climate change as well as land-use and land-cover changes on water yield services in Haraz Basin // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. No. 13. – Art. No. 7578. DOI: 10.3390/su14137578.
19. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections // *Communications Earth and Environment*. – 2023. – Vol. 4. – Art. No. 357. DOI: 10.1038/s43247-023-01017-8.
20. Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T., Pham C.N., Klyuchkina A. Identification of river basins within northwestern slope of Crimean Mountains using various digital elevation models (ASTER GDEM, ALOS World 3D, Copernicus DEM, and SRTM DEM) // *Frontiers in Earth Science*. – 2023. – Vol. 11. – Art. No. 1218823. DOI: 10.3389/feart.2023.1218823.
21. Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 // *The Cryosphere*. – 2022. – Vol. 16. – pp. 489–504. DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.
22. Winkler K., Fuchs R., Rounsevell M., Herold M. Global land use changes are four times greater than previously estimated // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12. – Art. No. 2501. DOI: 10.1038/s41467-021-22702-2.
23. Yaghoobi M., Fathi A., Fazli S. et al. Impact of land use dynamics on the water yields in the Gorgan River basin // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. No. 16. – Art. No. e35674. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35674.
24. Zhang X., Liu L., Zhao T., Gao Y., Chen X., Mi J. GISD30: global 30 m impervious-surface dynamic dataset from 1985 to 2020 using time-series Landsat imagery on the Google Earth Engine platform // *Earth System Science Data*. – 2022. – Vol. 14. – pp. 1831–1856. DOI: 10.5194/essd-14-1831-2022.
25. Zhang X., Zhao T., Xu H., Liu W., Wang J., Chen X., Liu L. GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method // *Earth System Science Data*. – 2024. – Vol. 16. – pp. 1353–1381. DOI: 10.5194/essd-16-1353-2024.

References

1. Abdulaev K.A., Ataev Z.V., Bratkov V.V. Modern landscapes of Mountain Dagestan. Makhachkala. DSPU. 2011. 116 p. (In Russ.)
2. Alizade E.K., Tarikhazer S.A. Ecogeomorphological hazard and risk in the Greater Caucasus: within Azerbaijan. Moscow. MAKS Press. 2015. 208 p. (In Russ.)
3. Ataev Z.V. Theoretical and methodological foundations and regional features of delineating foothill landscapes as independent geosystems. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. pp. 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v. (In Russ.)
4. Beruchashvili N.L. Explanatory note to the Landscape Map of the Caucasus. Tbilisi. TSU Publishing House. 1980. 54 p. (In Russ.)
5. Bratkov V.V., Ataev Z.V. Assessment of the influence of modern climatic conditions on natural-territorial complexes of the North-Eastern Caucasus (based on remote sensing data). *Monitoring. Science and Technologies*. 2017. No. 2(31). pp. 6–14. (In Russ.)
6. Budagov B.A. Modern natural landscapes of Azerbaijan. Baku. Elm. 1988. 134 p. (In Russ.)
7. Gyul K.K., Vlasova S.V., Kisin I.M., Terterov A.A. Rivers of the Dagestan ASSR. Makhachkala. Dagknigoizdat. 1961. 370 p. (In Russ.)
8. Demin A.P., Shatalova K. Yu. Principles and practice of water resource allocation in transboundary rivers of Russia. *Geography and Natural Resources*. 2015. No. 1. pp. 22–29. (In Russ.)

9. Isachenko A.G. Landscape science and physico-geographical zoning. Moscow. Vysshaya Shkola. 1991. 366 p. (In Russ.)
10. Kuchinskaya I.Ya. Landscape-ecological differentiation of mountain geosystems: on the example of the northern slope of the South-Eastern Caucasus. Baku. Victory. 2011. 195 p. (In Russ.)
11. Lurie I.K. Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of satellite images. Moscow. KDU. 2008. 424 p. (In Russ.)
12. Roshydromet. Third assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation. General summary. St. Petersburg. Naukoemkie Tekhnologii. 2022. 124 p. (In Russ.)
13. Solntsev N.A. On the morphology of natural geographical landscape. Problems of Geography. 1949. Vol. 16. pp. 61–86. (In Russ.)
14. Fedina A.E. Physical-geographical zoning of the eastern part of the northern slope of the Greater Caucasus. Landscape mapping and physical-geographical zoning of mountain regions. Moscow. MSU Publishing House. 1972. pp. 5–96. (In Russ.)
15. Horton R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Translated from English by D.L. Armand and V.A. Troitsky; M.A. Velikanov, ed. Moscow. Foreign Literature Publishing House. 1948. 158 p. (In Russ.)
16. Court R., Lattuada M., Shumeyko N., Baimukanov M., Eybatov T., Kaidarova A., Mamedov E.V., Rustamov E., Tasmagambetova A., Prange M., Wilke T., Hassall C., Goodman S.J. Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. Communications Earth and Environment. 2025. Vol. 6. Art. No. 261. DOI: 10.1038/s43247-025-02212-5.
17. Dadparvar S., Mianabadi A., Mianabadi H., Amoghin S.N., Anvari S. Assessment of drought trends in the Aras River Basin: Spatiotemporal changes and implications for transboundary water management. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2025. Vol. 61. Art. No. 102761. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102761.
18. Emlaei Z., Pourebrahim S., Heidari H., Lee K.E. The impact of climate change as well as land-use and land-cover changes on water yield services in Haraz Basin. Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 13. Art. No. 7578. DOI: 10.3390/su14137578.
19. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. Communications Earth and Environment. 2023. Vol. 4. Art. No. 357. DOI: 10.1038/s43247-023-01017-8.
20. Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T., Pham C.N., Klyuchkina A. Identification of river basins within northwestern slope of Crimean Mountains using various digital elevation models (ASTER GDEM, ALOS World 3D, Copernicus DEM, and SRTM DEM). Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. Art. No. 1218823. DOI: 10.3389/feart.2023.1218823.
21. Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. The Cryosphere. 2022. Vol. 16. pp. 489–504. DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.
22. Winkler K., Fuchs R., Rounsevell M., Herold M. Global land use changes are four times greater than previously estimated. Nature Communications. 2021. Vol. 12. Art. No. 2501. DOI: 10.1038/s41467-021-22702-2.
23. Yaghoobi M., Fathi A., Fazli S. et al. Impact of land use dynamics on the water yields in the Gorgan River basin. Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 16. Art. No. e35674. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35674.
24. Zhang X., Liu L., Zhao T., Gao Y., Chen X., Mi J. GISD30: global 30 m impervious-surface dynamic dataset from 1985 to 2020 using time-series Landsat imagery on the Google Earth Engine platform. Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. pp. 1831–1856. DOI: 10.5194/essd-14-1831-2022.
25. Zhang X., Zhao T., Xu H., Liu W., Wang J., Chen X., Liu L. GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method. Earth System Science Data. 2024. Vol. 16. pp. 1353–1381. DOI: 10.5194/essd-16-1353-2024.

УДК 551.435.32:528.8:556.55(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

Оригинальная статья

Оценка эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России по данным лидарной съемки и цифрового моделирования рельефа

О.С. Ермолаева¹, В.С. Тынченко², С.И. Горбачев¹,
Е.А. Рожков³, В.В. Герасиди⁴

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, gor-sergey1@yandex.ru;

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

³ Кубанский государственный аграрный университет, Россия, 350044,
г. Краснодар, ул. им. Калинина, 13, e-mail: zhenyacool31@yandex.ru;

⁴ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Статья поступила: 11.08.2026, доработана: 15.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Береговые склоны водохранилищ Юга России испытывают воздействие колебаний уровня воды, поверхностного стока, абразионного подмыва, атмосферного увлажнения и хозяйственной нагрузки. В таких условиях эрозионное разрушение развивается неравномерно, а маршрутные обследования не всегда выявляют малые формы рельефа, особенно на участках с растительностью. **Цель исследования.** Разработать подход к оценке эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России на основе лидарной съемки и цифрового моделирования рельефа. **Методы исследования.** Использованы материалы наземного обследования и беспилотной лидарной съемки береговых склонов. На основе плотного облака точек построена цифровая модель рельефа, по которой рассчитаны крутизна склонов, профильная и плановая кривизна, расчлененность рельефа, плотность линейных форм стока, положение участков относительно уреза воды и признаки нарушения растительного покрова. Устойчивость оценивалась по совокупности морфометрических и геоэкологических признаков. **Результаты.** Наиболее информативными показателями оказались крутизна поверхности, профильная и плановая кривизна, плотность линейных форм стока, расчлененность рельефа и положение участка относительно уреза воды. Опасные зоны формируются при сочетании высокой крутизны, подмыва основания склона, нарушения растительности, развития промоин и накопления осыпного материала. Выделены устойчивые, условно устойчивые, неустойчивые и активно разрушающиеся участки. Лидарная съемка позволяет выявлять формы глубиной 0,12–0,15 м и использовать результаты для мониторинга береговых процессов.

Ключевые слова: лидарная съемка, береговые склоны, водохранилища, эрозионная устойчивость, цифровая модель рельефа, геоэкологический мониторинг, Юг России, склоновые процессы.

Для цитирования: Ермолаева О.С., Тынченко В.С., Горбачев С.И., Рожков Е.А., Герасиди В.В. Оценка эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России по данным лидарной съемки и цифрового моделирования рельефа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

Original paper

Assessment of erosion resistance of bank slopes of reservoirs in the South of Russia based on LiDAR survey data and digital terrain modeling

O.S. Ermolaeva¹, V.S. Tynchenko², S.I. Gorbachev¹,
E.A. Rozhkov³, V.V. Gerasidi⁴

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation, e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, gor-sergey1@yandex.ru;

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

³ Kuban State Agrarian University, 13 Kalinin Str., Krasnodar 350044, Russian Federation, e-mail: zhenyacool31@yandex.ru;

⁴ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Received: 11.08.2025, revised: 15.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Reservoir bank slopes in Southern Russia are affected by water level fluctuations, surface runoff, abrasion undercutting, atmospheric wetting, and anthropogenic pressure. Under such conditions, erosion develops unevenly, while field surveys do not always detect small terrain forms, especially in vegetated areas. **Aim.** The study aims to develop an approach for assessing the erosion resistance of reservoir bank slopes in Southern Russia using LiDAR survey data and digital terrain modeling. **Methods.** Field survey materials and UAV-based LiDAR data of bank slopes were used. A digital terrain model was constructed from a dense point cloud, and slope steepness, profile and plan curvature, terrain dissection, density of linear runoff forms, position relative to the water edge, and signs of vegetation disturbance were calculated. Stability was assessed using a set of morphometric and geoecological indicators. **Results.** The most informative indicators were slope steepness, profile and plan curvature, density of linear runoff forms, terrain dissection, and position relative to the water edge. Hazardous zones form where high slope steepness, undercutting at the slope base, disturbed vegetation, gully development, and talus accumulation coincide. Stable, conditionally stable, unstable, and actively eroding parts of the bank zone were identified. LiDAR surveying detects erosion forms 0.12–0.15 m deep and provides data for monitoring bank processes.

Keywords: LiDAR survey, bank slopes, reservoirs, erosion resistance, digital terrain model, geoecological monitoring, Southern Russia, slope processes.

For citation: Ermolaeva O.S., Tynchenko V.S., Gorbachev S.I., Rozhkov E.A., Gerasidi V.V. Assessment of erosion resistance of bank slopes of reservoirs in the South of Russia based on LiDAR survey data and digital terrain modeling. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

Введение

Береговые склоны водохранилищ Юга России являются сложными природно-техническими объектами, состояние которых определяется геологическим строением, уровенным режимом, литологией, увлажнением, растительным покровом и хозяйственным использованием прибрежных зон [Яицкая и др., 2024]. Значимость их изучения

возрастает, поскольку водохранилища используются для водоснабжения, энергетики, орошения и рекреации [Sazzad et al., 2025], а береговые зоны постоянно перестраиваются под влиянием абразионного подмыва, промоин, осыпей и склоновых деформаций [Fomina et al., 2016]. Поэтому оценка эрозионной устойчивости является важной частью геоэкологического мониторинга [Pospehov, Savon-Vaciano, 2024].

Природные условия региона неоднородны: склоны могут быть сложены коренными породами, рыхлыми аллювиальными и делювиальными отложениями, лессовидными суглинками, песчано-глинистыми толщами и техногенно нарушенными грунтами [Parviz et al., 2024]. Поэтому внешне сходные участки по-разному реагируют на колебания уровня воды, осадки и поверхностный сток [Yelemessov et al., 2026], а маршрутные обследования дают важную, но фрагментарную информацию [Орлова и др., 2025].

Традиционные методы оценки включают полевые наблюдения, карты, геологические разрезы, аэрофотосъемку и спутниковые изображения [Karanski et al., 2025]. Однако спутниковые данные плохо выявляют мелкие эрозионные формы под растительностью [Татаринцев и др., 2026], а полевые работы не всегда дают непрерывную картину берега [Азаров и др., 2024]. Поэтому возрастает роль высокоточных дистанционных методов, прежде всего лидарной съемки [Reang et al., 2025].

Лидарные данные позволяют строить цифровые модели рельефа по плотному облаку точек [Karshyga et al., 2022] и фиксировать малые формы разрушения: уступы, промоины, борозды стока, бровки осыпей, просадки и слабые трещины [Скоробогатко и др., 2024]. После отделения растительности и техногенных объектов такие модели становятся основой морфометрического анализа [Ospanova et al., 2025] и количественной оценки устойчивости береговой зоны [Chamanpira et al., 2025].

Эрозионная устойчивость определяется не только крутизной склона [Бахаева, Анащенко, 2025], но и его длиной, экспозицией, формой профиля, расчлененностью, ложбинами стока, высотой уступа, растительностью, составом и влажностью грунтов [Толеубекова и др., 2025]. Важен также подмыв основания и изменение положения уреза воды [Malozyomov et al., 2024], поскольку они провоцируют осыпание, оползание и образование промоин [Parasar, Krishna, 2025].

Цель работы — разработать подход к оценке эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России по данным лидарной съемки и цифровой модели рельефа. Такой подход позволяет выделять участки разной устойчивости по совокупности морфометрических признаков и использовать результаты для мониторинга, первоочередного обследования и обоснования берегоукрепительных мероприятий [Ramakrishnan et al., 2024].

Методы и материалы

Материалом исследования стали данные наземного обследования и дистанционной съемки береговых склонов водохранилищ Юга России с разной степенью переработки береговой линии. Выбирались участки с выраженными признаками эрозионного нарушения: промоинами, бровками обрушения, подмывом основания склона, осыпными накоплениями и нарушенным растительным покровом. Высота склонов составляла 4–28 м, крутизна изменялась от 7–10° до 38–45°, что позволило сопоставить устойчивые и активно разрушающиеся формы рельефа.

Пространственные данные получали с помощью беспилотной лидарной съемки. Использовались БПЛА квадрокоптерного типа с лазерным сканирующим модулем, а координатная привязка выполнялась двухчастотным GNSS-приемником в режиме RTK/PPK. На отдельных участках закладывались опорные точки с точностью 1,5–2,5 см в плане и 2–4 см по высоте. Съемка проводилась с высоты 70–110 м при скорости полета 5–8 м/с, поперечном перекрытии 40–50% и продольном перекрытии фотосъемки не менее 75%. Полученные облака имели плотность 120–450 точек/м².

Полевые работы выполнялись в сухой период, без осадков и сильного ветра. На участок береговой линии длиной 800–1200 м приходилось 2–4 полетных задания, охватывающих верхнюю, приборочную и приустьевую зоны склона.

Обработка данных включала корректировку траектории по GNSS/IMU, удаление шумовых точек, объединение маршрутов и классификацию облака на классы «земля», «растительность», «постройки», «водная поверхность» и прочие объекты. После фильтрации строилась цифровая модель рельефа с шагом 0,25 м для детальных участков и 0,5 м для всей береговой полосы. Среднеквадратическая ошибка по высоте обычно составляла 3–7 см.

По цифровой модели рассчитывались крутизна, экспозиция, профильная и плановая кривизна, относительная высота, вертикальная расчлененность, плотность ложбин стока и длина склоновых водосборов. Дополнительно выделялись свежие промоины глубиной более 0,15–0,20 м, линейные понижения, уступы, ниши подмыва и зоны аккумуляции осыпного материала. Для полосы шириной 20–50 м от уреза воды рассчитывался интегральный показатель эрозионной устойчивости, по которому участки группировались на устойчивые, условно устойчивые, неустойчивые и активно разрушающиеся. Такой подход дает пространственную основу для выбора мест детального обследования и мониторинга береговых склонов.

Результаты и обсуждение

В результате лидарной съемки была получена детальная цифровая модель рельефа береговых склонов водохранилищ Юга России. Она показала, что береговая зона имеет более сложное строение, чем фиксируется при визуальном обследовании или по обычным космическим снимкам. На участках, внешне воспринимаемых как ровные склоны, выявлены мелкие промоины, бровки, уступы, локальные просадки и зоны аккумуляции смытого материала. После фильтрации растительности лидарные данные позволили анализировать именно поверхность земли, что важно для количественной оценки эрозионной устойчивости.

Средняя плотность итогового облака точек составляла 170–310 точек/м² на открытых участках и 75–130 точек/м² на участках с кустарниковой растительностью. Цифровая модель рельефа с шагом 0,25 м позволила выделить формы микрорельефа глубиной от 0,12–0,15 м. Линейные формы стока на пологих участках имели глубину 0,10–0,25 м и ширину 0,4–0,8 м, а при уклонах более 25° их глубина возрастала до 0,6–1,2 м.

Из рисунка 1 видно, что эрозионная расчлененность проявляется фрагментарно и часто совпадает с нарушенными участками верхней части склона: дорогами, тропами, технологическими проездами и зонами разреженной растительности. Промоины обычно ориентированы по линии наибольшего падения склона, а у подножия могут веерообразно расширяться. Поэтому верхняя часть склона выступает зоной зарождения стока, средняя – зоной максимального размыва, а нижняя – зоной выноса и частичного накопления материала.

При анализе карты уклонов было установлено, что устойчивые и условно устойчивые участки чаще всего соответствовали поверхностям с крутизной до 12–15° (рис. 1). На таких склонах отсутствовали глубокие промоины, а рельеф имел сглаженный характер. Даже при наличии поверхностного стока разрушение здесь проявлялось в виде слабого смыва, без формирования развитой эрозионной сети. Участки с крутизной 15–25° занимали промежуточное положение. На них уже появлялись отдельные борозды и неглубокие промоины, но их развитие сильно зависело от растительного покрова. Если склон был хорошо задернован, то даже при уклоне около 20° признаки разрушения были выражены слабо. Если же растительный покров был нарушен, то при такой же крутизне формировались достаточно четкие линейные понижения. Наиболее

неустойчивыми оказались участки с крутизной более 25–30°, особенно если они располагались в зоне подмыва или имели выпуклый профиль, при котором поверхностный сток быстро концентрируется в отдельных направлениях (табл. 1).

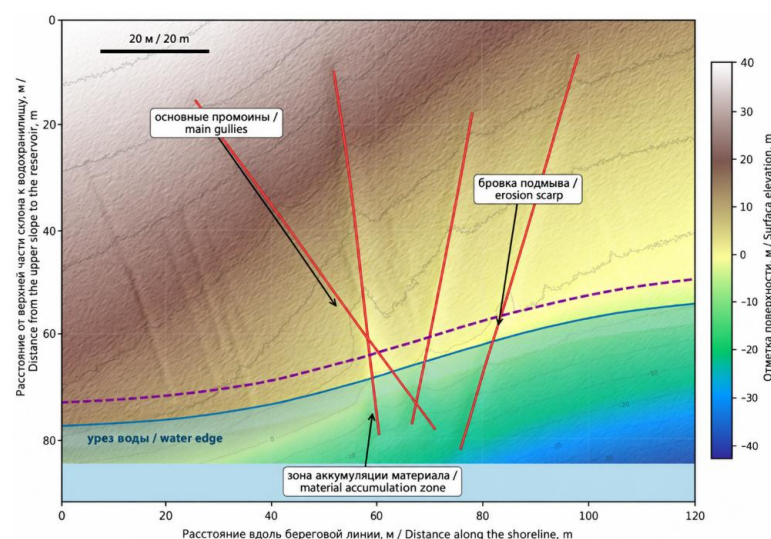


Рис. 1. Фрагмент цифровой модели рельефа берегового склона с выделенными эрозионными формами/

Fig. 1. Fragment of a digital relief model of a coastal slope with highlighted erosion forms

Таблица 1 / Table 1

Морфометрические признаки береговых склонов, выделенные по данным лидарной съемки / Morphometric features of coastal slopes identified from lidar survey data

Тип участка берегового склона / Type of coastal slope section	Крутизна поверхности, град. / Surface steepness, degrees	Высота склона, м / Slope height, m	Глубина промоин, м / Gully depth, m	Ширина промоин, м / Gully width, m	Плотность эрозионных форм, ед./100 м / Density of erosional forms, units/100 m	Основные признаки состояния поверхности / Main indicators of surface condition
Пологий задернованный склон / Gentle grass-covered slope	7–12	4–8	0.05–0.15	0.2–0.5	1–2	Поверхность сглаженная, растительный покров практически сплошной, признаки свежего размыва выражены слабо / The surface is smoothed, vegetation cover is almost continuous, and signs of recent erosion are weakly expressed
Умеренно крутой склон с отдельными промоинами / Moderately steep slope with separate gullies	12–20	6–14	0.15–0.45	0.4–1.0	3–5	Наблюдаются отдельные линейные формы стока, местами нарушен дерновый слой / Separate linear runoff forms are observed, and the turf layer is locally disturbed
Крутой склон с развитой эрозионной сетью / Steep slope with a developed erosion network	20–30	8–22	0.45–1.20	0.8–2.0	6–9	Промоины хорошо выражены, имеются локальные уступы и зоны выноса материала у основания / Gullies are clearly expressed, with local scarps and material removal zones at the base

Тип участка берегового склона / Type of coastal slope section	Крутизна поверхности, град. / Surface steepness, degrees	Высота склона, м / Slope height, m	Глубина промоин, м / Gully depth, m	Ширина промоин, м / Gully width, m	Плотность эрозионных форм, ед./100 м / Density of erosional forms, units/100 m	Основные признаки состояния поверхности / Main indicators of surface condition
Подмываемый береговой уступ / Undercut coastal scarp	25–38	6–18	0.30–0.90	0.6–1.5	5–8	В нижней части фиксируются ниши подмыва, свежие осыпи и резкое изменение профиля склона / Undercutting niches, fresh talus, and a sharp change in the slope profile are recorded in the lower part
Активно разрушающийся склон / Actively degrading slope	30–45	10–28	0.80–1.50	1.2–2.4	8–12	Поверхность расчленена, растительность разрежена, имеются свежие бровки обрушения и аккумуляция материала у подножия / The surface is dissected, vegetation is sparse, and fresh collapse edges and material accumulation at the foot are present

Крутизна склона не является единственным показателем эрозионной опасности. Отмечены участки с высоким уклоном, но устойчивой поверхностью за счет плотного дернового слоя и отсутствия подмыва. Напротив, склоны средней крутизны могли быть сильно нарушены из-за слабой связности грунтов, рыхлых прослоев и техногенного воздействия.

Поэтому устойчивость оценивалась по совокупности морфометрических признаков, а не только по карте уклонов. Активная эрозия чаще приурочена к вогнутым участкам, где концентрируется поверхностный сток; выпуклые формы чаще связаны с осыпанием и мелким обрушением. По данным ЦМР ширина линейных понижений составляла 0,7–2,4 м, глубина – 0,3–1,5 м. Свежие стенки размыва с перепадами 0,25–0,40 м (рис. 2) указывают на недавнюю активизацию процесса.

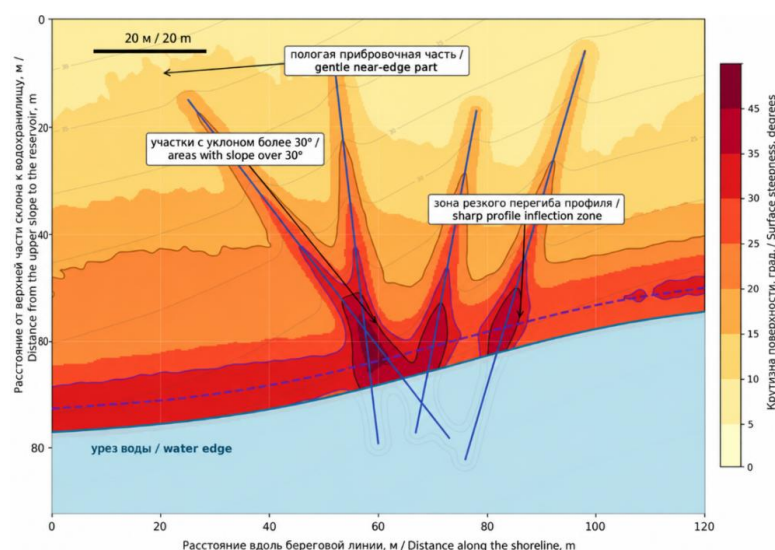


Рис. 2. Карта уклонов исследуемого участка береговой зоны водохранилища /
Fig. 2. Map of slopes of the studied section of the coastal zone of the reservoir

Большое значение имело положение участка относительно уреза воды. В нижней части береговых склонов, в пределах полосы шириной 3–8 м от уреза воды, были выделены зоны абразионного подмыва. В цифровой модели они проявлялись в виде резкого изменения профиля склона и небольших ниш, расположенных почти параллельно береговой линии. На участках с рыхлыми грунтами такие ниши сопровождалась осыпанием верхнего материала, из-за чего склон приобретал ступенчатый профиль. При повторном визуальном сопоставлении с полевыми фотографиями было видно, что свежий материал у основания склона имеет более светлую окраску и слабое закрепление растительностью. Это подтверждает, что данные лидарной съемки достаточно хорошо отражают не только геометрию поверхности, но и позволяют косвенно судить о современной активности процесса.

В результате классификации береговой зоны по интегральному показателю эрозионной устойчивости были выделены четыре основные группы участков. Устойчивые участки занимали около 31% изученной береговой линии. Они характеризовались небольшой крутизной, сглаженной формой профиля, отсутствием развитых промоин и хорошим растительным покровом. Условно устойчивые участки составили около 27%. На них были отмечены отдельные мелкие формы смыва, но они не образовывали единой эрозионной сети и не имели признаков быстрого развития. Неустойчивые участки занимали около 26% береговой линии. Для них были характерны уклоны более 20°, наличие промоин, локальных уступов, слабое закрепление поверхности растительностью и признаки периодического подмыва нижней части. Наиболее опасная группа, то есть активно разрушающиеся участки, составила около 16% (табл. 2). Здесь одновременно проявлялись несколько неблагоприятных факторов: высокая крутизна склона, вогнутый профиль, нарушение растительного покрова, свежие промоины и абразионное воздействие у основания.

Таблица 2 / Table 2

**Классификация береговой зоны по степени эрозионной устойчивости /
Classification of the coastal zone according to the degree of erosion resistance**

Класс устойчивости берегового склона / Stability class of the coastal slope	Доля от общей длины исследованной береговой линии, % / Share of the total length of the studied shoreline, %	Типичные значения уклона, град. / Typical slope values, degrees	Характер эрозионных проявлений / Nature of erosional manifestations	Геоэкологическая оценка состояния / Geoecological assessment of condition
Устойчивые участки / Stable sections	31	До 12–15 / Up to 12–15	Глубокие промоины отсутствуют, возможен слабый поверхностный смыв / Deep gullies are absent; weak surface wash may occur	Состояние относительно стабильное, регулярного вмешательства не требуется / The condition is relatively stable, and regular intervention is not required
Условно устойчивые участки / Conditionally stable sections	27	12–20	Отмечаются отдельные мелкие борозды стока и локальные нарушения дернового слоя / Separate shallow runoff rills and local disturbances of the turf layer are observed	Необходим периодический контроль, особенно после сильных осадков и колебаний уровня воды / Periodic control is required, especially after heavy precipitation and water-level fluctuations

Класс устойчивости берегового склона / Stability class of the coastal slope	Доля от общей длины исследованной береговой линии, % / Share of the total length of the studied shoreline, %	Типичные значения уклона, град. / Typical slope values, degrees	Характер эрозионных проявлений / Nature of erosional manifestations	Геоэкологическая оценка состояния / Geoeological assessment of condition
Неустойчивые участки / Unstable sections	26	20–30	Развиты промоины, локальные уступы, местами наблюдается подмыв основания склона / Gullies and local scarps are developed; undercutting of the slope base is observed in places	Требуется детальное обследование и включение в программу мониторинга / Detailed investigation and inclusion in the monitoring program are required
Активно разрушающиеся участки / Actively degrading sections	16	Более 30 / More than 30	Имеются свежие промоины, осыпи, бровки обрушения и зоны аккумуляции материала / Fresh gullies, talus, collapse edges, and material accumulation zones are present	Участки повышенной опасности, нуждаются в первоочередном инженерно-геологическом изучении / High-hazard sections requiring priority engineering-geological investigation

Полученное соотношение показывает, что большая часть береговой зоны не находится в состоянии катастрофического разрушения, но значительная доля участков уже имеет признаки снижения устойчивости. Особенно важно, что активно разрушающиеся участки не всегда занимают большую площадь, но именно они определяют общий риск дальнейшего развития опасных процессов. В пределах таких фрагментов даже небольшое изменение условий, например повышение уровня воды, длительное переувлажнение или механическое нарушение поверхности, может привести к расширению зоны разрушения. В этом смысле лидарная съемка хорошо подходит не только для фиксации текущего состояния, но и для создания исходной базы последующего мониторинга. Если повторить съемку через один или два сезона, можно будет уже количественно определить скорость смещения бровки, объем вынесенного материала и изменение формы склонов.

Интересным результатом стало то, что наиболее опасные зоны часто располагались не на самых высоких склонах, а на участках средней высоты, где сочетаются подмыв основания и слабая устойчивость грунтов (рис. 3). Высокие склоны, сложенные более плотными породами и покрытые растительностью, в ряде случаев сохраняли устойчивость, несмотря на значительную крутизну. Напротив, склоны высотой 6–12 м, сложенные рыхлыми суглинками и супесями, разрушались быстрее, особенно если верхняя часть была нарушена тропами или временными подъездными путями. Это показывает, что высота склона является важным, но не решающим фактором. Более существенное значение имеет сочетание геометрии поверхности, литологического состава и режима увлажнения. Полученные данные хорошо согласуются с общими представлениями о развитии береговых процессов, но дают более детальную пространственную картину.

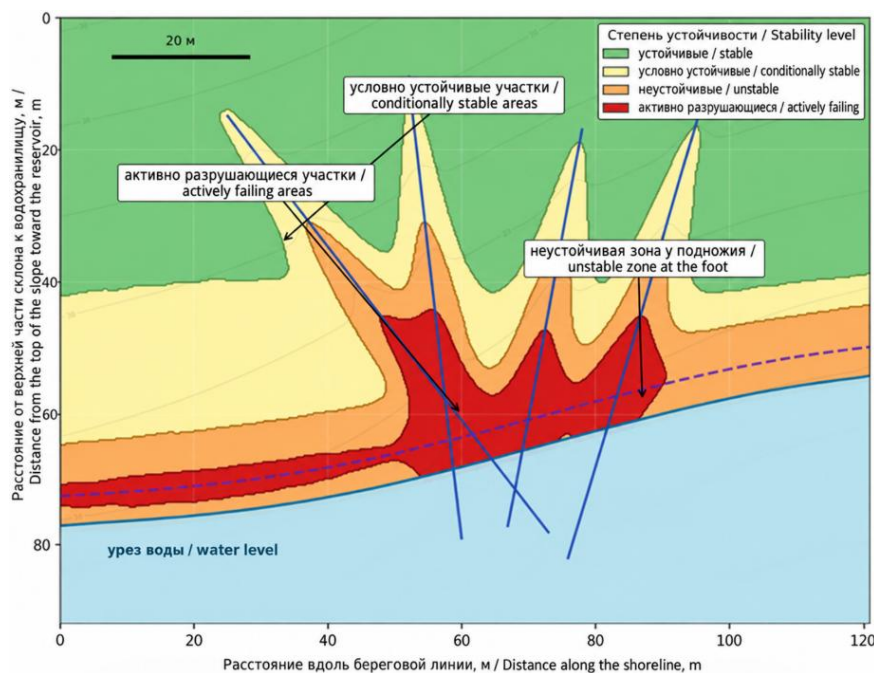


Рис. 3. Схема районирования берегового склона по степени эрозионной устойчивости /
Fig. 3. Scheme for zoning the coastal slope according to the degree of erosion resistance

Следует отметить и ограничения выполненной оценки. Лидарная съемка позволяет очень точно описать поверхность рельефа, но она не дает прямой информации о прочностных характеристиках грунтов, их влажности, сцеплении, угле внутреннего трения и степени трещиноватости. Поэтому полученная карта устойчивости должна рассматриваться как геоморфологическая и геоэкологическая оценка, а не как полный инженерно-геологический расчет устойчивости откоса. Для участков, отнесенных к активно разрушающимся, в дальнейшем необходимы бурение, отбор проб, лабораторные испытания грунтов и расчет устойчивости склонов по предельному равновесию. Однако даже без этих данных лидарная модель дает возможность существенно сузить зону детального обследования и направить инженерно-геологические работы именно туда, где они действительно необходимы.

Таким образом, результаты исследования показывают, что применение лидарной съемки для оценки эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России является достаточно эффективным методом. Его преимущество состоит в высокой детализации рельефа, возможности выделять слабовыраженные формы разрушения и выполнять количественное сравнение разных участков береговой зоны. В отличие от обычного описания берегов, такой подход позволяет получить пространственно непрерывную картину состояния склонов и выделить зоны различной степени опасности. Наиболее информативными признаками оказались крутизна поверхности, профильная кривизна, плотность линейных форм стока, наличие подмыва у основания и степень нарушения растительного покрова. При совместном использовании эти показатели позволяют достаточно уверенно определить, какие участки находятся в устойчивом состоянии, а какие уже переходят в стадию активного разрушения. Для практики мониторинга водохранилищ это имеет большое значение, так как дает возможность не только фиксировать последствия эрозии, но и заранее выделять те фрагменты береговой линии, где риск дальнейшего разрушения наиболее высок.

Выводы

В результате исследования установлено, что лидарная съемка является эффективным способом оценки эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России. Цифровая модель рельефа, построенная по плотному облаку точек, позволяет выявлять мелкие промоины, бровки подмыва, локальные уступы, зоны накопления смытого материала и участки слабого проседания, которые при обычном маршрутном обследовании фиксируются хуже.

Наиболее информативными показателями эрозионной устойчивости являются крутизна поверхности, профильная и плановая кривизна, плотность линейных форм стока, степень расчлененности рельефа и положение участка относительно уреза воды. При этом устойчивость береговой зоны нельзя оценивать только по одному признаку, например по крутизне склона. Более обоснованной является комплексная оценка с учетом геометрии поверхности, состояния растительного покрова и проявлений современных эрозионных процессов.

По результатам обработки цифровой модели рельефа выделены устойчивые, условно устойчивые, неустойчивые и активно разрушающиеся участки береговых склонов. Наиболее опасные зоны приурочены к местам, где одновременно наблюдаются подмыв основания склона, развитие линейной эрозии и накопление осыпного материала у подножия.

Эрозионная активность имеет выраженную пространственную неоднородность и развивается не сплошной полосой, а отдельными фрагментами. Поэтому при мониторинге важно учитывать не только протяженность опасных участков, но и их внутреннее строение. Предложенный подход может использоваться для геоэкологического мониторинга, выбора зон детального инженерно-геологического изучения и повторной оценки берегов после паводков, сильных осадков или резких изменений уровня воды.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В. Теоретические исследования возможности использования туннельных волн для мониторинга состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.
2. Бахаева С.П., Ананенко Е.В. Обоснование критериев прогноза устойчивости природно-технической системы «отвал – основание» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 5–20. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_5.
3. Орлова Н.С., Волик М.В., Бесаева З.В., Валиева Т.Р. Исследование устойчивости склонов горной породы с использованием программы SiO 2D // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 3. – С. 1409–1421. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1409-1421.
4. Скоробогатко М.Р., Батугин А.С., Беляев Е.Н. Картирование трещиноватости бортов карьера с использованием возможностей нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 75–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_75.
5. Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Лебедева Л.В. Оценка экологической реакции пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) на воздействие разных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94.
6. Толубекова Ж.З., Тиреуов К.М., Курмангалиева З.Н., Татаринцев В.Л. Экологическая реакция сельскохозяйственных культур на условия выращивания как основа управления устойчивостью агроландшафтов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712.
7. Яицкая Н.А., Халиева А.А., Бригида В.С., Плиева М.Т. Геоэкологические методы оценки динамики береговой линии на Черноморском побережье Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. № 2. – С. 720–732. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-720-732.
8. Chamanpira R., Dehghani R., Veyskarami I. Evaluation of groundwater level using hybrid models: case study: Khorramabad plain // Water and Soil Management and Modeling. – 2025. – Vol. 5. No. 2. – pp. 124–137. DOI: 10.22098/mmws.2024.15077.1459.

9. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 86. – Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
10. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y., Martyushev N.V. Geospatial clustering in smart city resource management: an initial step in the optimisation of complex technical supply systems // Smart Cities. – 2025. – Vol. 8. No. 1. – Art. No. 14. DOI: 10.3390/smartcities8010014.
11. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica // Metals. – 2022. – Vol. 12. No. 12. – Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.
12. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks // Mathematics. – 2024. – Vol. 12. No. 3. – Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.
13. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2025. – Vol. 17. No. 4. – pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
14. Parasar P., Krishna A.P. Explainable AI-driven assessment of hydro climatic interactions shaping river discharge dynamics in a monsoonal basin // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. No. 1. – Art. No. 27302. DOI: 10.1038/s41598-025-13221-x.
15. Parviz L., Azizi N., Kafili-Golgasem M. Spectral analysis-artificial intelligence model with spatial variables for some soil chemical properties estimation // Water and Soil Management and Modeling. – 2024. – Vol. 4. No. 3. – pp. 321–338. DOI: 10.22098/mmws.2023.13308.1321.
16. Posphehov G.B., Savon-Vaciano Yumira. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2024. – No. 12-1. – pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.
17. Ramakrishnan J., John R., Mavaluru D., Ravali R.S., Srinivasan K. Transforming groundwater sustainability, management and development through deep learning // Groundwater for Sustainable Development. – 2024. – Vol. 27. – Art. No. 101366. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101366.
18. Reang D., Tume S.J.P., Vats P., Choudhury M., Rai H.M. Forecasting the future: predictive modeling for water resource management // Advances in Hydrology: Spatial Intelligence, Climate Change, and Sustainable Water Resource Management. – 2025. – pp. 95–122. DOI: 10.1016/B978-0-443-26777-2.00006-5.
19. Sazzad M.M., Ahmed T., Kibria G., Khan I. IoT based soil moisture measurement and type prediction using advanced regression and machine learning models // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. No. 1. – Art. No. 35730. DOI: 10.1038/s41598-025-19444-2.
20. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2026. – Vol. 2026. No. 3. – pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

References

1. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V. Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2024. No. 4. pp. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155. (In Russ.)
2. Bakhaeva S.P., Ananenko E.V. Substantiation of stability criteria for waste dump–foundation natural–technical system. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2025. No. 12-2. pp. 5–20. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_5. (In Russ.)
3. Orlova N.S., Volik M.V., Besaeva Z.V., Valieva T.R. Study of rock slopes stability using SiO 2D program. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. No. 3. pp. 1409–1421. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1409-1421. (In Russ.)
4. Skorobogatko M.R., Batugin A.S., Belyaev E.N. Pit wall jointing mapping using neural network capacities. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2024. No. 11. pp. 75–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_75. (In Russ.)

5. Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Lebedeva L.V. Assessment of the ecological reaction of soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to the effects of various factors. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026. Vol. 18. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94. (In Russ.)
6. Toleubekova Z.Z., Tireuov K.M., Kurmangalieva Z.N., Tatarintsev V.L. Ecological response of agricultural crops to growing conditions as a basis for managing the sustainability of agricultural landscapes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 2. pp. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712. (In Russ.)
7. Yaitskaya N.A., Khalieva A.A., Brigida V.S., Plieva M.T. Geoecological methods for assessing the coastline dynamics on the Caucasus Black Sea coast. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 720–732. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-720-732. (In Russ.)
8. Chamanpira R., Dehghani R., Veyskarami I. Evaluation of groundwater level using hybrid models: case study: Khorramabad plain. *Water and Soil Management and Modeling*. 2025. Vol. 5. No. 2. pp. 124–137. DOI: 10.22098/mmws.2024.15077.1459.
9. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
10. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y., Martyushev N.V. Geospatial clustering in smart city resource management: an initial step in the optimisation of complex technical supply systems. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8. No. 1. Art. No. 14. DOI: 10.3390/smartcities8010014.
11. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 12. Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.
12. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. *Mathematics*. 2024. Vol. 12. No. 3. Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.
13. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
14. Parasar P., Krishna A.P. Explainable AI-driven assessment of hydro climatic interactions shaping river discharge dynamics in a monsoonal basin. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1. Art. No. 27302. DOI: 10.1038/s41598-025-13221-x.
15. Parviz L., Azizi N., Kafili-Golgasem M. Spectral analysis-artificial intelligence model with spatial variables for some soil chemical properties estimation. *Water and Soil Management and Modeling*. 2024. Vol. 4. No. 3. pp. 321–338. DOI: 10.22098/mmws.2023.13308.1321.
16. Pospehov G.B., Savon-Vaciano Yusmira. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 12-1. pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.
17. Ramakrishnan J., John R., Mavaluru D., Ravali R.S., Srinivasan K. Transforming groundwater sustainability, management and development through deep learning. *Groundwater for Sustainable Development*. 2024. Vol. 27. Art. No. 101366. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101366.
18. Reang D., Tume S.J.P., Vats P., Choudhury M., Rai H.M. Forecasting the future: predictive modeling for water resource management. *Advances in Hydrology: Spatial Intelligence, Climate Change, and Sustainable Water Resource Management*. 2025. pp. 95–122. DOI: 10.1016/B978-0-443-26777-2.00006-5.
19. Sazzad M.M., Ahmed T., Kibria G., Khan I. IoT based soil moisture measurement and type prediction using advanced regression and machine learning models. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1. Art. No. 35730. DOI: 10.1038/s41598-025-19444-2.
20. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

УДК 551.2.01-551.3.053

DOI: 10.46698/VNC.2026.58.54.001

Оригинальная статья

Геоэкологическое районирование горных территорий Центрального Кавказа: классификация по уровням нагрузки и типам риска

В.Б. Заалишвили^{1,2,3}, М.О. Ревазов¹, Д.А. Мельков¹,
О.Г. Бурдзиева¹, И.Г. Архиреева¹

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

² Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России,
Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29;

³ Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова,
Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46

Статья поступила: 17.07.2026, доработана: 09.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Горные территории Центрального Кавказа характеризуются исключительно высокой геодинамической активностью, обусловленной продолжающейся коллизией литосферных плит, развитой сетью разломов, сейсмичностью до 8–9 баллов и интенсивными экзогенными процессами. На фоне активного хозяйственного освоения и развития туризма оценка геоэкологических рисков становится приоритетной задачей. **Материалы и методы.** Исследование охватывает три ключевые зоны Центрального Кавказа: Кармадонское, Даргавское и Фиагдонское ущелья Республики Северная Осетия-Алания. Всего рассмотрено 39 участков размерами 2×2 км. Методология основана на экспертно-балльном ранжировании 25 факторов воздействия. **Результаты.** Установлено, что наиболее опасными процессами являются сели (вклад до 25% от суммарного риска), оползни (до 18%) и сейсмическая активность (до 15%). Выделены 4 класса геоэкологического состояния: слабая ($D < 0,45$), средняя (0,45–0,55), высокая (0,55–0,65) и регрессивная ($D > 0,65$) нагрузки. Предложена классификация участков по четырём типам риска (тектонно-сейсмический, склоново-эрозионный, селе-гляциальный и смешанный), что позволяет обоснованно выбирать приоритетные стратегии управления рисками.

Ключевые слова: геоэкологическая нагрузка, экспертные оценки, уязвимость, сели, оползни, сейсмичность, зонирование.

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Ревазов М.О., Мельков Д.А., Бурдзиева О.Г., Архиреева И.Г. Геоэкологическое районирование горных территорий Центрального Кавказа: классификация по уровням нагрузки и типам риска. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.58.54.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.58.54.001

Original paper

Geoecological zoning of mountain regions in the Central Caucasus: classification by load levels and risk types

V.B. Zaalishvili^{1,2,3}, M.O. Revazov¹, D.A. Melkov¹,
O.G. Burdzieva¹, I.G. Arkhireeva¹

¹ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: cgi_ras@mail.ru;

² Central Research Institute of Construction, Ministry of Construction,
Housing and Utilities of the Russian Federation, 29 Vernadsky Ave.,
Moscow 119331, Russian Federation;

³ North Ossetian State University after K.L. Khetagurov,
44-46 Vatutin Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation

Received: 17.07.2026, revised: 09.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The mountainous territories of the Central Caucasus are characterized by exceptionally high geodynamic activity, driven by the ongoing collision of lithospheric plates, an extensive fault network, seismic intensity up to 8–9, and intense exogenous processes. Amidst active economic development and the growth of tourism, the assessment of geoecological risks has become a priority task. **Materials and Methods.** The study covers three key zones in the Central Caucasus: the Karmadon, Dargavs, and Fiagdon gorges in the Republic of North Ossetia-Alania. A total of 39 sites, each measuring 2×2 km, were analyzed. The methodology is based on an expert scoring system ranking 25 impact factors. **Results.** It was determined that the most hazardous processes are debris flows (contributing up to 25% of the total risk), landslides (up to 18%), and seismic activity (up to 15%). Four classes of geoecological status have been identified: low ($D < 0.45$), moderate (0.45–0.55), high (0.55–0.65), and regressive ($D > 0.65$) load. A classification of sites based on four risk types (tectonic-seismic, slope-erosion, debris flow-glacial, and mixed) is proposed, enabling the informed selection of priority risk management strategies.

Keywords: geoecological load, expert assessments, vulnerability, debris flows, landslides, seismicity, zoning.

For citation: Zaalishvili V.B., Revazov M.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Arkhireeva I.G. Geoecological zoning of mountain regions in the Central Caucasus: classification by load levels and risk types. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.58.54.001

Введение

Горные территории Центрального Кавказа характеризуются исключительно высокой геодинамической активностью, обусловленной продолжающейся коллизией литосферных плит, развитой сетью разломов, высокой сейсмичностью (до 8–9 баллов) и интенсивными экзогенными процессами [Гончаренко и др., 2008; Габараев и др., 2023; Стасенко и др., 2023; Яицкая и др., 2023]. На фоне активного хозяйственного освоения

оценка геоэкологических рисков становится приоритетной задачей, особенно в связи с развитием туризма [Заалишвили, Чотчаев, 2022; Бурдзиева и др., 2024a].

Кармадонское, Даргавское и Фиагдонское ущелья являются ключевыми полигонами, где сконцентрированы практически все опасные процессы: землетрясения, оползни, сели, обвалы, эрозия, карст, ледниковые пульсации. Трагические события (сход ледника Колка в 2002 г.) подчёркивают необходимость количественной оценки геоэкологической нагрузки для обоснования защитных мер.

Цель работы – выполнить комплексную количественную оценку геоэкологической нагрузки на выделенных участках, выделить наиболее опасные участки и процессы и обобщить данные.

Материалы и методы

Метод зонирования высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам – это комплексный географический и геоэкологический подход, направленный на выделение зон с разной степенью устойчивости природной среды к антропогенным воздействиям и естественным геологическим процессам [Dilley et al., 2005; Cutter, 2008, 2014; Corominas et al., 2014; Jaedicke et al. 2014; Vranken et al., 2015]. Для количественной оценки геоэкологического воздействия геодинамических факторов использована методика, предложенная в работе [Чотчаев и др., 2021], в которой сделана выборка всех проявляющихся геодинамических и климатических факторов. Интенсивность воздействия каждого на окружающую среду оценена по пятибалльной системе, при этом в основе балльности рассматривается не сила сотрясения, а способность каждого геодинамического фактора к ускорению денудации пород, ослаблению их инженерных свойств, развитию четвертичных отложений, опасных геологических процессов и, в конечном счете, ускоренному изменению геоэкологической ситуации.

Максимальный ранг воздействия отдельного фактора устанавливался на основе методологии экспертных оценок [Гольцман, 1976, 1980] в виде учета массопереноса (обвалы-осыпи, сели, оползни и т. п.), ландшафтно-геоморфологических изменений (подвижки ледников, сход лавин), а также ожидаемых длительных или краткосрочных последствий (тектонические, вулcano-плутонические проявления, землетрясения, сейсмодислокации). Принято, что воздействие на геоэкологическую ситуацию N факторов, каждый интенсивностью в один ранг или единичный ранг, соответствует наименьшему влиянию данного фактора на геоэкологическое состояние, а уровень 5-го ранга – наибольшему.

Исследование охватывает три ключевые зоны Центрального Кавказа (Республика Северная Осетия-Алания):

- Фиагдонская зона (участки №№ 1–15) – долина р. Фиагдон, характеризующаяся высокой тектонической раздробленностью;
- Даргавская зона (участки №№ 16–27) – территория Даргавского сельского поселения, плотно застроенная;
- Кармадонская зона (участки №№ 28–39) – долина р. Геналдон, включая район схода ледника Колка.

В итоге рассматривается 39 участков размерами 2×2 км. Методология основана на экспертно-балльном ранжировании 25 факторов воздействия, объединённых в группы [Чотчаев и др., 2020; Заалишвили, Чотчаев, 2022; Ревазов и др., 2026]:

А. Тектоно-сейсмические: землетрясения ($W_{\max} = 5$), зоны активных нарушений ($W = 3$), пересечения разломов ($W = 4$), трещинная тектоника ($W = 5$), сейсмодислокации ($W = 3$).

Б. Геолого-геоморфологические: распространение четвертичных отложений ($W = 4$), мягкие коренные породы ($W = 3$), базис эрозии ($W = 2$), углы наклона рельефа ($W = 2-3$), мощность четвертичных отложений ($W = 2-3$).

В. Экзогенные процессы: сели ($W = 5$), оползни ($W = 3$), обвалы-осыпи ($W = 4$), плоскостной смыв ($W = 3$), боковая эрозия ($W = 4$), струйная эрозия ($W = 3$), карст ($W = 3$), ледниковые события ($W = 4$).

Г. Геофизические: статические поля ($W = 2$).

Для каждого фактора установлены 4 уровня воздействия (слабый, средний, высокий, регрессивный) с соответствующими весовыми коэффициентами D_i (1; 1,5; 2; 3–5 в зависимости от фактора).

$$\text{Риск } R_i = W_i \times D_i. \quad (1)$$

Суммарный риск $R = \sum R_i$ для каждого участка.

Максимальный весовой рейтинг $W = \sum W_{\max i} = 67$ (с учётом нулевых факторов).

$$\text{Уязвимость } D = R / W, \quad (2)$$

характеризующая геоэкологическое состояние участка.

На основе значений D выделены 4 класса:

- Слабая нагрузка: $D < 0,40$;
- Средняя нагрузка: $0,40 \leq D < 0,55$;
- Высокая нагрузка: $0,55 \leq D < 0,70$;
- Регрессивная нагрузка: $D \geq 0,70$.

Результаты и обсуждение

В результате выполнено зонирование геоэкологической нагрузки (рис. 1–2). Наиболее напряжённая ситуация характерна для Даргавской зоны, где среднее $D = 0,57$, а участок 8 с $D = 0,71$ достигает регрессивного уровня ($D \geq 0,65$). Среднее значение геоэкологической нагрузки по всей территории составило 0,57 при близком медианном значении 0,56. Для отдельных зон средние значения также близки к средним по всей территории:

- Фиагдонская зона (участки №№ 1–15) – среднее 0,57, медианное 0,59;
- Даргавская зона (участки №№ 16–27) – среднее 0,59, медианное 0,59;
- Кармадонская зона (участки №№ 28–39) – среднее 0,56, медианное 0,56.

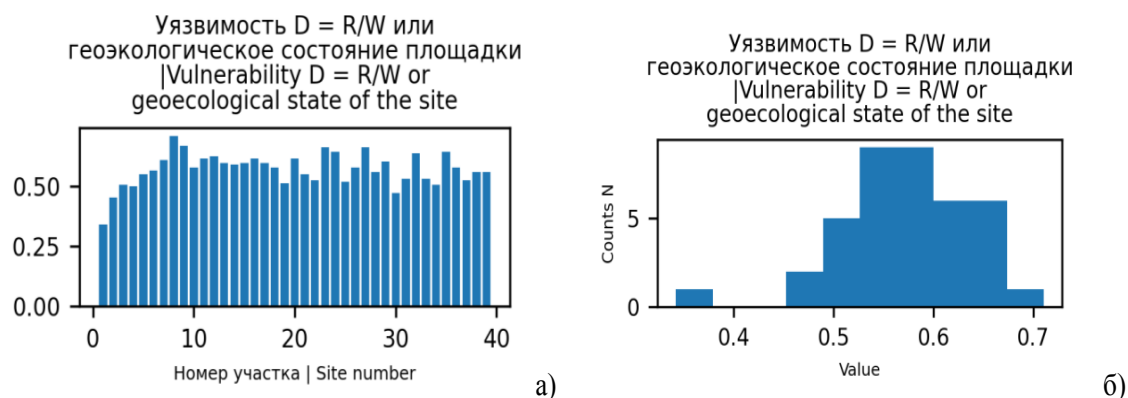


Рис. 1. Результаты ранжирования территории по комплексу факторов воздействия геодинамических и климатических процессов: оценка геоэкологического состояния отдельных зон (а), соответствующая гистограмма распределения (б) /

Fig. 1. Results of ranking the territory based on a complex of factors involving the impact of geodynamic and climatic processes: assessment of the geo-ecological state of individual zones (a) and the corresponding distribution histogram (b)

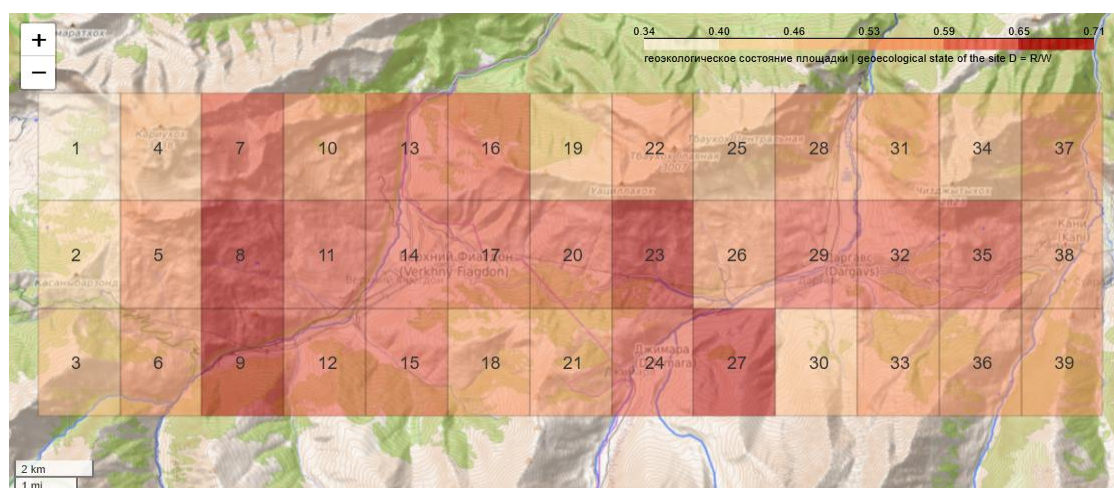


Рис. 2. Схема ранжирования территории по комплексу факторов воздействия геодинамических и климатических процессов (цифрами обозначены номера участков) /

Fig. 2. Diagram showing the ranking of the territory based on a complex of factors involving the impact of geodynamic and climatic processes (numbers indicate sites designations)

В целом дополнительно к указанному участку регрессионного уровня можно выделить следующие участки с максимальной нагрузкой (близкой к пороговой):

- участок № 8 (Фиагдонская зона) – $D = 0,71$;
- участок № 9 (Фиагдонская зона) – $D = 0,67$;
- участок № 23 (Даргавская зона) – $D = 0,66$;
- участок № 27 (Даргавская зона) – $D = 0,66$.

Слабый уровень нагрузки ($D < 0,45$) определен только для первого участка; для второго участка является пороговым:

- участок № 1 (Фиагдонская зона) – $D = 0,34$;
- участок № 2 (Фиагдонская зона) – $D = 0,45$.

Таким образом, именно в Фиагдонской зоне наблюдается наибольший разброс геоэкологической нагрузки.

На основе анализа весовых коэффициентов и значений R_i для всех 39 участков выполнено ранжирование процессов по вкладу в формирование геоэкологической нагрузки (табл. 1). Наиболее значимыми процессами являются сели (до 25%), оползни (до 18%) и землетрясения (до 16%). Совместно они формируют более половины суммарной геоэкологической нагрузки (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Ранжирование процессов по вкладу в геоэкологическую нагрузку /
Ranking of processes by their contribution to the geo-ecological load

№	Процесс / Process	$W_{\max}$	Средний вклад в R, % / Average contribution to R, %
1	Сели / Mudflows	5	22–25%
2	Землетрясения / Earthquakes	5	14–16%
3	Оползни / Landslides	3	16–18%
4	Трещинная тектоника / Fracture tectonics	5	12–14%
5	Пересечения разломов / Fault intersections	4	9–11%
6	Обвалы-осыпи / Rockfalls and scree	4	8–10%
7	Боковая эрозия / Lateral erosion	4	6–8%
8	Мощность четвертичных отложений / Thickness of Quaternary deposits	3	5–7%

Map of the Dargavsi area in the Caucasus region, showing a 3x12 grid of cells with numerical values. The map includes geographical features like mountains, rivers, and settlements. A scale bar at the top indicates distances from 0.0 to 3.0 km. A legend at the bottom left shows a 2 km and 1 mi scale. The grid cells contain numbers ranging from 1 to 4, with some cells containing the number 3. The map is color-coded by elevation, with green representing lower elevations and brown/yellow representing higher elevations.

2	4	2	2	4	1	2	3	4	2	4	2	4
2	2	2	4	4	2	1	2	3	4	2	1	1
2	2	2	4	4	1	2	1	3	3	3	3	3

Fig. 3. Zoning map of the territory based on prevailing factors:

Группа С «Селе-гляциальные» (участки №№ 22, 29, 30, 33, 36, 39). Характеризуются максимальными значениями по селевой активности (ранг 4–5 у ряда участков), ледниковым событиям (ранг 1,5–2), обвалам (ранг 1–2) и значительным объёмом твёрдого стока. Вклад селе-гляциальных факторов составляет 34–38% от R – ниже порога 40%, но является наибольшим среди групп для этих участков. Для этих участков приоритетны селезащитные сооружения, мониторинг ледников и прогноз паводков. Наибольший уровень риска соответствует участку 29.

Группа D «Смешанного типа» (участки №№ 4, 11, 12, 13, 14, 15, 25, 31, 32, 37). Характеризуются равномерным распределением рисков по всем группам процессов (вклад каждой группы не превышает 40%). Требуют комплексного подхода к инженерной защите. Фактически на участках, где одновременно присутствуют несколько групп факторов, взаимодействие между ними может приводить к значительному усилению рисков в результате каскадных эффектов (например, оползень → подпрудное озеро → прорывной паводок) [Kharismalatri et al., 2025]. При сопоставлении результатов с суммарными уровнями риска (рис. 2) наибольший эффект следует ожидать для участков 13, 14, 15, 31, 32.

Порог > 40% для отнесения участка к группе с доминирующим фактором был установлен на основе следующих соображений. Во-первых, при четырёх группах факторов средний вклад каждой группы составляет 25%; порог 40% существенно превышает этот уровень, что позволяет исключить случаи, где преобладание одной группы статистически незначимо. Во-вторых, порог 33% (равный 1/3) был отвергнут как слишком мягкий. В-третьих, порог 50% (абсолютное большинство) был отвергнут как слишком строгий: при четырёх группах факторов абсолютное большинство достигается редко, и большинство участков попали бы в категорию «смешанного типа», что снизило бы практическую ценность классификации. Ограничение подхода в том, что порог 40% не выведен строго статистически, а установлен экспертно. Следует отметить, что группа C выделена для значений селе-гляциального фактора 34–38%, но при условии его преобладания. Поэтому данная категория может рассматриваться как подгруппа D «смешанного типа», но при этом четко приурочена к Кармадонской зоне и, таким образом, составляет отдельный комплекс. Участки группы D, характеризующиеся равномерным распределением рисков по всем группам процессов, могут рассматриваться как граничные зоны между геоморфологическими системами с различным динамическим состоянием [Phillips, 1992]. Это также согласуется с современными представлениями о каскадных опасностях и режимных сдвигах в геоморфологических системах [Kharismalatri et al., 2025]. Согласно данным [Кашменская, 1980; Кашменская, Хворостова, 1989], именно в граничных зонах наблюдаются наиболее контрастные динамические состояния, и именно здесь требуется соблюдение наибольшей осторожности при возведении инженерных сооружений. Это объясняет необходимость комплексного подхода к защите таких участков: они находятся на стыке разных режимов функционирования, и воздействие на них может вызвать каскадные перестройки в смежных системах.

Предложенная классификация участков по доминирующим факторам может быть представлена в виде картографической модели динамических состояний геоморфологических систем [Кашменская, 1980; Кашменская, Хворостова, 1989]. Такая карта отображает не просто распределение уровней нагрузки, но и качественные различия в механизмах массо- и энергообмена: участки группы A характеризуются преобладанием эндогенного массопереноса, группы B – гравитационного и флювиального, группы C – гляциального и селевого, группы D – совместным действием нескольких агентов. Картографическая модель не только дает оценку текущего состояния, но и может быть использована для прогноза реакции систем на техногенные воздействия [Xue et al., 2025].

Полученные результаты согласуются с исследованиями [Чотчаев и др., 2020; Бурдзиева и др., 20246], подтверждающими определяющую роль тектонического фактора и селевой активности в формировании геоэкологической нагрузки на Центральном Кавказе. Настоящее исследование вводит количественную классификацию участков по четырём группам с пороговыми значениями вклада (> 40%), что позволяет диффе-

ренцировать инженерно-защитные мероприятия. Аналогичные подходы к выделению «горячих точек» оползневой опасности представлены в работах [Corominas et al., 2014; Jaedicke et al., 2014], однако они не содержат формализованного деления на группы с количественными порогами и не охватывают весь спектр процессов (тектонические, склоновые, селевые, гляциальные). Выделение участков по доминирующим факторам геоэкологической нагрузки представляет собой, по существу, типизацию динамических состояний геоморфологических систем, а расчёт уязвимости D – количественную оценку их геоморфологического потенциала [Кашменская, Хворостова, 1989; Brunnsden, 2001].

Преемственность с предшествующими работами [Чотчаев и др., 2020, 2021; Бурдзиева и др., 2024a] обеспечивается сохранением общего методического аппарата и подтверждением ключевых положений о ведущей роли тектонического фактора и селевой активности в формировании геоэкологической нагрузки на Центральном Кавказе.

Ограничение используемого подхода, как и всех экспертно-балльных методов, состоит в определённой субъективности весовых коэффициентов. Однако использование формализованного порога для отнесения к группам снижает произвольность интерпретации по сравнению с чисто описательными классификациями.

Выводы

1. На основе экспертно-балльного ранжирования 25 факторов выполнена количественная оценка геоэкологической нагрузки для 39 участков Кармадонского, Даргавского и Фиагдонского ущелий.

2. Установлено, что наиболее опасными процессами являются сели (весовой рейтинг 5), оползни (весовой рейтинг 3) и землетрясения (весовой рейтинг 5). Эти три процесса формируют значительную часть геоэкологической нагрузки на всех участках.

3. Выделены наиболее неблагоприятные участки с высокими уровнями нагрузки ($D = 0,66–0,70$): №№ 8, 9 (Фиагдонская зона), №№ 23, 27 (Даргавская зона).

4. Предложена классификация участков на четыре группы по ведущим факторам риска: тектоно-сейсмические, склоново-эрозионные, селе-гляциальные и смешанного типа.

5. Полученные результаты могут быть использованы при планировании хозяйственного освоения горных территорий, выборе приоритетных участков мониторинга и разработке мероприятий по снижению геоэкологических рисков.

Литература

1. 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.

2. Бурдзиева О.Г., Мельков Д.А., Ревазов М.О., Кортиев А.Л. Активизация оползневых процессов, обусловленная урбанизацией горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024б. – Т. 16. № 4(62). – С. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658.

3. Габараев А.Ф., Мельков Д.А., Кортиев А.Л., Козырев Е.Н. Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 198–212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016.

4. Гольцман Ф.М. Комплексирование наблюдений при распознавании геофизических объектов // Физика Земли. – 1976. – №7. – С. 40–54.

5. Гольцман Ф.М. Информационная содержательность эксперимента и учет корреляции нечисловых признаков при распознавании геофизических объектов // Физика Земли. – 1980. – № 10. – С. 71–85.

6. Гончаренко О.А., Заалишвили В.Б., Караев Ю.И., Никитин М.Ю. Опасные геологические процессы Северного Кавказа // В сб.: Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А, 2008. – С. 160–166.
7. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – 230 с.
8. Кашменская О.В. Теория систем и геоморфология. – Новосибирск: Наука, 1980. – 120 с.
9. Кашменская О.В., Хворостова З.М. Концепция картографирования геоморфологических систем. – Новосибирск, 1989. – 12 с. (Препр./ Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР; №17).
10. Ревазов М.О., Мельков Д.А., Бурдзиева О.Г., Архиреева И.Г. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние горных территорий (Кармадонское ущелье) // Геология и геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. № 1. – С. 217–227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001.
11. Стасенко А.А., Данилин М.Н., Харченко В.М., Неркарарян А.Е. Геоморфологическое, геолого-тектоническое строение, геодинамические и экологические условия горы Машук и примыкающей территории центральной части района Кавказских Минеральных вод // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 47–58. DOI: 10.46698/VNC.2023.74.77.004.
12. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.
13. 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.
14. Яицкая Н.А., Дзаганя Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.
15. Brunsden D., Thornes J.B. Landscape sensitivity and change // Transactions of the Institute of British Geographers. – 1979. – Vol. 4. – pp. 463–484.
16. Brunsden D. A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology // Catena. – 2001. – Vol. 42. – pp. 99–123.
17. Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Mallet J.-P. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // Bulletin of Engineering Geology and Environment. – 2014. – Vol. 73. No. 2. – pp. 209–263.
18. Cutter S.L., Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2008. – Vol. 105. Issue 7. – pp. 2301–2306. DOI: 10.1073/pnas.0710375105.
19. Cutter S.L. Building disaster resilience: steps toward sustainability // Challenges in Sustainability. – 2014. – Vol. 1(2). – pp. 72–79.
20. Dilley M., Chen R.S., Deichmann W., Lerner-Lam A.L., Arnold M. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. – Washington D.C.: The World Bank, 2005.
21. Jaedicke C., Van Den Eeckhaut M., Nadim F., Hervas J., Kalsnes B. et al. Identification of landslide hazard and risk ‘hotspots’ in Europe // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2014. – Vol. 73. – pp. 325–339. DOI: 10.1007/s10064-013-0541-0.
22. Kharismalatri H.S., Gomi T., Sidle R.C. Geomorphic thresholds for cascading hazards of debris flows and natural dam formation caused by large landslides // Natural Hazards. – 2025. – Vol. 121. – pp. 15537–15552. DOI: 10.1007/s11069-025-07402-0.
23. Xue L., Hu X., Tang Q., Qi S., Moucha R. Post-anthropogenic landscape evolution: Terrain reshaping and geomorphic response in the Loess Plateau // Geomorphology. – 2025. – Vol. 488. – Art. No. 109976. DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.109976.
24. Vranken L., Vantilt G., Van Den Elckhaut M., Vandekerckhove L., Poesen J. Landslide risk assessment in densely populated hilly area // Landslides. – 2015. – Vol. 12. No. 4. – pp. 787–798.
25. Phillips J.D. Equilibrium, disequilibrium, and nonequilibrium landforms in the landscape // Geomorphology. – 1992. – Vol. 5. – pp. 265–276.

References

1. 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*. 2024a. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (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*. 2024b. Vol. 16. No. 4. pp. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658. (In Russ.)
3. Gabaraev A.F., Melkov D.A., Kortiev A.L., Kozyrev E.N. Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 198–212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016. (In Russ.)
4. Goltsman F.M. Integration of observations in the recognition of geophysical objects. *Physics of the Solid Earth*. 1976. No. 7. pp. 40–54. (In Russ.)
5. Goltsman F.M. Information content of an experiment and accounting for the correlation of non-numerical features in the recognition of geophysical objects. *Physics of the Solid Earth*. 1980. No. 10. pp. 71–85. (In Russ.)
6. Goncharenko O.A., Zaalishvili V.B., Karaev Yu.I., Nikitin M.Yu. Hazardous geological processes of the North Caucasus. In: *Hazardous Natural and Technogenic Geological Processes in Mountainous and Foothill Territories of the North Caucasus*. Vladikavkaz. CGI VSC RAS and RNO-A. 2008. pp. 160–166. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high-mountain territories. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. 230 p. (In Russ.)
8. Kashmenskaya O.V. Systems theory and geomorphology. Novosibirsk. Nauka. 1980. 120 p. (In Russ.)
9. Kashmenskaya O.V., Khvorostova Z.M. Concept of mapping geomorphological systems. Novosibirsk. 1989. 12 p. (Preprint / Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. No. 17). (In Russ.)
10. Revazov M.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Arkhireeva I.G. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of mountain areas (Karmadon Gorge). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 217–227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001. (In Russ.)
11. Stasenko A.A., Danilin M.N., Kharchenko V.M., Nerkararyan A.E. Geomorphological, geological and tectonic structure, geodynamic and ecological conditions of Mount Mashuk and the adjacent territory of the central part of the Caucasus Mineralnye Vody region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 47–58. DOI: 10.46698/VNC.2023.74.77.004. (In Russ.)
12. Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005. (In Russ.)
13. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountain 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.)
14. Yaitskaya N.A., Dzaganiya 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.)
15. Brunnsden D., Thornes J.B. Landscape sensitivity and change. *Transactions of the Institute of British Geographers*. 1979. Vol. 4. pp. 463–484.
16. Brunnsden D. A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. *Catena*. 2001. Vol. 42. pp. 99–123.
17. Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Mallet J.-P. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 2014. Vol. 73. No. 2. pp. 209–263.
18. Cutter S.L., Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 105. Issue 7. pp. 2301–2306. DOI: 10.1073/pnas.0710375105.
19. Cutter S.L. Building disaster resilience: steps toward sustainability. *Challenges in Sustainability*. 2014. Vol. 1(2). pp. 72–79.

20. Dilley M., Chen R.S., Deichmann W., Lerner-Lam A.L., Arnold M. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. Washington D.C. The World Bank. 2005.
21. Jaedicke C., Van Den Eeckhaut M., Nadim F., Hervas J., Kalsnes B. et al. Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2014. Vol. 73. pp. 325–339. DOI: 10.1007/s10064-013-0541-0.
22. Kharismalatri H.S., Gomi T., Sidle R.C. Geomorphic thresholds for cascading hazards of debris flows and natural dam formation caused by large landslides. *Natural Hazards*. 2025. Vol. 121. pp. 15537–15552. DOI: 10.1007/s11069-025-07402-0.
23. Xue L., Hu X., Tang Q., Qi S., Moucha R. Post-anthropogenic landscape evolution: Terrain reshaping and geomorphic response in the Loess Plateau. *Geomorphology*. 2025. Vol. 488. Art. No. 109976. DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.109976.
24. Vranken L., Vantilt G., Van Den Elckhaut M., Vandekerckhove L., Poesen J. Landslide risk assessment in densely populated hilly area. *Landslides*. 2015. Vol. 12. No. 4. pp. 787–798.
25. Phillips J.D. Equilibrium, disequilibrium, and nonequilibrium landforms in the landscape. *Geomorphology*. 1992. Vol. 5. pp. 265–276.

УДК 502.4 (911.9)

DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

Оригинальная статья

Содержание потенциально токсичных химических элементов в растениях бассейнов горных рек Каспийского региона

Е.С. Каширина^{1,2}, Т.Ю. Горбунова^{1,2}, К.Н. Фам¹, З.Ш. Гагаева²

¹ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН,
Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2,
e-mail: e_katerina.05@mail.ru;

² Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Статья поступила: 16.06.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: 00.00.2026

Резюме: Статья посвящена анализу особенностей содержания химических элементов в растениях бассейнов горных рек Каспийского региона. **Актуальность** исследования заключается в выявлении индикаторов повышенного содержания потенциально токсичных химических элементов в ландшафтах бассейнов рек Каспийского региона на основе анализа растений. **Цель исследования** заключается в анализе особенностей накопления потенциально токсичных химических элементов растениями в бассейнах рек Каспийского региона. **Методы исследования.** В полевые сезоны 2024 и 2025 гг. отобраны пробы растений на 193 площадках в бассейнах рек Сунжа, Сулак, Уллучай, Шураозень, Самур, Карачай, Атачай. В растениях речных бассейнов определено содержание 15 химических элементов: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Li, Be, Mg, Al, Ca, Sc, V, Cr. Определение валового содержания тяжелых металлов и микроэлементов в отобранных пробах растений проведено с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite S-NR:11-6000ST043. **Результаты исследований.** Ведущими в растениях бассейнов рек Каспийского региона являются биогенные макроэлементы – Ca и Mg. Низкими концентрациями (10^{-1} – 10^{-2} мкг/г) отличаются условно-эссенциальные и потенциально токсичные Be, As, Sc, Li и V. Большинство растений накапливают по одному токсичному элементу. Пять видов проявляют тенденции к накоплению двух элементов: тамариксе (*Tamarix* Sp.) – Be и V, лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe и Be, берёза Литвинова (*Betula litwinowii*) – Fe и As, яблоня домашняя (*Malus domestica*) – Be и Sc, ежевика (*Rubus* Sp.) – Fe и V. Анализ средних значений содержания химических элементов по жизненным формам показал, что токсичные элементы интенсивнее накапливаются в травянистых растениях. В растениях бассейнов рек Сулак и Сунжа интенсивнее накапливаются потенциально токсичные Ni и Sc, р. Уллучай – Al, рек Карачай и Атачай – биогенный Ca. Полученные данные о содержании потенциально токсичных химических элементов в растениях могут быть использованы для снижения экологического риска для здоровья населения, проживающего в бассейнах горных рек Каспийского региона.

Ключевые слова: тяжелые металлы, биогеохимическое накопление, Сунжа, Сулак, Уллучай, Шураозень, Самур, Карачай, Атачай.

Благодарности: Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (Соглашение Минобрнауки РФ № 075-15-2024-644).

Для цитирования: Каширина Е.С., Горбунова Т.Ю., Фам К.Н., Гагаева З.Ш. Содержание потенциально токсичных химических элементов в растениях бассейнов горных рек Каспийского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

Original paper

Content of potentially toxic chemical elements in plants of mountain river basins of the Caspian region

E.S. Kashirina^{1,2}, T.Yu. Gorbunova^{1,2}, K.N. Fam¹, Z.Sh. Gagaeva²

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences,
2 Nakhimov Ave., Sevastopol 299011, Russian Federation,
e-mail: e_katerina.05@mail.ru;

² Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation

Received: 16.06.2026, revised: 10.09.2026, accepted: 00.00.2026

Abstract: This article analyzes the content of potentially toxic chemical elements in plants from the Caspian mountain River basins. **The relevance** of this study lies in identifying indicators of elevated levels of potentially toxic chemical elements in the landscapes of the Caspian River basins based on plant analysis. **The aim** of this study is to analyze the accumulation of potentially toxic chemical elements by plants in the Caspian River basins. **Methods.** In the field seasons of 2024 and 2025, plant samples were collected at 193 sites in the basins of the Sunzha, Sulak, Ulluchay, Shura-Ozen, Samur, Karachay, and Atachay rivers. The content of 15 chemical elements was determined in the plants of the river basins: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Li, Be, Mg, Al, Ca, Sc, V, and Cr. The gross content of heavy metals and trace elements in the selected plant samples was determined using a PlasmaQuant MS Elite S-NR:11-6000ST043 inductively coupled plasma mass spectrometer. **Results.** The dominant elements in the plants of the river basins of the Caspian region are biogenic macronutrients – Ca and Mg. Conditionally essential and potentially toxic elements such as Be, As, Sc, Li, and V are characterized by low concentrations (10^{-10} – 10^{-1} µg/g). Most plants accumulate a single toxic element. Five species exhibit a tendency to accumulate two elements: tamarisk (*Tamarix* sp.) – Be and V; narrow leaved oleaster (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe and Be; Litvinov's birch (*Betula litwinowii*) – Fe and As; domestic apple (*Malus domestica*) – Be and Sc; blackberry (*Rubus* sp.) – Fe and V. Analysis of the average values of chemical element content by life forms showed that toxic elements accumulate more intensively in herbaceous plants. In plants from the Sulak and Sunzha river basins, potentially toxic Ni and Sc accumulate more intensively; in the Ulluchay River basin, Al accumulates; in the Karachay and Atachay rivers, biogenic Ca accumulates. The data obtained on the content of potentially toxic chemical elements in plants can be used to reduce the environmental risk to the health of the population living in the basins of mountain rivers in the Caspian region.

Keywords: heavy metals, biogeochemical accumulation, Sunzha, Sulak, Ulluchay, Shuraozen, Samur, Karachay, and Atachay.

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of a large scientific project “Dynamics of the geoecological state of the mountain river basins of the North-Eastern Caucasus, Azerbaijan and Iran under conditions of climate change and growing anthropogenic load” (Agreement of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2024-644).

For citation: Kashirina E.S., Gorbunova T.Yu., Pham C.N., Gagaeva Z.Sh. Content of potentially toxic chemical elements in plants of mountain river basins of the Caspian region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

Введение

Каспийское море обладает обширным водосбором, охватывающим несколько государств. Воды Каспия формируются различными водотоками: от крупнейшей равнинной Волги до небольших горных рек. Качество воды в Каспийском море во многом определяется свойствами вод рек, впадающих в него. На химический состав речных вод влияют как природные, так и антропогенные факторы.

Одним из индикаторов геоэкологического состояния речных бассейнов является растительный покров, представляющий собой компонент, чувствительный к характеристикам местообитаний. Растения способны накапливать различные химические элементы, как отражение региональных природных особенностей и антропогенного воздействия на ландшафты.

В научных публикациях большое внимание уделяется изучению антропогенного влияния на растительный покров Восточного Кавказа. В регионе наиболее подробно изучены особенности накопления тяжелых металлов тысячелистником обыкновенным (*Achillea millefolium* L.), произрастающим на территории Республики Дагестан. На придорожных территориях, подверженных влиянию выбросов автотранспорта, в растениях отмечаются повышенные содержания Zn, Cu, Pb, Cd [Семенова, 2019; Семенова, Магомедалиев, 2012; Семенова, Анатов, 2022].

Предприятия основной химии являются источником F в растениях Сулакской дельтовой равнины (до 330 мг/кг) в Дагестане [Абакарова и др., 2020]. С деятельностью горнодобывающих предприятий связано повышенное содержание тяжелых металлов в почвах, имеющих техногенное происхождение [Алборов и др., 2026]. Природное повышенное содержание химических элементов в почвах и растениях может быть связано с естественными геохимическими аномалиями. В растениях известнякового округа Горного Дагестана отмечено повышенное содержание Ca и Cr, а в ландшафтах сланцевого округа – их дефицит [Дроздова и др., 2015]. В горнодобывающих районах Центрального Кавказа отмечается обогащение Zn листьев березы, Cd и Zn – листьев ивы и осины [Ermakov et al., 2022].

Повышенное содержание потенциально токсичных химических элементов в растениях может быть обусловлено региональными геохимическими особенностями. Так, в пределах Терско-Кумского артезианского бассейна водные объекты и растения обогащены природным As [Мурзаева и др., 2021; Магомедалиев и др., 2014].

Особое внимание должно быть уделено потенциально токсичным химическим элементам. Накопление токсичных элементов в растениях создает риск их попадания в организм человека через трофические цепи, что представляет угрозу для здоровья населения. Исследования уровня содержания химических элементов, представляющих потенциальную опасность для населения, в растениях дополняют знания об их распределении в бассейнах горных рек Каспийского региона. Более того, потенциально токсичные химические элементы вместе со стоком рек могут попадать в Каспийское море, приводя к загрязнению его вод.

Цель настоящего исследования – выявить уровни накопления растениями потенциально токсичных химических элементов в бассейнах горных рек Каспийского региона.

Материал и методы исследования

Территория исследования. В работе изучены территории бассейнов горных рек водосбора Каспийского моря: Сунжи, Сулака, Уллучая, Шураозеня, Самура (Россия), Карачая, Атачая (Азербайджан). Реки расположены в регионе Восточного Кавказа, берут начало на склонах гор (рис. 1). В верхнем и среднем течении они представляют собой типичные горные реки, в нижнем – их режим ближе к равнинным. Реки полноводные, с бурным течением, весенне-летними половодьями и паводками; зимой не замерзают.

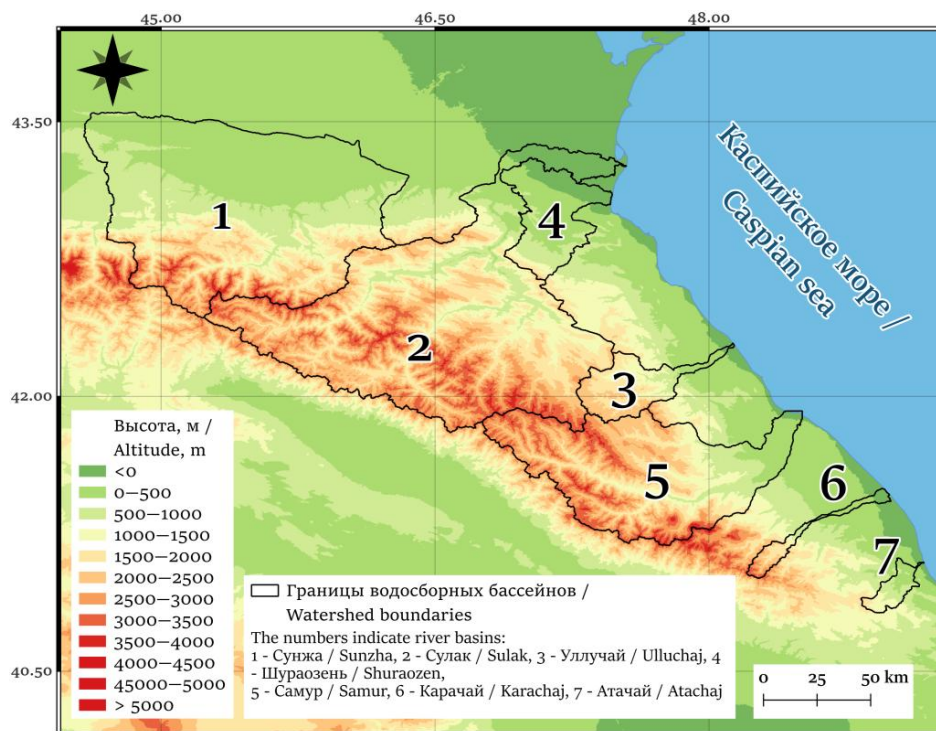


Рис. 1. Схема расположения района исследований на гипсометрической карте /
Fig. 1. The Layout of the research area on the hypsometric map

Бассейны горных рек Восточного Кавказа отличаются сложными геолого-геоморфологическими условиями. Геологическое строение включает черносланцевую формацию нижней и средней юры, шельфовые терригенно-карбонатные отложения верхней юры, олигоцен-неогеновую молассу в верхних, средних и нижних частях соответственно [Государственная геологическая..., 2011].

Почвенно-растительный покров региона – один из самых разнообразных: от горных ледников до полупустынь Прикаспийской низменности. В горной части выражена вертикальная зональность восточнокавказского (дагестанского) типа с поясами полупустынь, сухих степей, ксерофитных кустарников и редколесий в низкогорьях. В среднегорье представлены горная степь и широколиственные леса. Высокогорные районы покрыты субальпийскими и альпийскими лугами, выше которых расположены нивальный и гляциальный пояса. В нижней зоне под лесами залегают горные лесные бурые почвы, а выше границы лесов – горно-луговые. Под лесами распространены горные буроземы, на сухих склонах – горностепные почвы. Почвы Прикаспийской низменности – каштановые, луговые, солончаки.

Полевые и лабораторные работы. Экспедиционные работы проведены в полевые сезоны 2024–2025 гг. В семи речных бассейнах заложено 193 площадки (рис. 1), для каждой из которых описаны компоненты ландшафта, выполнен почвенный разрез, отобраны пробы почв и доминирующих видов растений. При выборе площадок учитывалось геологическое строение, ландшафтно-геохимическая позиция, тип природопользования. Пробные площадки закладывались по ландшафтным катенам вдоль и поперек бассейнов рек.

С использованием метода масс-спектрометрии определено валовое содержание следующих 15 элементов: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Li, Be, Mg, Al, Ca, Sc, V, Cr. В химико-аналитических исследованиях использован масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite S-NR:11-6000ST043, расположенный на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия

и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Пробоподготовка выполнена согласно ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011¹.

Для анализа отобрано 1403 пробы более 60 видов древесных, кустарниковых и травянистых растений. Отбирались различные органы растений: ветки, листья, стебли, кора, цветки. Если растение невозможно было разделить (например, злаковые), то оно отбиралось целиком.

Результаты исследований и их обсуждение

Содержание химических элементов в растениях. Среднее содержание химических элементов в растениях колеблется от 10^5 мкг/г для Са до 10^{-1} мкг/г для Ве (табл. 1). Широкие разбросы значений и стандартных отклонений указывают на сложные и неоднородные условия накопления и рассеивания химических элементов в горных условиях.

Таблица 1 / Table 1

**Содержание химических элементов в растениях бассейнов рек
Каспийского региона, мкг/г /
Content of chemical elements in plants of the Caspian River basins, µg/g**

Химический элемент / The chemical element	Среднее± стандартное отклонение / Average± standard deviation	Максимальное значение / Maximum value	Минимальное значение / Minimum value
Mn	52,2±96,98	687,91	0,03
Fe	172,2±218,95	739,98	7,67
Co	25,3±97,09	968,27	0,01
Ni	558,9±4897,99	97750,7	0,20
Cu	19,8±55,62	483,35	0,05
Zn	25,8±41,01	291,51	0,24
As	4,4±12,77	192,14	0,56
Li	2,6±10,62	187,02	0,06
Be	0,1±0,76	24,59	0,02
Mg	861,8±1389,10	8238,31	1,51
Al	544,1±1224,16	14050,77	3,39
Ca	6102,2±12820,64	99898,8	0,95
Sc	0,4±0,50	2	0,01
V	1,3±2,61	43,97	0,05
Cr	25,5±51,84	998,19	0,09

*Красным выделены три максимальных показателя для каждого элемента, зеленым – три минимальных /
Three maximum indicators for each element are highlighted in red, three minimum indicators – in green.

Преобладающими по содержанию элементами в растениях бассейнов рек Каспийского региона являются биогенные макроэлементы, входящие в состав живого веще-

¹ ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. Москва, 2011.

ства – Ca и Mg. Более того, в пределах изучаемых речных бассейнов отмечается накопление Ca в почвах относительно его кларков [Kashirina et al., 2025]. Содержание Mg в ландшафтах увеличивается от высокогорий к аридным низменностям [Дьяченко, 2004]. Эоловое осаждение повышает накопление металлов в растениях [Suska-Malawska et al., 2019].

Остальные рассмотренные химические элементы могут быть токсичными для растений, особенно при высоких концентрациях. Большинство эссенциальных микроэлементов при высоких концентрациях выступают в качестве загрязнителей – тяжелых металлов. К таким элементам относится Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn.

Высокие содержания Co, Ni, Cu и Zn зачастую обусловлены наличием природных геохимических аномалий. Содержание Mn выше в растениях горных районов, что связано с общим дефицитом элемента в щелочной среде аридных ландшафтов.

Al в ландшафтах часто находится в составе комплексных органических соединений и накапливается в гумусе. Элемент относится к условно-эссенциальным микроэлементам, т.е. необходимым живым организмам в небольших количествах и проявляющим токсичность в более высоких концентрациях. При этом подвижность Al сильно зависит от окислительно-восстановительной обстановки: она снижается в сухих щелочных условиях и повышается во влажных кислых [Мирзоева и др., 2024]. К условно-эссенциальным химическим элементам также относится Cr, среднее содержание которого – 25,5 мкг/г.

Такие элементы, как Be, As и Sc, относятся к сильным токсикантам; их содержание в растениях минимально. Низкими концентрациями отличаются и условно-эссенциальные Li и V.

Нахождение Be в окружающей среде связано с природным выщелачиванием горных пород, промышленными выбросами, особенно при сжигании угля [Kumar et al., 2025]. Мышьяк часто входит в состав средств защиты сельскохозяйственных растений от вредителей, что приводит к его накоплению в компонентах агроландшафтов [Nahar et al., 2022; Sinha et al., 2023].

Содержание химических элементов в растениях разных речных бассейнов. При рассмотрении содержания химических элементов в растениях разных речных бассейнов заметны общие закономерности накопления Ca, Mg, Ni и Al (рис. 2).

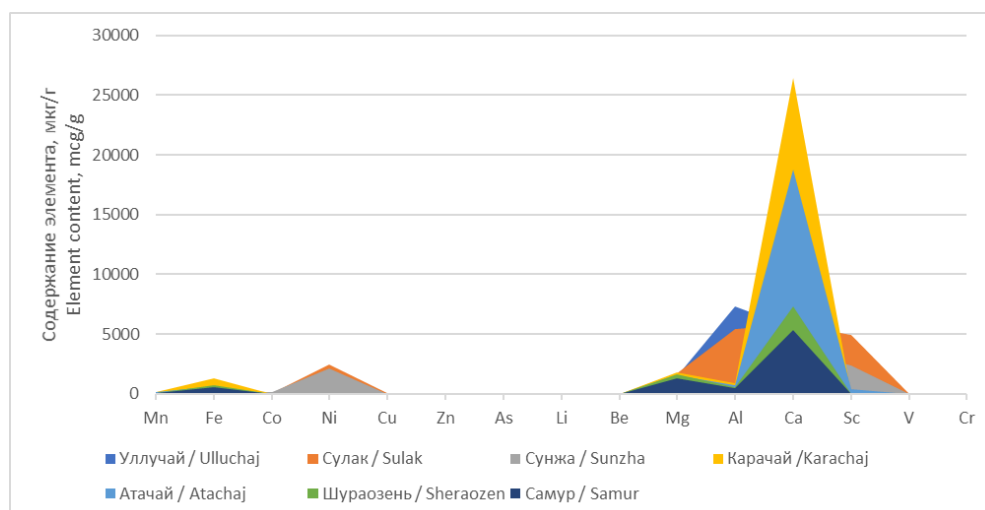


Рис. 2. Содержание химических элементов в растениях разных речных бассейнов /
Fig. 2. Content of chemical elements in plants from different river basins

Содержание Ca достигает максимума в растениях бассейнов рек Карачай и Атачай, расположенных на южном склоне Кавказа. Близкие тенденции накопления, видимо, отражают схожесть природных условий бассейнов и видового состава растений.

Al интенсивно накапливается в растениях бассейнов рек Сулак и Уллучай.

Максимальные показатели содержания Ni отмечены в растениях, отобранных в бассейне смежных рек Северного Кавказа – Сулак и Сунжа. Токсичный Sc также накапливается в растениях бассейнов рек Сулак и Сунжа.

Поглощение химических элементов в зависимости от видового состава и жизненной формы. Поглощение и рассеивание химических элементов растениями различается в зависимости от их видовой принадлежности и жизненной формы. Различия в накоплении элементов разными видами растений во многом обусловлены их филогенетической историей и геохимическими особенностями районов их происхождения [Alekseenko et al., 2020; Wang et al., 2023].

Кальций интенсивно накапливается в растениях семейства бобовые (клевер кавказский – *Trifolium caucasicum*, астрагал козлятниковый – *Astragalus galegiformis*). Заметно повышение содержания Ca в растениях-галофитах (ирис солелюбивый – *Iris halophila*, тамарикс – *Tamarix sp.*). Потенциально токсичные химические элементы накапливаются в различных видах растений (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Накопление некоторых элементов в древесных и кустарниковых растениях бассейнов рек Каспийского региона, мкг/г /
The accumulation of certain elements in woody and shrubby plants in the Caspian River Basin, µg/g**

	Название растения / Plant name	Содержание элементов / The content of the elements						
		Fe	Be	Ca	As	V	Li	Sc
Дерево / Tree	Дуб черешчатый / <i>Quercus robur</i>	641	0,03	3134	1,27	1,46	1,35	1,18
	Берёза Литвинова / <i>Betula litwinowii</i>	2596	0,01	8041	7,60	0,20	0,03	0,52
	Бук восточный / <i>Fagus orientalis</i>	514	0,02	3954	6,57	1,22	0,91	0,75
	Груша кавказская / <i>Pyrus caucasica</i>	828	0,02	5427	1,91	2,02	2,01	0,37
	Лох узколистный / <i>Elaeagnus angustifolia</i>	3043	0,14	4980	1,91	1,23	2,86	0,66
	Рябина кавказская / <i>Sorbus aucuparia</i>	1478	0,01	4623	7,22	0,17	0,33	0,22
	Алыча / <i>Prunus sogdiana</i>	338	0,02	9926	3,74	0,55	1,45	0,94
	Вяз малый / <i>Ulmus minor</i>	399	0,01	32818	0,33	1,61	1,16	0,31
	Граб восточный / <i>Carpinus orientalis</i>	216	0,03	3679	1,16	0,91	0,48	0,35
	Яблоня домашняя / <i>Malus domestica</i>	546	0,13		3,82	0,57	1,29	1,10
	Ива / <i>Salix sp.</i>	197	0,01	9238	5,52	1,18	0,61	0,06
	Клен полевой / <i>Acer campestre</i>	272	0,01	2144	1,57	0,92	2,58	0,64
	Мушмула германская / <i>Mespilus germanica</i>	221	0,02	2004	4,38	0,91	1,03	0,48
	Ольха серая / <i>Alnus incana</i>	32	0,01	1590	0,47	0,34	0,24	0,83
	Сосна обыкновенная / <i>Pinus sylvestris</i>	11	0,01	8780	0,30	0,11	0,11	0,01
	Ясень обыкновенный / <i>Fraxinus excelsior</i>	248	0,02	2373	2,58	1,03	1,79	0,17
	Можжевельник дельтовидный / <i>Juniperus deltoides</i>	512	0,02	2692	2,19	0,70	0,18	0,40
Кустарник / Shrub	Ежевика / <i>Rubus sp.</i>	4064	0,03	1591	1,62	2,12	0,83	0,55
	Бирючина обыкновенная / <i>Ligustrum vulgare</i>	1000	0,03	1161	1,07	1,32	1,18	0,58
	Барбарис обыкновенный / <i>Berberis vulgaris</i>	379	0,02	2302	0,37	3,78	0,88	0,58
	Боярышник / <i>Crataegus sp.</i>	220	0,05	22273	3,16	0,50	1,03	0,54
	Держи-дерево колючее / <i>Paliurus spinachristi</i>	522	0,07	3476	4,77	1,46	1,68	0,37
	Кизил обыкновенный / <i>Cornus mas</i>	154	0,03	1730	1,66	0,81	1,90	0,35
	Лещина обыкновенная / <i>Corylus avellana</i>	175	0,02	7462	2,84	0,82	0,44	0,86
	Малина / <i>Rubus idaeus</i>	12	0,01	6868	3,52	0,46	0,47	0,03
	Рододендрон кавказский / <i>Rhododendron caucasicum</i>	29	0,01	4967	24,06	1,75	0,16	0,01
	Тамарикс / <i>Tamarix sp.</i>	561	0,13	13610	1,65	2,37	1,75	0,41
	Шиповник / <i>Rosa sp.</i>	261	0,02	9277	2,82	0,79	0,44	0,32
	Свидина кроваво-красная / <i>Swida sanguinea</i>	298	0,12	1674	2,36	1,82	2,01	0,17

*Красным выделены три максимальных показателя для каждого элемента /
Three maximum indicators for each element are highlighted in red

Большинство рассматриваемых растений накапливают по одному токсичному элементу. При этом пять видов проявляют тенденции к накоплению двух элементов: тамарикс (*Tamarix* sp.) – Be и V, лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe и Be, берёза Литвинова (*Betula litwinowii*) – Fe и As, яблоня домашняя (*Malus domestica*) – Be и Sc, ежевика (*Rubus* sp.) – Fe и V. Тамарикс и лох узколистный отличаются высоким поглощением элементов из среды в условиях аридного климата, что подтверждают исследования других районов [Taghizadeh et al., 2025]. Необходимо отметить, что яблоня и ежевика дают съедобные плоды, что создает угрозы для здоровья.

С точки зрения распределения химических элементов по жизненным формам можно выделить несколько закономерностей. В древесных растениях интенсивнее накапливаются биогенные макроэлементы (Ca, Mg) и некоторые микроэлементы (Mn, Co) (рис. 3).

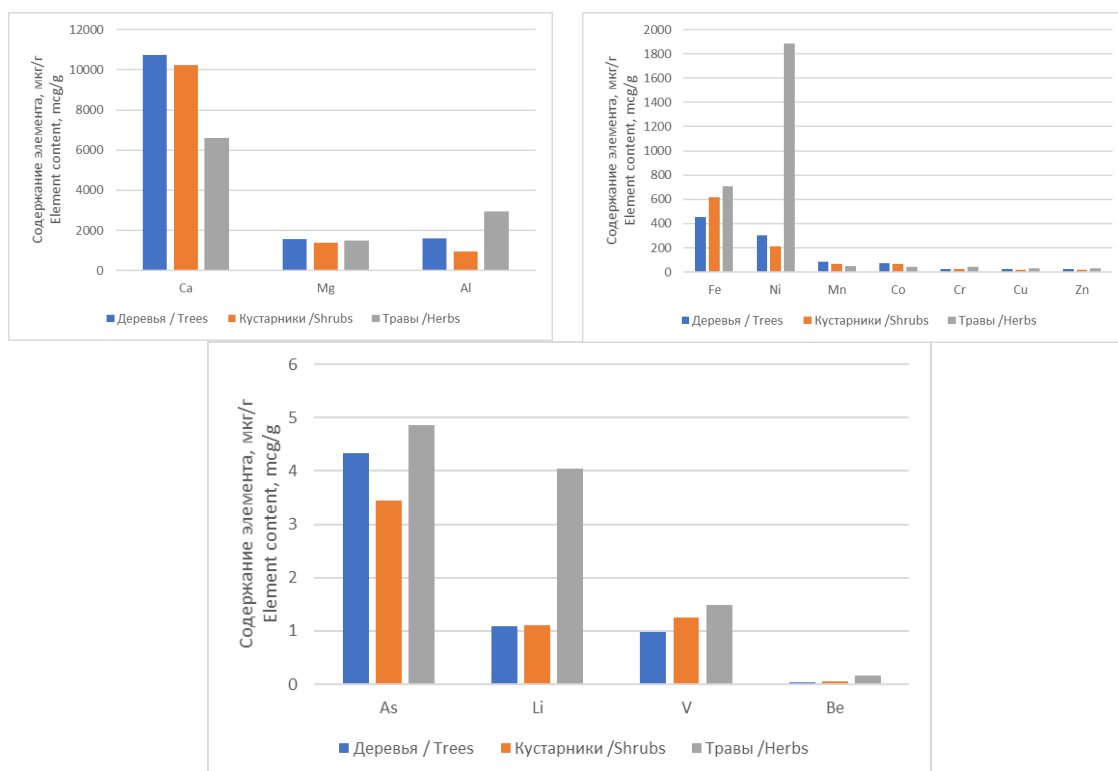


Рис. 3. Содержание потенциально токсичных химических элементов в зависимости от жизненной формы растения /

Fig. 3. Content of potentially toxic chemical elements depending on the plant's life form

Большинство рассматриваемых химических элементов накапливается в травянистых растениях. Так, травы больше накапливают потенциально токсичные Al, Fe, Ni, Cr, Cu, Zn, As, Li, V, Be.

Выводы

1. Преобладающими по содержанию в растениях бассейнов рек Каспийского региона являются биогенные макроэлементы – Ca и Mg. Низкими концентрациями ($10\text{--}10^{-1}$ мкг/г) отличаются условно-эссенциальные и потенциально токсичные Be, As, Sc, Li и V.

Большинство растений накапливает по одному токсичному элементу. Пять видов проявляют тенденции к накоплению двух элементов: тамарикс (*Tamarix* sp.) – Be и V, лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe и Be, берёза Литвинова (*Betula litwin-*

owii) – Fe и As, яблоня домашняя (*Malus domestica*) – Be и Sc, ежевика (*Rubus* sp.) – Fe и V.

2. Анализ средних значений содержания химических элементов по жизненным формам показал, что токсичные элементы интенсивнее накапливаются в травянистых растениях.

3. В растениях бассейнов рек Сулак и Сунжа интенсивнее накапливаются потенциально токсичные Ni и Sc, р. Уллучай – Al, рек Карачай и Атачай – биогенный Ca.

Таким образом, полученные данные о содержании потенциально токсичных химических элементов в растениях могут быть использованы для снижения экологического риска для здоровья населения, проживающего в бассейнах горных рек Каспийского региона.

Ограничения исследования связаны с недостаточной плотностью точек, сильным влиянием литологии и локальных ландшафтно-геохимических факторов.

Литература

1. Абакарова А.М., Гитинова П.Ш., Яхияев М.А. Фтористые соединения и тяжелые металлы в почвах и растениях Сулакской дельтовой равнины // Уральский медицинский журнал. – 2020. – № 10 (193). – С. 188–192.
2. Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Архиреева И.Г., Дадтеева Э.В. Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината // Геология и геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. №1. – С. 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Скифская. Лист К37 (Сочи), К38 (Махачкала), К39. Объяснительная записка / ред. В.А. Лаврищев, А.А. Шейков, В.М. Андреев, В.М. Семенов и др. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 431 с.
4. Дроздова И.В., Алексеева-Попова Н.В., Калимова И.Б. Аккумуляция тяжелых металлов в растениях Южного Дагестана в условиях природной геохимической аномалии // Сибирский экологический журнал. – 2015. – Т. 22. №. 6. – С. 920–930.
5. Дьяченко В.В. Геохимия, систематика и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа. – Ростов н/Д.: Комплекс, 2004. – 268 с.
6. Магомедалиев З.Г., Салихов Ш.К., Магомедалиев А.З., Яхияев М.А. Содержание тяжелых металлов в почвах и растениях горных экосистем Дагестана // Проблемы современной науки. – 2014. – № 11-1. – С. 10–17.
7. Мурзаева А.Н., Исаева Н.Г., Чубуркова С.С., Азизова З.А. Исследования содержания солей мышьяка в растительных и животных продуктах // Международная научно-практическая конференция «Развитие научного наследия великого учёного на современном этапе». Т. I. – Махачкала: ДГАУ им. М.М. Джембулатова. – 2021. – С. 274–281.
8. 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.
9. Семенова В.В. Воздействие антропогенного фактора на накопление тяжелых металлов в видах рода *Achillea* L., произрастающих в предгорной зоне Дагестана // Экология урбанизированных территорий. – 2019. – №. 1. – С. 87–92.
10. Семенова В.В., Магомедалиев З.Г. Воздействие транспорта на накопление тяжелых металлов в почвах и растениях рода *Achillea* (Asteraceae) // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. – 2012. – № 1. – С. 118–122.
11. Семенова В.В., Анатов Д.М. Накопление тяжелых металлов растениями рода *Achillea* L. в засушливых условиях равнинной зоны Дагестана // Аридные экосистемы. – 2022. – № 1(90). – С. 99–106.
12. Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V., Machevariani M.M., Bech J., Pashkevich M.A. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress // Plants. – 2020. – Vol. 10. No. 1. – Art. No. 33. DOI: 10.3390/plants10010033.

13. Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Degtyaryov A.P., Gulyaeva U.A., Danilova V.N. Characteristics of the accumulation of metals by plants and the activity of soil enzymes in metallogenic territories of the Northern Caucasus // *Geochemistry International*. – 2022. – Vol. 60. No. 8. – pp. 772–778. DOI: 10.1134/S0016702922070023.
14. Kashirina E., Gorbunov R., Kerimov I., Gorbunova T., Drygval P., Chuprina E., Nikiforova A., Lineva N., Drygval A., Kelip A. et al. Spatial Distribution of Geochemical Anomalies in Soils of River Basins of the Northeastern Caucasus // *Geosciences*. – 2025. – Vol. 15. – No. 10. – Art. No. 380. DOI: 10.3390/geosciences15100380.
15. Kumar A., Kumar V., Chawla M., Thakur M., Bakshi P., Jasrotia R. et al. Advancements in understanding beryllium contamination: Novel insights into environmental risk assessment // *Land Degradation and Development*. – 2025. – Vol. 36. No. 2. – pp. 350–362. DOI: 10.1002/ldr.5386.
16. Nahar K., Rhaman M.S., Parvin K., Bardhan K., Marques D.N., Garcia-Caparrós P., Hasanuzzaman M. Arsenic-induced oxidative stress and antioxidant defense in plants // *Stresses*. 2022. – Vol. 2(2). – pp. 179–209.
17. Sinha D., Datta S., Mishra R., Agarwal P., Kumari T., Adeyemi S. B. et al. Negative impacts of arsenic on plants and mitigation strategies // *Plants*. – 2023. – Vol. 12. No. 9. – Art. No. 1815. DOI: 10.3390/plants12091815.
18. Suska-Malawska M., Sulwinski M., Wilk M., Otarov A., Metrak M. Potential eolian dust contribution to accumulation of selected heavy metals and rare earth elements in the aboveground biomass of *Tamarix* spp. from saline soils in Kazakhstan // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – Vol. 191. No. 2. – Art. No. 57. DOI: 10.1007/s10661-018-7179-0.
19. Taghizadeh M., Asghari F., Solgi M., Khadivi A. Genotypic variations of *Tamarix aphylla* (L.) H. Karst. population for heavy metal phytoremediation: a case study in Markazi province, Iran // *BMC Plant Biology*. – 2025. – Vol. 25. No. 1. – Art. No. 898. DOI: 10.1186/s12870-025-06940-w.
20. Wang Y., He L., Dong S., Fu H., Wang G., Liang X. et al. Accumulation, translocation, and fractionation of rare earth elements (REEs) in fern species of hyperaccumulators and non-hyperaccumulators growing in urban areas // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 905. – Art. No. 167344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167344.

References

1. Abakarova A.M., Gitinova P.Sh., Yahiyayev M.A. Fluoride compounds and heavy metals in soils and plants of the Sulak delta plain. *Ural Medical Journal*. 2020. No. 10(193). pp. 188–192. (In Russ.)
2. Alborov I.D., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Arhireeva I.G., Dadteeva E.V. Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case study. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001. (In Russ.)
3. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series: Scythian. Sheet K37 (Sochi), K38 (Makhachkala), K39. Explanatory note. Eds. V.A. Lavrishchev, A.A. Sheikov, V.M. Andreev, V.M. Semenov et al. Saint Petersburg. VSEGEI Cartographic Factory. 2011. 431 p. (In Russ.)
4. Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Kalimova I.B. Accumulation of heavy metals in plants of Southern Dagestan under conditions of natural geochemical anomaly. *Siberian Ecological Journal*. 2015. Vol. 22. No. 6. pp. 920–930. (In Russ.)
5. Dyachenko V.V. Geochemistry, systematics and assessment of the state of landscapes of the North Caucasus. Rostov-on-Don. Komplex. 2004. 268 p. (In Russ.)
6. Magomedaliev Z.G., Salihov Sh.K., Magomedaliev A.Z., Yahiyayev M.A. The content of heavy metals in soils and plants of mountain ecosystems of Dagestan. *Problems of Modern Science*. 2014. No. 11-1. pp. 10–17. (In Russ.)
7. Murzaeva A.N., Isaeva N.G., Chuburkova S.S., Azizova Z.A. Research on the content of arsenic salts in plant and animal products. Development of the scientific heritage of the great scientist at the present stage. In: International Scientific and Practical Conference Dedicated “Development of the Scientific Legacy of the Great Scientist at the Present Stage.” Makhachkala. Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov. 2021. Vol. 1. pp. 274–281. (In Russ.)
8. 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 Fatala

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.)

9. Semenova V.V. The influence of anthropogenic factors on the accumulation of heavy metals in species of the genus *Achillea* L., growing in the foothill zone of Dagestan. Ecology of urbanized territories. 2019. No. 1. pp. 87–92. (In Russ.)

10. Semenova V.V., Magomedaliyev Z.G. Effects of transport on the accumulation of heavy metals in soils and plants of the genus *Achillea* (*Asteraceae*). Bulletin of Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences. 2012. No. 1. pp. 118–122. (In Russ.)

11. Semenova V.V., Anatov D.M. Accumulation of heavy metals by plants of the genus *Achillea* L. in the arid conditions of the lowland zone of Dagestan. Arid Ecosystems. 2022. No. 1(90). pp. 99–106. (In Russ.)

12. Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V., Machevariani M.M., Bech J., Pashkevich M.A. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress. Plants. 2020. Vol. 10. No. 1. Art. No. 33. DOI: 10.3390/plants10010033.

13. Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Degtyaryov A.P., Gulyaeva U.A., Danilova V.N. Characteristics of the accumulation of metals by plants and the activity of soil enzymes in metallogenic territories of the Northern Caucasus. Geochemistry International. 2022. Vol. 60. No. 8. pp. 772–778. DOI: 10.1134/S0016702922070023.

14. Kashirina E., Gorbunov R., Kerimov I., Gorbunova T., Drygval P., Chuprina E., Nikiforova A., Lineva N., Drygval A., Kelip A. et al. Spatial Distribution of Geochemical Anomalies in Soils of River Basins of the Northeastern Caucasus. Geosciences. 2025. Vol. 15. No. 10. Art. No. 380. DOI: 10.3390/geosciences15100380.

15. Kumar A., Kumar V., Chawla M., Thakur M., Bakshi P., Jasrotia R. et al. Advancements in understanding beryllium contamination: Novel insights into environmental risk assessment. Land Degradation and Development. 2025. Vol. 36. No. 2. pp. 350–362. DOI: 10.1002/ldr.5386.

16. Nahar K., Rhaman M.S., Parvin K., Bardhan K., Marques D.N., Garcia-Caparos P., Hasanuzzaman M. Arsenic-induced oxidative stress and antioxidant defense in plants. Stresses. 2022. Vol. 2(2). pp. 179–209.

17. Sinha D., Datta S., Mishra R., Agarwal P., Kumari T., Adeyemi S.B. et al. Negative impacts of arsenic on plants and mitigation strategies. Plants. 2023. Vol. 12. No. 9. Art. No. 1815. DOI: 10.3390/plants12091815.

18. Suska-Malawska M., Sulwinski M., Wilk M., Otarov A., Metrak M. Potential eolian dust contribution to accumulation of selected heavy metals and rare earth elements in the aboveground biomass of *Tamarix* spp. from saline soils in Kazakhstan. Environmental Monitoring and Assessment. 2019. Vol. 191. No. 2. Art. No. 57. DOI: 10.1007/s10661-018-7179-0.

19. Taghizadeh M., Asghari F., Solgi M., Khadivi A. Genotypic variations of *Tamarix aphylla* (L.) H. Karst. population for heavy metal phytoremediation: a case study in Markazi province, Iran. BMC Plant Biology. 2025. Vol. 25. No. 1. Art. No. 898. DOI: 10.1186/s12870-025-06940-w.

20. Wang Y., He L., Dong S., Fu H., Wang G., Liang X. et al. Accumulation, translocation, and fractionation of rare earth elements (REEs) in fern species of hyperaccumulators and non-hyperaccumulators growing in urban areas. Science of The Total Environment. 2023. Vol. 905. Art. No. 167344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167344.

УДК 004.8:504.5:528.8

DOI: 10.46698/VNC.2026.86.51.001

Оригинальная статья

Интеллектуальная классификация нефтезагрязненных территорий по данным геоэкологического мониторинга

В.А. Красиков¹, Г.В. Кораблева², В.В. Пчелкин²,
И.А. Вахрушева², Н.А. Штырхунова³

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

² Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: korableva@rgau-msha.ru, 9766793@mail.ru, vakhrusheva@rgau-msha.ru;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Россия, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93,
e-mail: shtnat33@mail.ru

Статья поступила: 15.07.2026, доработана: 21.08.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Нефтяное загрязнение почвенного покрова имеет сложный пространственный характер и может долго сохраняться на промышленных и прилегающих территориях. Его оценка не должна ограничиваться только содержанием нефтепродуктов, поскольку состояние участка зависит от рельефа, влажности, гранулометрического состава, растительности, поверхностного стока и положения относительно источников загрязнения. **Цель исследования.** Разработать подход к интеллектуальной классификации нефтезагрязненных территорий на основе комплексной обработки данных геоэкологического мониторинга, лабораторного анализа почв, дистанционного зондирования и ГИС-моделирования. **Методы исследования.** Использованы результаты полевого обследования, лабораторные определения нефтепродуктов в почвенных пробах, материалы дистанционного зондирования, цифровая модель поверхности и ГИС-показатели рельефа, влажности, растительного покрова, расстояния до источников загрязнения и близости к зонам стока. Для классификации применялись k-nearest neighbors, Support Vector Machine, Gradient Boosting и Random Forest. Эффективность оценивалась по точности, F1-мере, устойчивости разделения классов и интерпретируемости факторов. **Результаты.** Наиболее значимыми признаками оказались содержание нефтепродуктов, влажность почвы, NDVI, доля глинистой фракции, расстояние до источника, уклон поверхности и близость к элементам стока. Лучшие результаты получены для Random Forest: точность 0,84–0,87, F1-мера 0,78–0,90. Выделены фоновые, слабозагрязненные, умеренно загрязненные, сильно и очень сильно загрязненные участки. Последние занимают около 8–12% и 3–5% территории, но формируют основной экологический риск.

Ключевые слова: нефтезагрязненные территории, геоэкологический мониторинг, искусственный интеллект, машинное обучение, Random Forest, дистанционное зондирование, NDVI, геоинформационный анализ.

Для цитирования: Красиков В.А., Кораблева Г.В., Пчелкин В.В., Вахрушева И.А., Штырхунова Н.А. Интеллектуальная классификация нефтезагрязненных территорий по данным геоэкологического мониторинга. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.86.51.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.86.51.001

Original paper

Intelligent classification of oil-contaminated areas based on geoeological monitoring data

V.A. Krasikov¹, G.V. Korableva², V.V. Pchelkin²,
I.A. Vakhrusheva², N.A. Shtyrkhunova³

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

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation, e-mail: korableva@rgau-msha.ru, 9766793@mail.ru, vakhrusheva@rgau-msha.ru;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: shtnat33@mail.ru

Received: 15.07.2026, revised: 21.08.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Oil pollution of the soil cover has a complex spatial pattern and may persist for a long time in industrial and adjacent areas. Its assessment should not be limited only to petroleum hydrocarbon content, since site conditions also depend on terrain, moisture, granulometric composition, vegetation, surface runoff, and position relative to pollution sources. **Aim of the study.** The study aims to develop an approach for intelligent classification of oil-contaminated areas based on integrated processing of geoeological monitoring data, laboratory soil analysis, remote sensing, and GIS modeling. **Research methods.** Field survey results, laboratory measurements of petroleum hydrocarbons in soil samples, remote sensing materials, a digital surface model, and GIS indicators of terrain, moisture, vegetation cover, distance to pollution sources, and proximity to runoff zones were used. The k-nearest neighbors, Support Vector Machine, Gradient Boosting, and Random Forest algorithms were applied for classification. Model performance was evaluated by accuracy, F1-score, stability of class separation, and factor interpretability. **Results.** The most significant indicators were petroleum hydrocarbon content, soil moisture, NDVI, clay fraction, distance to the source, surface slope, and proximity to runoff elements. Random Forest provided the best results, with an accuracy of 0.84–0.87 and F1-score of 0.78–0.90. Background, slightly contaminated, moderately contaminated, heavily contaminated, and extremely contaminated areas were identified. The last two classes occupy about 8–12% and 3–5% of the territory but form the main environmental risk.

Keywords: oil-contaminated areas, geoeological monitoring, artificial intelligence, machine learning, Random Forest, remote sensing, NDVI, geoinformation analysis.

For citation: Krasikov V.A., Korableva G.V., Pchelkin V.V., Vakhrusheva I.A., Shtyrkhunova N.A. Intelligent classification of oil-contaminated areas based on geoeological monitoring data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.86.51.001

Введение

Нефтяное загрязнение промышленных и прилегающих земель обычно сохраняется длительное время, особенно в районах добычи, перекачки, хранения, аварийных сливов и переработки нефти [Shukla et al., 2025]. При проникновении нефтепродуктов в верхние горизонты почвы меняются ее плотность, влажность, кислотность, воздухообмен, фильтрационная способность и содержание органического вещества [Fomina et al., 2016]. Внешние признаки постепенно сглаживаются: растительность частично

восстанавливается, запах исчезает, но остаточные углеводороды могут сохраняться в микропонижениях, суглинках, канавах и слабодренированных местах [Hao et al., 2025].

Поэтому геоэкологическое состояние нельзя определять только визуально или по отдельным лабораторным концентрациям. Даже близкие точки могут отличаться по содержанию нефтепродуктов в 2–3 раза, а участки с похожими значениями иметь разный риск из-за рельефа, влажности и условий стока. Современный мониторинг должен сочетать полевые обследования, отбор проб, лабораторный анализ, ГИС-обработку и учет природных условий [Wijaya et al., 2024]. Нефтепродукты распределяются по микрорельефу, колеям, ложбинам стока и участкам с разной проницаемостью грунта [Osranova et al., 2025].

Сопоставление только лабораторных концентраций является слишком грубым: оно показывает превышения, но плохо объясняет удержание и миграцию загрязнения [Азаров и др., 2024]. Поэтому более обоснованно выделять не только «чистые» и «грязные» участки, но и несколько классов состояния: фоновое, слабое, умеренное, сильное и очень сильное загрязнение.

Сложность анализа усиливается разнородностью данных: лабораторные показатели, данные дистанционного зондирования, геоморфология, растительность и гидрографическая сеть описывают один природно-техногенный процесс, но часто рассматриваются отдельно [Banace et al., 2024]. Это повышает зависимость оценки от методики и опыта исследователя [Yelemessov et al., 2026]. Методы искусственного интеллекта позволяют объединять такие данные и выявлять связи, плохо фиксируемые обычной статистикой [Barathkumar, Devi, 2025]. ИИ уже применяется для классификации нарушенных земель, анализа растительности, прогноза техногенного риска и обработки данных мониторинга [Маслов, Орлов, 2026]. Для нефтезагрязненных территорий это особенно важно, поскольку один уровень загрязнения имеет разное экологическое значение в песчаных, суглинистых и заболоченных почвах [Karshyga et al., 2022; Ключев и др., 2024], а классификация по одному показателю недостаточно корректна [Нурпеисова и др., 2023]. Алгоритмы машинного обучения позволяют учитывать химические, почвенные, ландшафтные и дистанционные признаки [Garcia et al., 2025]. Random Forest, Gradient Boosting, SVM и нейросетевые модели могут не только разделять территорию на классы, но и определять факторы, влияющие на формирование загрязнения [Татаринцев и др., 2026]. Это важно для понимания причин повышенной уязвимости отдельных участков [Затонский и др., 2025]. Несмотря на развитие цифровых методов, классификация нефтезагрязненных территорий как единой геоэкологической задачи остается недостаточно разработанной [Sumi, Chandrasekar, 2024]. Необходимо объединять лабораторные, дистанционные и пространственные данные в воспроизводимую систему оценки [Толеубекова и др., 2025; Didmanidze et al., 2025].

Цель работы – разработать подход к классификации нефтезагрязненных территорий по данным геоэкологического мониторинга с использованием методов искусственного интеллекта, включая подготовку данных, пространственную привязку, формирование классов загрязнения и сравнение алгоритмов классификации [Kulikova et al., 2024].

Методы и материалы

В качестве исходных материалов использовались данные геоэкологического обследования нефтезагрязненной территории, связанной с длительной эксплуатацией объектов хранения и транспортировки нефтепродуктов. Участок рассматривался как природно-техногенная система, где загрязнение формируется не только прямым поступлением нефтепродуктов, но и их перераспределением по микрорельефу, поверхностному стоку и зонам с разной водопроницаемостью грунтов.

Полевой этап включал основную и уточняющую сетки наблюдений. Сначала при-

меняли шаг 50×50 м, затем в подозрительных зонах сгущали сеть до 25, 20, 15 и 10 м. Учитывались понижения, переувлажненные пятна, старые насыпи, технологические проезды, нарушенная растительность и следы загрязнения. Координаты точек фиксировались GNSS-приемником с точностью около 0,5–1,0 м. Пробы отбирались из слоя 0–20 см, а при признаках вертикальной миграции дополнительно из горизонта 20–40 см.

Содержание нефтепродуктов определяли после экстракции органическим растворителем методом ИК-спектрометрии; для части проб уточняли фракционный состав газовой хроматографией. Дополнительно определяли pH, влажность, органическое вещество, гранулометрический состав и, при необходимости, содержание тяжелых металлов.

Для пространственного анализа использовались снимки Sentinel-2, материалы БПЛА, ортофотоплан и цифровая модель поверхности. По ним выделяли микропонижения, техногенные валы, колеи, старые дороги, нарушенную растительность и зоны возможного вторичного накопления загрязнений. В QGIS рассчитывали NDVI и SAVI; эти показатели рассматривались вместе с влажностью, уклоном, расстоянием до источника и лабораторными концентрациями.

Лабораторные, полевые и пространственные данные сводились в единую таблицу признаков: содержание нефтепродуктов, влажность, pH, органическое вещество, песчаная и глинистая фракции, NDVI, SAVI, высота, уклон, расстояние до источника загрязнения и до элементов стока. Каждой точке присваивался один из пяти классов: фоновое состояние, слабое, умеренное, сильное или очень сильное загрязнение. Класс определялся не только концентрацией нефтепродуктов, но и природными условиями участка.

Моделирование выполнялось в Python с использованием pandas, numpy, scikit-learn, matplotlib и geopandas. Перед обучением проверяли пропуски, выбросы, нормализовали признаки и анализировали корреляции. Для классификации применялись Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector Machine и k-nearest neighbors. Выборка делилась на обучающую и тестовую части в соотношении 70:30, качество оценивалось по accuracy, F1-мере, полноте и матрице ошибок. Для лучшей модели дополнительно рассчитывали значимость признаков, чтобы получить не только формальную классификацию, но и объяснимую геоэкологическую схему для мониторинга и рекультивации.

Результаты и обсуждение

По итогам геоэкологического обследования был собран разнородный массив данных о состоянии почвенного покрова: химические, почвенные, рельефные, дистанционные и визуально-полевые признаки. Главным параметром оставалось содержание нефтепродуктов, однако его распределение оказалось крайне неравномерным. Повышенные значения фиксировались не только рядом с источником, но и на удалении 80–120 м, что связано с переносом по микрорельефу, задержкой в понижениях, канавах, колеях и тяжелых почвах.

Концентрации нефтепродуктов изменялись от фоновых 80–150 мг/кг до сильного и очень сильного загрязнения выше 2000–3000 мг/кг. Низкие значения чаще совпадали с плотным растительным покровом, NDVI 0,50–0,65 и хорошим дренажем. Повышенные концентрации были характерны для понижений глубиной 0,2–0,5 м, техногенных канав, старых проездов и участков с разреженной растительностью. При этом визуально восстановленные площадки иногда сохраняли загрязнение в слоях 0–20 и 20–40 см.

Сопоставление лабораторных данных с цифровой моделью поверхности показало связь загрязнения с зонами слабого стока: малыми уклонами 1–3°, локальными понижениями, влажностью выше 22–30% и повышенной долей пылевато-глинистой фракции 25–40%. Дистанционные индексы также были полезны: на фоновых участках NDVI составлял 0,52–0,68, а в зонах сильного загрязнения снижался до 0,25–0,38. Однако NDVI и SAVI нельзя использовать изолированно, так как на них влияют уплотнение, переувлажнение, механическое нарушение, дороги и тень.

Для классификации точки группировали по совокупности признаков. Первично учитывали концентрации нефтепродуктов, затем уточняли классы по влажности, уклону, NDVI, гранулометрическому составу, положению относительно источника и расстоянию до элементов стока. В итоге выделены пять групп: фоновое состояние, слабое, умеренное, сильное и очень сильное загрязнение. Такая схема лучше отражает возможность накопления, выноса или закрепления нефтепродуктов в почвенном профиле.

После подготовки выборки были построены модели машинного обучения. K-nearest neighbors лучше разделял крайние классы, но хуже работал с переходными зонами. Support Vector Machine был стабильнее, но чувствителен к нормализации и настройкам ядра. Лучшие результаты дали ансамблевые методы – Random Forest и Gradient Boosting. Для Random Forest общая точность на тестовой выборке составила 0,84–0,87, F1-мера – 0,78–0,90. Модель наиболее уверенно распознавала фоновые и сильно загрязненные участки, а ошибки чаще возникали между соседними категориями. Gradient Boosting показал сопоставимое качество, но сильнее зависел от состава выборки, поэтому для интерпретации была выбрана модель Random Forest (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Результаты классификации нефтезагрязненных территорий различными
алгоритмами машинного обучения /
Results of classification of oil-contaminated areas using various
machine learning algorithms**

Метод классификации / Classification method	Общая точность / Overall accuracy	Precision	Recall	F1-мера	Основные особенности результата / Main features of the result
k-nearest neighbors	0.73	0.71	0.69	0.70	Хорошо выделяет фоновые и сильно загрязненные участки, но хуже разделяет слабое и умеренное загрязнение / Clearly identifies background and heavily contaminated areas, but less effectively separates weak and moderate contamination
Support Vector Machine	0.79	0.78	0.76	0.77	Дает более устойчивое разделение классов, но чувствителен к нормализации признаков и выбору ядра / Provides more stable class separation, but is sensitive to feature normalization and kernel selection
Gradient Boosting	0.85	0.84	0.83	0.83	Показывает высокую точность, но сильнее зависит от состава обучающей выборки / Shows high accuracy, but depends more strongly on the composition of the training sample
Random Forest	0.87	0.86	0.85	0.85	Обеспечивает наиболее устойчивую классификацию и позволяет оценивать значимость отдельных признаков / Provides the most stable classification and allows the importance of individual features to be assessed

Матрица ошибок показала важную практическую особенность: модель почти не относила сильно загрязненные участки к фоновым или слабозагрязненным. Это хороший результат, потому что именно такая ошибка была бы наиболее опасной при планировании мониторинга или рекультивации. Основные неточности имели вид смещения на 1 соседний класс: умеренное загрязнение могло быть принято за слабое или, наоборот, за сильное. Но в фон такие точки почти не уходили. Например, участок с концентрацией 1200–1500 мг/кг, влажностью 24–29%, NDVI 0,33–0,41 и уклоном около 2° мог получить соседнюю оценку, если его признаки находились на границе 2 категорий. Это

показывает, что модель в целом правильно схватывает структуру загрязнения, а неопределенность остается там, где она реально есть в природе. Переходные зоны редко бывают однозначными, потому что в них одновременно наблюдаются остаточные нефтепродукты, частичное восстановление травостоя, разная плотность почвы, и неодинаковая водопроницаемость.

Оценка значимости признаков для Random Forest подтвердила, что главным фактором всё равно остается содержание нефтепродуктов в почве. Но оно не объясняет картину полностью.

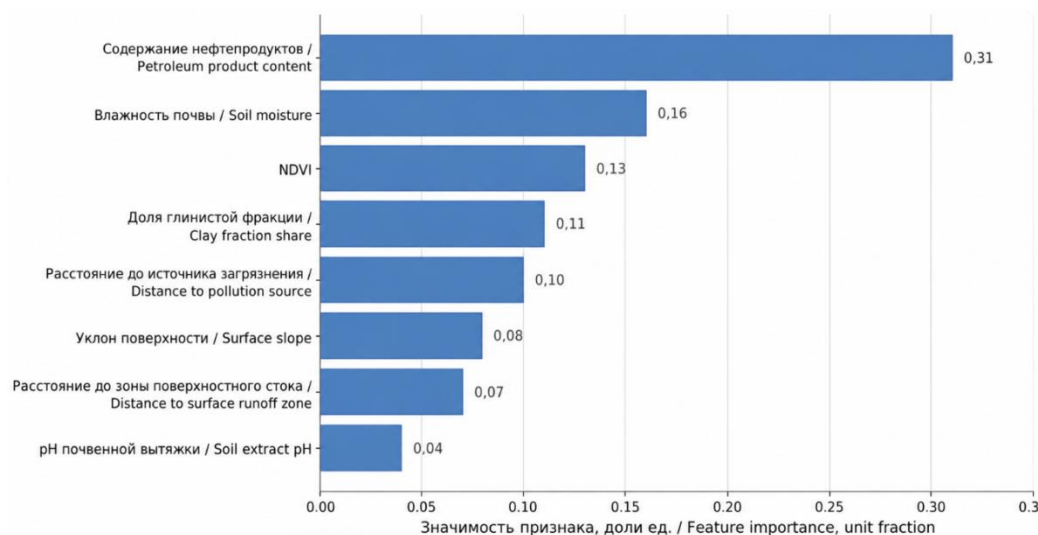


Рис. 1. Значимость признаков при классификации нефтезагрязненных территорий методом Random Forest

Fig. 1. Significance of features when classifying oil-contaminated areas using the Random Forest method

Наибольший вклад в разделение классов вносит содержание нефтепродуктов, однако важны также влажность, NDVI, гранулометрический состав и морфология поверхности (рис. 1). Вероятность отнесения участка к неблагоприятному классу возрастала при влажности выше 25–30%, доле глинистых частиц 25–40%, уклоне менее 2–3° и NDVI ниже 0,35. Это показывает, что нефтяное загрязнение является не только химическим показателем, но и пространственно-ландшафтным процессом.

Карта классификации показала, что зоны сильного и очень сильного загрязнения занимают ограниченную площадь, примерно 8–12% и 3–5% обследованной территории, но формируют основной экологический риск. Они располагались около источников нефтепродуктов на расстоянии 10–40 м, а также в местах вторичного накопления: канавах, микропонижениях, старых проездах и участках с ослабленным растительным покровом. Вокруг них формировалась переходная зона умеренного загрязнения, состояние которой может меняться в зависимости от дренажа, повторных поступлений и влажности почвы.

Сравнение машинной классификации с экспертной оценкой показало, что алгоритмы ИИ детальнее отражают внутреннюю неоднородность территории. Точки с близкими концентрациями могли получать разную оценку риска из-за различий во влажности, NDVI, уклоне, дренированности и близости к путям поверхностного переноса. Поэтому модель не заменяет лабораторный анализ, а связывает отдельные наблюдения в более цельную пространственную картину.

Материалы БПЛА позволили уточнить положение техногенных форм, локальных понижений, старых дорог и участков с разреженной растительностью. Спутниковые снимки Sentinel-2 давали общий фон, а беспилотная съемка уточняла малые пятна загрязнения площадью 50–200 м².

Полученные результаты можно использовать для корректировки сети мониторинга: в фоновых зонах сохранять шаг 50×50 м или увеличивать его до 75×75 м, а в подозрительных местах сгущать до 10–25 м. Это может снизить объем работ на 15–30% без потери качества оценки. При этом необходимо учитывать ограничения: зависимость результата от обучающей выборки, сезонности и глубины отбора проб. Если анализируется только слой 0–20 см, на песчаных участках возможно недоучитывание загрязнения в горизонте 20–40 см и глубже (табл. 2). Наиболее устойчивые результаты среди рассмотренных методов показал Random Forest.

Таблица 2 / Table 2

Геоэкологическая характеристика выделенных классов нефтезагрязненных территорий /
Geocological characteristics of the identified classes of oil-contaminated areas

Класс геоэкологического состояния / Class of geocological condition	Содержание нефтепродуктов, мг/кг / Petroleum product content, mg/kg	Характерные признаки территории / Characteristic features of the area	Геоэкологическая интерпретация / Geocological interpretation	Рекомендуемые действия / Recommended actions
Фоновое состояние / Background condition	до 100 / up to 100	Сохраненный растительный покров, нормальные значения NDVI, отсутствие визуальных следов загрязнения / Preserved vegetation cover, normal NDVI values, absence of visible signs of contamination	Территория не имеет выраженных признаков нефтяного воздействия / The area has no pronounced signs of petroleum impact	Периодический контроль по стандартной сети мониторинга / Periodic control using the standard monitoring network
Слабое загрязнение / Weak contamination	100–500	Незначительное снижение NDVI, локальные нарушения почвенного покрова, слабая техногенная нагрузка / Slight decrease in NDVI, local disturbances of the soil cover, weak technogenic load	Начальная или остаточная форма загрязнения без выраженной деградации почв / Initial or residual form of contamination without pronounced soil degradation	Повторный контроль, уточнение источника поступления загрязнения / Repeated monitoring and clarification of the contamination source
Умеренное загрязнение / Moderate contamination	500–1000	Угнетение растительности, повышенная влажность, связь с микропонижениями и зонами стока / Vegetation suppression, increased moisture, association with microdepressions and runoff zones	Переходное состояние, при котором возможно как восстановление, так и усиление загрязнения / Transitional condition in which both recovery and intensification of contamination are possible	Учащенный мониторинг, локальная рекультивация при сохранении загрязнения / More frequent monitoring and local remediation if contamination persists
Сильное загрязнение / Strong contamination	1000–5000	Низкие значения NDVI, пятнистое распределение растительности, повышенное содержание нефтепродуктов / Low NDVI values, patchy vegetation distribution, increased petroleum product content	Устойчивая зона техногенного воздействия с нарушением почвенных функций / Stable zone of technogenic impact with impaired soil functions	Рекультивация, удаление или обработка загрязненного грунта / Remediation, removal, or treatment of contaminated soil
Очень сильное загрязнение / Very strong contamination	более 5000 / more than 5000	Резкое угнетение или отсутствие растительности, выраженные следы нефтепродуктов, локальные зоны накопления / Severe suppression or absence of vegetation, pronounced traces of petroleum products, local accumulation zones	Максимально неблагоприятные участки, формирующие основной экологический риск / The most unfavorable areas forming the main environmental risk	Приоритетная / Priority

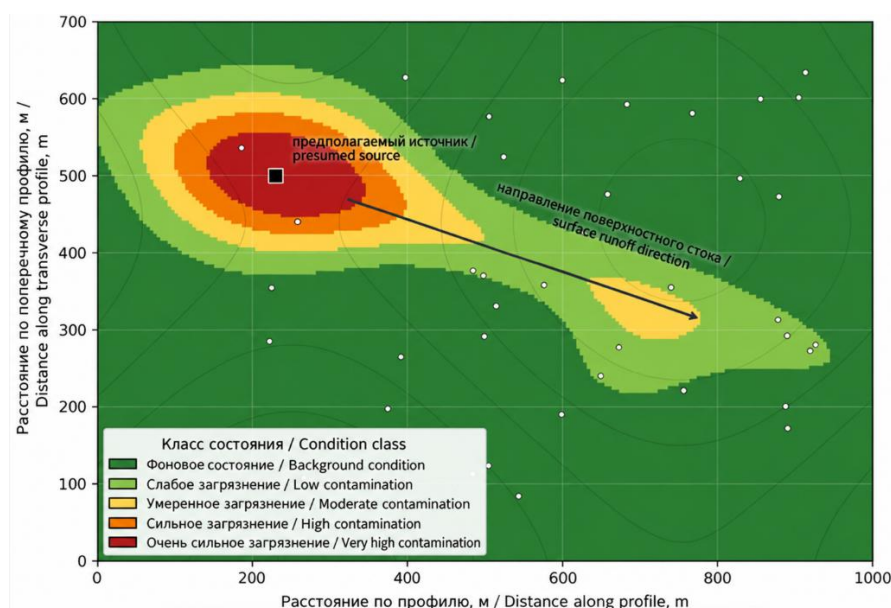


Рис. 2. Пространственное распределение классов нефтяного загрязнения по результатам геоэкологической классификации /

Fig. 2. Spatial distribution of oil pollution classes based on the results of geoeological classification

На рисунке 2 показана схема пространственного распределения классов нефтяного загрязнения, полученная по данным геоэкологического мониторинга и модели классификации. Наиболее загрязненные зоны тяготеют к источнику поступления нефтепродуктов и локальным понижениям, связанным с направлением поверхностного стока.

Практическое значение такого подхода состоит в том, что он помогает не просто разделить территорию на 5 классов загрязнения, а понять, почему одни участки являются более опасными, чем другие. Модель учитывает концентрацию нефтепродуктов, влажность, гранулометрический состав, NDVI, уклон поверхности, расстояние до источника и близость к элементам стока, поэтому итоговая карта получается более похожей на реальную природно-техногенную ситуацию. Это важно для выбора зон рекультивации, уточнения мониторинговой сети и обоснования природоохранных решений. При этом связь с традиционной геоэкологической оценкой сохраняется: лабораторные пробы остаются основой, а методы машинного обучения делают обработку более формализованной, воспроизводимой и удобной для анализа территорий, где загрязнение сохраняется долго, распределяется пятнами и не всегда хорошо видно по внешним признакам.

Выводы

На основании выполненного исследования, где рассматривалась классификация нефтезагрязненных земель по данным геоэкологического мониторинга и с применением методов искусственного интеллекта, можно сформулировать несколько основных выводов. Они связаны не только с работой моделей, но и с самим характером распределения загрязнения на участке.

Показано, что нефтяное загрязнение почвенного покрова имеет явно выраженный мозаичный характер, и описывать его только по отдельным лабораторным концентрациям нельзя. Даже при близких значениях концентрации нефтепродуктов, например 850, 970 или 1100 мг/кг, фактическое состояние участков может различаться довольно заметно. Это связано с влажностью почвы, долей глинистой фракции, уклоном поверхности, состоянием растительности, расстоянием до источника и положением точки от-

носителем зон поверхностного стока. Поэтому нефтезагрязненная территория в данной работе рассматривалась не как простая сумма загрязненных проб, а как природно-техногенная система, где углеводородные компоненты перемещаются, частично задерживаются, а иногда уходят ниже по профилю. На участках с уклоном $1-3^\circ$, влажностью 25–35% и ослабленным растительным покровом вероятность накопления была выше. А на более дренированных фрагментах, при уклоне $4-6^\circ$ и NDVI около 0,50–0,65, картина выглядела уже другой, даже если исходная концентрация была похожей.

Установлено, что объединение лабораторных, почвенных, дистанционных и геоморфологических данных заметно повышает содержательность геоэкологической оценки. Наиболее значимыми признаками оказались содержание нефтепродуктов, влажность, NDVI, доля глинистой фракции, расстояние до источника загрязнения, уклон поверхности и близость к элементам поверхностного стока. Это важно. Полученные результаты показывают, что устойчивые зоны загрязнения формируются не только там, где произошло поступление нефтепродуктов, но и там, где есть условия для их удержания: локальные понижения глубиной 0,2–0,6 м, слабый сток, тяжелый гранулометрический состав, переувлажнение, разреженная растительность. В таких местах даже через 1–2 сезона могут сохраняться остаточные концентрации, а визуально участок уже иногда выглядит почти восстановленным. Поэтому учет рельефа и почвенно-растительного состояния оказался не дополнительным, а фактически обязательным элементом анализа.

Сравнение алгоритмов машинного обучения показало, что наиболее стабильные результаты были получены при использовании ансамблевых методов. В первую очередь это Random Forest и Gradient Boosting. Модель Random Forest дала лучшее сочетание точности, устойчивости и понятной интерпретации, что для геоэкологических задач особенно важно. По тестовой выборке ее общая точность находилась примерно в пределах 0,84–0,87, а F1-мера по основным классам составляла около 0,78–0,90. В отличие от более простых подходов, модель позволила не только разделить территорию на 5 классов, то есть фоновое состояние, слабое, умеренное, сильное и очень сильное загрязнение, но и оценить вклад отдельных факторов. Основные ошибки возникали между соседними категориями, например между слабым и умеренным или между умеренным и сильным загрязнением. Это в целом нормально, потому что природная среда редко имеет резкую границу, и переходная зона шириной 10–30 м может иметь смешанные признаки.

Карта классификации показала, что зоны сильного и очень сильного загрязнения занимают сравнительно небольшую часть территории. Условно их площадь может составлять около 8–12% и 3–5% от обследованного участка, но именно они формируют основной экологический риск.

Эти неблагоприятные фрагменты связаны как с близостью к источникам поступления нефтепродуктов, обычно в пределах 10–40 м, так и с зонами вторичного накопления, куда загрязняющие вещества переносились поверхностным стоком. Умеренно загрязненные участки образуют вокруг них переходную область, и ее состояние может меняться во времени. При отсутствии новых поступлений, нормальном дренаже и рекультивации такая зона может постепенно перейти в слабозагрязненный класс. Но при повторном загрязнении, застое влаги или нарушении поверхностного стока, наоборот, возможно расширение неблагоприятных пятен. Поэтому эти территории нельзя оставлять без наблюдения, даже если концентрации там не максимальные.

Таким образом, применение методов искусственного интеллекта при обработке данных геоэкологического мониторинга позволяет сделать оценку нефтезагрязненных земель более формализованной, воспроизводимой и пространственно обоснованной. Предложенный подход не заменяет полевые маршруты, отбор проб и лабораторные определения, а связывает их в единую систему анализа. Он помогает уточнять сеть

мониторинга, выбирать точки дополнительного контроля, выделять приоритетные участки рекультивации и обосновывать природоохранные решения. Наиболее перспективным продолжением работы является расширение обучающей выборки хотя бы до 150–200 точек, проведение повторных съемок в разные сезоны (например, весной, летом и осенью), а также включение данных глубинного отбора проб из горизонтов 20–40 см и 40–60 см. Это позволит точнее оценить вертикальную миграцию нефтепродуктов и лучше понять, как загрязнение меняется не только по площади, но и по почвенному профилю.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В. Теоретические исследования возможности использования туннельных волн для мониторинга состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.
2. Затонский А. В., Кузнецов С. В., Саломатова К. А. Улучшение качества распознавания параметров флотомшины с использованием нейронной сети // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 6. – С. 153–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_153.
3. Ключев 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.
4. Маслов А.М., Орлов А.С. Анализ потенциальных экологических рисков при применении способа гидроразрыва пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 1. – С. 59–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_59.
5. Нурпеисова М.Б., Бурханов Б.Ж., Федотенко Н.А., Назаров Е.А. Мониторинг загрязнения почвенного покрова нефтепродуктами и разработка способа его рекультивации // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 4. – С. 833–841. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-833-841.
6. Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Лебедева Л.В. Оценка экологической реакции пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) на воздействие разных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94.
7. Толубекова Ж.З., Тиреуов К.М., Курмангалиева З.Н., Татаринцев В.Л. Экологическая реакция сельскохозяйственных культур на условия выращивания как основа управления устойчивостью агроландшафтов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712.
8. Banaee M., Zeidi A., Faggio C. Application of artificial intelligence and machine learning in computational toxicology in aquatic toxicology // Pollution. 2024. Vol. 10. No. 1. pp. 210–235. DOI: 10.22059/POLL.2023.362695.2003.
9. Barathkumar S., Devi A. Modeling and prediction of water quality using artificial intelligence techniques for enhanced monitoring and management // Water Environment Research. 2025. Vol. 97. No. 7. Art. No. e70143. DOI: 10.1002/wer.70143.
10. Didmanidze O.N., Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Serdechnyy D.V. Application of artificial intelligence and modern technologies in geomonitoring to improve the efficiency of the mining industry utilising the Earth's resources // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2025. No. 470. pp. 84–96. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.492.
11. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
12. Garcia A., Saez Y., Harris I., Huang X., Collado E. Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies // Artificial Intelligence Review. 2025. Vol. 58. No. 9. Art. No. 275. DOI: 10.1007/s10462-025-11277-9.
13. Hao J., Epstein S.A., Lavrinenko A.A., Fomina E.G. Kinetic test to estimate mobility of macro- and micro-elements in composition of solid coal refuse // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2025. No. 1. pp. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_5.

14. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica // *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 12. Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.
15. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Geoecological monitoring during mining operations // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
16. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
17. Shukla K.K., Gupta A., Arora S.V., Rai H.M., Sharma G., Nivetha A. Environmental monitoring and protection using artificial intelligence // In: *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3297. No. 1. Art. No. 0285889. DOI: 10.1063/5.0285889.
18. Sumi A.M., Chandrasekar K.S. Artificial intelligence for sustainable stewardship of Earth resources // *Data Analytics and Artificial Intelligence for Earth Resource Management*. 2024. pp. 65–75. DOI: 10.1016/B978-0-443-23595-5.00004-8.
19. Wijaya J., Park J., Yang Y., Siddiqui S.I., Oh S. A metagenome-derived artificial intelligence modeling framework advances the predictive diagnosis and interpretation of petroleum-polluted groundwater // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. Vol. 472. Art. No. 134513. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134513.
20. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N. Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

References

1. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V. Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 4. pp. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155. (In Russ.)
2. Zatonskiy A.V., Kuznetsov S.V., Salomatova K.A. Improvement of detection quality for parameters of flotation machines using neural network. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025. No. 6. pp. 153–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_153. (In Russ.)
3. Klyuev R.V., Martyushev N.V., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Brigida V. S. Analysis of geological information toward sustainable performance of geotechnical systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 5. pp. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144. (In Russ.)
4. Maslov A.M., Orlov A.S. Potential ecological risks of hydraulic fracturing. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026. No. 1. pp. 59–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_59. (In Russ.)
5. Nurpeissova M.B., Burkhanov B.Zh., Fedotenko N.A., Nazarov E.A. Assessment of oil waste as a source of environmental pollution and as a source of secondary raw materials. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 4. pp. 833–841. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-833-841. (In Russ.)
6. Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Lebedeva L.V. Assessment of the ecological reaction of soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to the effects of various factors. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026. Vol. 18. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94. (In Russ.)
7. Toleubekova Z.Z., Tireuov K.M., Kurmangalieva Z.N., Tatarintsev V.L. Ecological response of agricultural crops to growing conditions as a basis for managing the sustainability of agricultural landscapes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 2. pp. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712. (In Russ.)
8. Banae M., Zeidi A., Faggio C. Application of artificial intelligence and machine learning in computational toxicology in aquatic toxicology. *Pollution*. 2024. Vol. 10. No. 1. pp. 210–235. DOI: 10.22059/POLL.2023.362695.2003.

9. Barathkumar S., Devi A. Modeling and prediction of water quality using artificial intelligence techniques for enhanced monitoring and management. *Water Environment Research*. 2025. Vol. 97. No. 7. Art. No. e70143. DOI: 10.1002/wer.70143.
10. Didmanidze O.N., Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Serdechnyy D.V. Application of artificial intelligence and modern technologies in geomonitoring to improve the efficiency of the mining industry utilising the Earth's resources. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2025. No. 470. pp. 84–96. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.492.
11. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
12. Garcia A., Saez Y., Harris I., Huang X., Collado E. Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. *Artificial Intelligence Review*. 2025. Vol. 58. No. 9. Art. No. 275. DOI: 10.1007/s10462-025-11277-9.
13. Hao J., Epstein S.A., Lavrinenko A.A., Fomina E.G. Kinetic test to estimate mobility of macro- and micro-elements in composition of solid coal refuse. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025. No. 1. pp. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_5.
14. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 12. Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.
15. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Geoecological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
16. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
17. Shukla K.K., Gupta A., Arora S.V., Rai H.M., Sharma G., Nivetha A. Environmental monitoring and protection using artificial intelligence. In: *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3297. No. 1. Art. No. 0285889. DOI: 10.1063/5.0285889.
18. Sumi A.M., Chandrasekar K.S. Artificial intelligence for sustainable stewardship of Earth resources // *Data Analytics and Artificial Intelligence for Earth Resource Management*. 2024. pp. 65–75. DOI: 10.1016/B978-0-443-23595-5.00004-8.
19. Wijaya J., Park J., Yang Y., Siddiqui S.I., Oh S. A metagenome-derived artificial intelligence modeling framework advances the predictive diagnosis and interpretation of petroleum-polluted groundwater. *Journal of Hazardous Materials*. 2024. Vol. 472. Art. No. 134513. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134513.
20. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N. Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

УДК 551.435.62:631.4:581.5(470.6)
DOI: 10.46698/VNC.2026.33.89.001

Оригинальная статья

Влияние селевых процессов на трансформацию почвенно-растительного покрова Центрального Кавказа

С.О. Курашкин^{1,2}, В.В. Торопцев², О.С. Пучкова²,
Н.А. Ягудаева², Ю.С. Кузнецова³

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

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

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

Статья поступила: 31.07.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Селевые процессы Центрального Кавказа быстро трансформируют горные ландшафты, нарушая почвенный профиль, растительный покров, микрорельеф и условия поверхностного стока. При этом растительность может восстанавливаться быстрее почвы, что осложняет оценку состояния нарушенных территорий. **Цель исследования.** Оценить изменения почвенно-растительного покрова под влиянием селей с разделением территории на зоны сноса, транзита и аккумуляции. **Методы исследования.** Использованы полевые описания селевых участков, почвенные разрезы, послыйный отбор проб, геоботанические наблюдения, материалы БПЛА и данные дистанционного зондирования. Анализ включал оценку мощности наносов, сохранности гумусового горизонта, гранулометрического состава, каменистости, доли открытого минерального субстрата, проективного покрытия, видового состава растительности, NDVI и положения участка относительно селевого русла. **Результаты.** Установлено, что в зоне сноса преобладают размыв, удаление гумусового горизонта на 15–80 см и резкое снижение проективного покрытия с 70–90% до 5–18%. В транзитной зоне чередуются промоины, наносы и фрагменты дернины, а в зоне аккумуляции прежняя поверхность перекрывается отложениями мощностью до 1,2–1,5 м. Растительность частично восстанавливается за 1–8 лет, тогда как почвенный профиль сохраняет признаки нарушения 20–50 лет и более. Результаты применимы для геоэкологического мониторинга и картирования селевой опасности.

Ключевые слова: селевые процессы, Центральный Кавказ, почвенно-растительный покров, геоэкологический мониторинг, селевые отложения, гумусовый горизонт, растительные сукцессии, горные ландшафты.

Для цитирования: Курашкин С.О., Торопцев В.В., Пучкова О.С., Ягудаева Н.А., Кузнецова Ю.С. Влияние селевых процессов на трансформацию почвенно-растительного покрова Центрального Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.33.89.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.33.89.001

Original paper

The influence of debris-flow processes on the transformation of soil and vegetation cover of the Central Caucasus

S.O. Kurashkin^{1,2}, **V.V. Toroptsev**², **O.S. Puchkova**²,
N.A. Yagudaeva², **Yu.S. Kuznetsova**³

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

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

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

Received: 31.07.2026, revised: 10.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Debris-flow processes in the Central Caucasus rapidly transform mountain landscapes by disturbing the soil profile, vegetation cover, microrelief, and surface runoff conditions. Vegetation may recover faster than soil, which complicates the assessment of disturbed areas. **Aim.** The study aims to assess changes in soil and vegetation cover under the influence of debris flows, with division of the territory into erosion, transit, and accumulation zones. **Methods.** Field descriptions of debris-flow sites, soil profiles, layer-by-layer sampling, geobotanical observations, UAV materials, and remote sensing data were used. The analysis included deposit thickness, preservation of the humus horizon, granulometric composition, stoniness, share of exposed mineral substrate, vegetation cover, species composition, NDVI values, and site position relative to the debris-flow channel. **Results.** It was established that erosion zones are dominated by washout, removal of the humus horizon by 15–80 cm, and a sharp decrease in vegetation cover from 70–90% to 5–18%. In transit zones, gullies, deposits, and turf fragments alternate, whereas in accumulation zones the former surface is buried under deposits up to 1.2–1.5 m thick. Vegetation partially recovers within 1–8 years, while the soil profile retains disturbance features for 20–50 years or longer. The results are applicable to geoecological monitoring and debris-flow hazard mapping.

Keywords: debris flow processes, Central Caucasus, soil and vegetation cover, geoecological monitoring, debris flow deposits, humus horizon, vegetation succession, mountain landscapes.

For citation: Kurashkin S.O., Toroptsev V.V., Puchkova O.S., Yagudaeva N.A., Kuznetsova Yu.S. The influence of debris-flow processes on the transformation of soil and vegetation cover of the Central Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.33.89.001

Введение

Селевые процессы относятся к наиболее сложным природным явлениям Центрального Кавказа. Их развитие связано с крутыми склонами, высокой расчлененностью рельефа, геологическим строением, климатическими колебаниями, снеготаянием, ливневыми осадками и изменением состояния ледниково-склоновых систем. В последние десятилетия селевые потоки все чаще рассматривают не только как угрозу инженерным сооружениям и населению, но и как механизм быстрой перестройки горных ландшафтов [Гакаев, Пуреховский, 2025]. Особенно заметно это в районах с выраженной высотной поясностью (рис. 1), где почвенно-растительный покров находится в неустойчивом равновесии с рельефом, водным режимом и литогенной основой [Fomina et al., 2016].



Рис. 1. Основные факторы формирования селевых процессов на Центральном Кавказе: рельеф, геологическое строение, водное питание, климатические изменения, состав рыхлого материала и особенности горного ландшафта /

Fig. 1. Main factors controlling debris-flow formation in the Central Caucasus: relief, geological structure, water input, climatic changes, composition of loose deposits, and mountain landscape characteristics

Исследование последствий селей для почвы и растительности важно потому, что именно верхние 10–30 см грунта, травяной ярус высотой 15–70 см и корневые системы первыми воспринимают удар движущейся массы. Один эпизод длительностью от 20–40 минут до 2–6 часов способен нарушить участок протяженностью 1–5 км. При этом изменения включают смыв гумусового слоя мощностью 5–25 см, срезание горизонтов на глубину 0,3–1,2 м, погребение прежней поверхности наносами 20–300 см и перемешивание материала от частиц менее 0,01 мм до глыб диаметром 1–3 м [Pospehov, Savon-Vaciano, 2024].

На наиболее нарушенных участках проективное покрытие растительности уменьшается с 70–95% до 0–10%, а число обычных видов сокращается в 3–7 раз. Внешнее зарастание может начаться уже через 2–4 года, но это не означает полного восстановления природного комплекса. Травянистая растительность местами возвращается за 1–3 сезона (рис. 2), кустарниковый ярус формируется примерно за 8–15 лет, а восстановление гумусового горизонта мощностью 3–7 см может занимать 20–50 лет и более [Татаринцев и др., 2026].

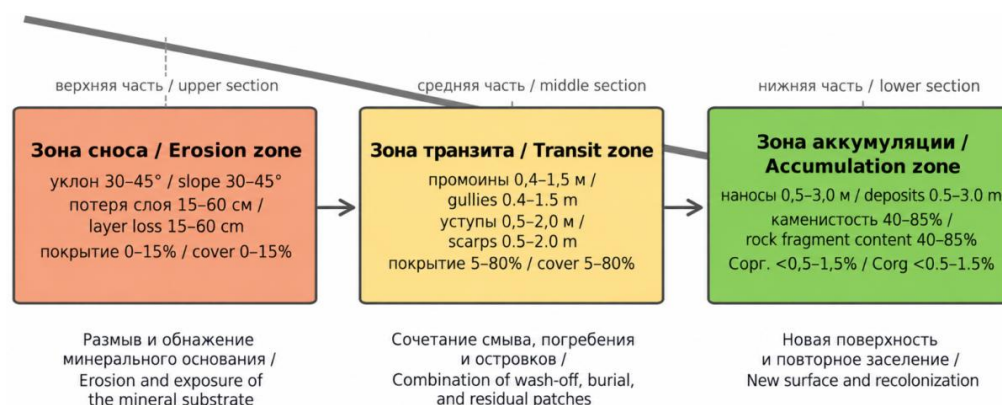


Рис. 2. Различия последствий селевого потока в зонах сноса, транзита и аккумуляции: в верхней части бассейна преобладают размыв и потеря почвенного слоя, в средней части сочетаются смыв, погребение и сохранение отдельных растительных островков, а в нижней части формируются новые аккумулятивные поверхности /

Fig. 2. Differences in debris-flow impacts within the erosion, transit, and accumulation zones: erosion and soil-layer loss dominate in the upper basin, washout, burial, and preserved vegetation patches occur in the middle part, while new depositional surfaces form in the lower accumulation zone

Для Центрального Кавказа эта проблема особенно выражена: на расстоянии 10–30 км могут сочетаться высоты 1000–5000 м, уклоны 15–45° и сильно расчлененный рельеф [Керимов и др., 2023]. Моренные, делювиальные, коллювиальные и пролювиальные отложения мощностью 2–10 м часто содержат 35–75% щебня и глыб, 15–40% песчаного материала и 5–25% пылевато-глинистой части [Yelemessov et al., 2026]. При 30–70 мм осадков за 6–12 часов и увлажнении слоя 0,4–1,0 м вероятность потери устойчивости возрастает. Климатические изменения, включая сокращение ледников, смещение снеготаяния и учащение ливней, дополнительно меняют водное питание бассейнов [Malozyomov et al., 2024]. В результате сели перестраивают русла на 0,5–4 км и переносят тысячи кубометров наносов [Yadav, Verma, 2025]. Большинство исследований посвящено происхождению селей, скорости потока, защитным сооружениям, картированию опасных зон и рискам для инфраструктуры. Однако состояние природных комплексов через 1, 10 или 30 лет после события изучено слабее [Поспехов и др., 2025]. Между тем почва и растительность могут указывать на силу и возраст селя: погребенный гумусовый горизонт на глубине 20–80 см, смена суглинков галечно-валунным материалом, скелетность 60–90% и чередование заросших и открытых площадок 5–100 м² [Osrapova et al., 2025]. Сопоставление почвенных разрезв, геоботанических площадок и поперечных профилей помогает выявлять старые наносы даже там (рис. 3), где они почти не различимы визуально [Zaalishvili et al., 2024].

При полевом обследовании необходимо разделять зоны сноса, транзита и аккумуляции, поскольку один и тот же селевой поток формирует в них разные последствия. В зоне сноса при уклонах 30–45° преобладают размыв, срезание горизонтов и обнажение минерального основания; мощность утраченного слоя может достигать 15–60 см, содержание органического вещества уменьшается в 2–5 раз, а растительное покрытие падает до 0–15% [Толеубекова и др., 2025]. В транзитной полосе на отрезке 100–300 м могут сочетаться промоины глубиной 0,4–1,5 м, погребенные дернины, уступы 0,5–2,0 м и линзы наносов мощностью 10–40 см. В зоне аккумуляции формируются новые поверхности с наносами 0,5–3,0 м, каменностью 40–85% и содержанием органического углерода менее 0,5–1,5% в первые годы [Азаров и др., 2024].

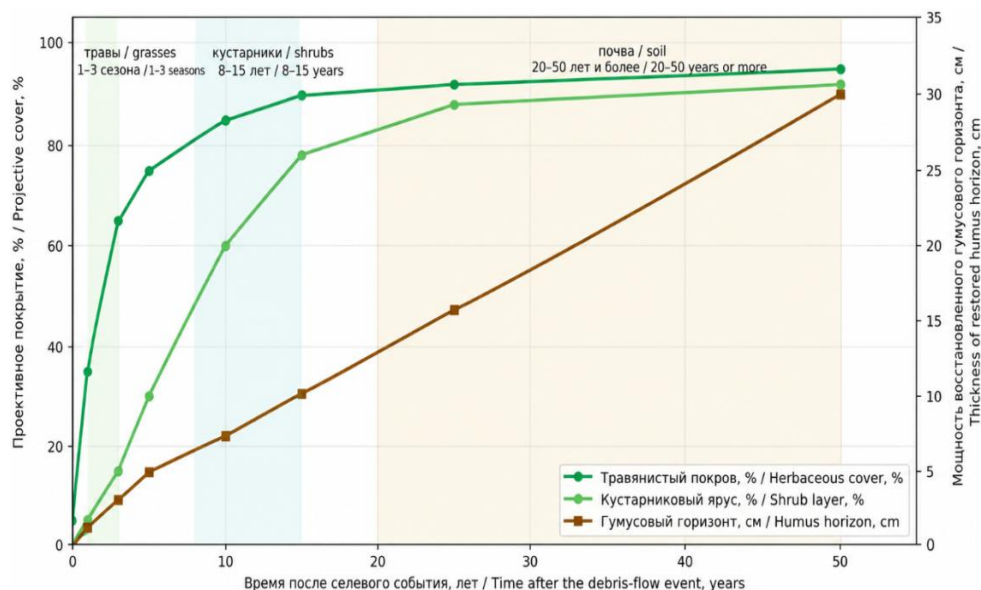


Рис. 3. Динамика восстановления растительности и почвенного профиля после селевого события: травянистый покров частично восстанавливается уже в течение 1–3 сезонов, кустарниковый ярус формируется примерно за 8–15 лет, тогда как накопление гумусового горизонта продолжается 20–50 лет и более /

Fig. 3. Recovery dynamics of vegetation cover and soil profile after a debris-flow event: herbaceous vegetation partially recovers within 1–3 seasons, the shrub layer develops over approximately 8–15 years, whereas humus horizon accumulation continues for 20–50 years or more

Цель работы состоит в оценке изменений почвенно-растительного покрова Центрального Кавказа под влиянием селевых процессов с разделением территории минимум на три функциональные зоны, учетом 4–6 характеристик отложений и определением степени восстановления по почвенным и геоботаническим признакам. Научная значимость исследования связана с возможностью проследить изменения за 1–5, 10–20 и более чем 30 лет, а практическое значение – с применением результатов при геоэкологическом мониторинге, составлении карт масштаба 1:10 000–1:50 000 и выборе восстановительных мероприятий для участков площадью от 0,1 га до нескольких десятков гектаров.

Методы и материалы

В качестве объектов наблюдения были выбраны участки Центрального Кавказа, где за последние 5–15 лет происходили селевые события разной силы и повторяемости. Обследование охватывало долины водотоков и склоновые поверхности на высотах примерно 1200–2800 м, где хорошо прослеживаются размыв почвы, погребение прежних горизонтов и повреждение растительности.

Основное внимание уделялось зонам зарождения и сноса, транзитным руслам и участкам аккумуляции обломочного материала. Для сравнения на расстоянии 100–500 м от границ селевых тел подбирались фоновые площадки, сходные по высоте, крутизне, экспозиции, геологическому строению, увлажнению и исходной растительности. Полевые маршруты прокладывались вдоль и поперек селевых долин, что позволяло фиксировать не только общий масштаб нарушения, но и различия между сносом, переносом и накоплением материала (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Параметры полевого обследования селевых участков Центрального Кавказа /
Parameters of the field survey of mudflow areas in the Central Caucasus**

Направление работ / Area of work	Принятый подход / Adopted approach	Основные параметры / Main parameters	Назначение / Purpose
Район наблюдений / Observation area	Участки Центрального Кавказа с современными селевыми проявлениями / Areas of the Central Caucasus with recent debris-flow manifestations	События за последние 5–15 лет / Events over the last 5–15 years	Анализ последствий селей разной давности / Analysis of the consequences of debris flows of different ages
Высотный диапазон / Elevation range	Долины водотоков и склоновые поверхности / Stream valleys and slope surfaces	1200–2800 м / 1200–2800 m	Охват зон с выраженными нарушениями почвы и растительности / Coverage of zones with pronounced soil and vegetation disturbance
Функциональные зоны / Functional zones	Выделяли зоны сноса, транзита и аккумуляции / Erosion, transit, and accumulation zones were identified	Минимум 3 зоны на профиль / At least 3 zones per profile	Раздельная оценка типов воздействия / Separate assessment of impact types
Фоновые площадки / Background plots	Подбирали вне границ селевых тел / Selected outside the boundaries of debris- flow bodies	100–500 м от нарушенных участков / 100–500 m from disturbed areas	Сравнение с ненарушенными природными комплексами / Comparison with undisturbed natural complexes
Критерии подбора фона / Criteria for background selection	Учитывали сходные природные условия / Similar natural conditions were considered	4–6 параметров: высота, уклон, экспозиция, геология, увлажнение, растительность / 4–6 parameters: elevation, slope, aspect, geology, moisture, vegetation	Снижение ошибки при сравнении / Reduction of comparison error
Полевые профили / Field profiles	Маршруты вдоль и поперек долин / Routes along and across valleys	Длина 0,8–4,5 км; перепад 150–650 м / Length 0.8–4.5 km; elevation difference 150–650 m	Выявление пространственной структуры нарушений / Identification of the spatial structure of disturbances
Точки описания / Description points	Фиксировали координаты, высоту, уклон, экспозицию, мощность наносов / Coordinates, elevation, slope, aspect, and deposit thickness were recorded	Не менее 5–12 точек в каждой зоне / At least 5–12 points in each zone	Детализация различий внутри селевого бассейна / Detailed characterization of differences within the debris- flow basin
Русловые формы / Channel forms	Измеряли ширину русла и глубину врезов / Channel width and incision depth were measured	Ширина 3–70 м; врезы 0,4–2,8 м / Width 3–70 m; incisions 0.4–2.8 m	Оценка эрозионного воздействия / Assessment of erosional impact
Открытый минеральный грунт / Exposed mineral soil	Определяли долю обнаженной поверхности / The proportion of exposed surface was determined	5–95%	Характеристика степени нарушения покрова / Characterization of the degree of cover disturbance

Направление работ / Area of work	Принятый подход / Adopted approach	Основные параметры / Main parameters	Назначение / Purpose
Сохранность профиля / Profile preservation	Выделяли полный, срезанный, перемешанный или погребенный профиль / Complete, truncated, mixed, or buried profiles were identified	Наносы 10, 25, 50 и >100 см / Deposits of 10, 25, 50, and >100 cm	Разделение типов почвенной трансформации / Differentiation of soil transformation types
Координатная привязка / Coordinate referencing	Использовали Garmin GPSMAP 64s и EFT M3 GNSS / Garmin GPSMAP 64s and EFT M3 GNSS were used	Точность 3–5 м; повтор 2–3 раза в ущельях / Accuracy 3–5 m; repeated 2–3 times in gorges	Пространственная фиксация точек и профилей / Spatial recording of points and profiles
БПЛА-съемка / UAV survey	Применяли DJI Mavic 3 Enterprise / DJI Mavic 3 Enterprise was used	Высота 80–120 м; скорость 5–9 м/с / Altitude 80–120 m; speed 5–9 m/s	Получение ортофотопланов и моделей поверхности / Acquisition of orthophotomaps and surface models
Параметры съемки / Survey parameters	Поддерживали перекрывание кадров / Image overlap was maintained	Продольное 75–80%; поперечное 65–70% / Longitudinal 75–80%; lateral 65–70%	Повышение качества 3D-модели / Improvement of 3D model quality

Почвенные пробы отбирались послойно. На каждой площадке исследовались интервалы 0–10 и 10–20 см, а при сохраненном профиле закладывался разрез глубиной 40–50 см. В зонах аккумуляции отдельно изучали верхний селевой слой и погребенный гумусовый горизонт, если он прослеживался как непрерывная темная полоса. Растительность оценивали на площадках 10×10 м, а при наличии древесного яруса размер учетной территории увеличивали до 20×20 м.

Дистанционная часть исследования включала материалы Sentinel-2 MSI и Landsat 8/9 OLI. Для каждого бассейна подбирались снимки до и после селевого события, желательно в близкие календарные сроки и при облачности не более 5–15% (табл. 2). По снимкам рассчитывали NDVI, выделяли нарушенные поверхности и сопоставляли результаты с ортофотопланами, полевыми маршрутами и цифровой моделью рельефа.

Таблица 2 / Table 2

**Лабораторная, геоботаническая, дистанционная и статистическая
обработка материалов /
Laboratory, geobotanical, remote and statistical processing of materials**

Направление анализа / Area of analysis	Методика / оборудование / Methodology / equipment	Численные параметры / Numerical parameters	Что оценивалось / What was assessed
Почвенные интервалы / Soil intervals	Послойный отбор материала / Layer-by-layer material sampling	0–10, 10–20 см; разрез 40–50 см / 0–10, 10–20 cm; section 40–50 cm	Изменение верхней части профиля / Changes in the upper part of the profile
Горизонты в разрезе / Horizons in the section	Выделение слоев по цвету, плотности, влажности и каменистости / Identification of layers by color, density, moisture, and stoniness	2–4 горизонта / 2–4 horizons	Сохранность или перемешивание профиля / Preservation or mixing of the profile
Зона аккумуляции / Accumulation zone	Раздельный отбор наносов и погребенной почвы / Separate sampling of deposits and buried soil	Наносы 15–80 см; погребенный горизонт 2–6 см / Deposits 15–80 cm; buried horizon 2–6 cm	Различение нового селевого материала и старой почвы / Differentiation of new debris-flow material and old soil

Направление анализа / Area of analysis	Методика / оборудование / Methodology / equipment	Численные параметры / Numerical parameters	Что оценивалось / What was assessed
Объединенная проба / Composite sample	Смешивание частных навесок / Mixing of individual subsamples	0,8–1,2 кг; 4–6 навесок; расстояние 2–8 м / 0.8–1.2 kg; 4–6 subsamples; distance 2–8 m	Снижение влияния случайных обломков / Reduction of the influence of random fragments
Подготовка проб / Sample preparation	Сушка, удаление корней и крупных включений, просев / Drying, removal of roots and large inclusions, sieving	40–45 °C; 24–72 ч; фракции >10–20 мм; сито 1 мм / 40–45 °C; 24–72 h; fractions >10–20 mm; 1 mm sieve	Получение однородного материала для анализа / Obtaining homogeneous material for analysis
Гранулометрия / Particle-size analysis	Ситовой и ареометрический методы / Sieve and hydrometer methods	5–7 размерных классов; повтор 2–3 раза / 5–7 size classes; repeated 2–3 times	Содержание песчаных, пылеватых, глинистых и каменных фракций / Content of sandy, silty, clayey, and stony fractions
Контроль измерений / Measurement control	Повтор анализа при расхождении / Repeated analysis in case of discrepancies	Более 5–7% / More than 5–7%	Проверка устойчивости лабораторных данных / Verification of laboratory data stability
Органическое вещество / Organic matter	Потеря массы после прокаливания, SNOL 8.2/1100 / Loss on ignition, SNOL 8.2/1100	Навеска 3–7 г; 550 °C; 4 ч; охлаждение 30–45 мин / Sample weight 3–7 g; 550 °C; 4 h; cooling 30–45 min	Оценка содержания органического вещества / Assessment of organic matter content
pH / pH	Mettler Toledo FiveEasy / Mettler Toledo FiveEasy	Вытяжка 1:2,5; перемешивание 3–5 мин; выдержка 20–30 мин / Extract 1:2.5; mixing 3–5 min; settling 20–30 min	Реакция почвенной среды / Soil reaction
Влажность / Moisture content	Весовой метод, Binder ED 56 / Gravimetric method, Binder ED 56	105 °C; контроль через 4, 6 и 8 ч; точность 0,01–0,02 г / 105 °C; control after 4, 6, and 8 h; accuracy 0.01–0.02 g	Влагоемкость и состояние образца / Moisture capacity and sample condition
Весы / Scales	Ohaus Pioneer / Ohaus Pioneer	Точность 0,001 г / Accuracy 0.001 g	Контроль массы проб и навесок / Control of sample and subsample mass
Повторный контроль / Repeated control	Повторяли часть лабораторных анализов / Part of the laboratory analyses was repeated	10–15% проб; допуск 3–5% по влажности и 5–8% по органике / 10–15% of samples; tolerance 3–5% for moisture and 5–8% for organic matter	Оценка воспроизводимости / Assessment of reproducibility
Геоботанические площадки / Geobotanical plots	Учет травяного и кустарникового ярусов / Recording of herbaceous and shrub layers	10×10 м; при деревьях 20×20 м / 10×10 m; 20×20 m where trees are present	Проективное покрытие, число видов, высота травостоя / Projective cover, number of species, grass stand height
Повреждения растений / Plant damage	Полевое описание механических нарушений / Field description of mechanical damage	Обдир коры 0,2–1,5 м; корни 10–50 см / Bark stripping 0.2–1.5 m; roots 10–50 cm	Следы прохождения селевого потока / Traces of debris-flow passage

Направление анализа / Area of analysis	Методика / оборудование / Methodology / equipment	Численные параметры / Numerical parameters	Что оценивалось / What was assessed
Молодые наносы / Young deposits	Учет растений-закрепителей / Recording of stabilizing plants	Пятна мелкозема 0,1–1,0 м ² через 2–4 сезона / Fine-earth patches of 0.1–1.0 m ² after 2–4 seasons	Начальные стадии восстановления / Initial stages of recovery
Спутниковые данные / Satellite data	Sentinel-2 MSI и Landsat 8/9 OLI / Sentinel-2 MSI and Landsat 8/9 OLI	10 м и 30 м/пиксель / 10 m and 30 m/pixel	Изменение растительного покрова до и после события / Changes in vegetation cover before and after the event
NDVI / NDVI	Сравнение двух дат / Comparison of two dates	Снижение, например, 0,62–0,74 до 0,10–0,28 / Decrease, for example, from 0.62–0.74 to 0.10–0.28	Индикатор потери сомкнутой растительности / Indicator of closed vegetation loss
ГИС-обработка / GIS processing	QGIS 3.34 и ArcGIS Pro / QGIS 3.34 and ArcGIS Pro	WGS 84 / UTM zone 38N; 5–8 слоев / WGS 84 / UTM zone 38N; 5–8 layers	Карты русел, уклонов, высот, наносов, проб и NDVI / Maps of channels, slopes, elevations, deposits, samples, and NDVI
Ограничения спутников / Satellite limitations	Уточнение по БПЛА и полю / Refinement using UAV and field data	Landsat плохо различает <100–300 м ² ; Sentinel-2 ограничен при ширине 2–8 м / Landsat poorly distinguishes areas <100–300 м ² ; Sentinel-2 is limited at widths of 2–8 m	Проверка мелких нарушенных участков / Verification of small disturbed areas

Итоговая оценка строилась на объединении полевых описаний, анализа 2–4 почвенных горизонтов, геоботанических площадок, спутниковых индексов, фотографий, ортофотопланов и цифровых моделей поверхности. Такой порядок позволял оценить не только площадь нарушений, но и характер трансформации: размыв, перенос, погребение старой почвы или формирование новых аккумулятивных поверхностей. Это особенно важно для Центрального Кавказа, где внешне похожие участки могут отличаться по мощности наносов, сохранности гумусового горизонта и скорости восстановления растительности.

Результаты и обсуждение

Проведенные наблюдения показали, что селевые процессы в пределах исследованных территорий Центрального Кавказа изменяют почвенно-растительный покров неравномерно. На одних площадках нарушение ограничивалось слоем 8–15 см, на других поток срезал 60–80 см грунта, углублялся более чем на 1 м и полностью перестраивал поверхность. Характер изменений зависел от положения участка в зоне сноса, транзита или аккумуляции, крутизны склона, мощности наносов, гранулометрического состава и времени, прошедшего после последнего события. Наиболее сильные нарушения зафиксированы в зоне сноса, где поток удалял гумусовый горизонт и оставлял открытую щебнисто-глыбовую поверхность. Здесь проективное покрытие обычно не превышало 5–12%, а на отдельных площадках снижалось до 0–3%. Даже через несколько лет первые растения занимали не более 10–18% площади, поскольку восстановление ограничивали подвижность основания, дефицит гумуса, слабое удержание влаги и перегрев открытого субстрата.

Транзитные участки отличались максимальной мозаичностью. В пределах 100–400 м² одновременно встречались промоины, гряды грубых обломков, сохранившиеся дернины и линзы песчано-суглинистого материала. Поэтому даже при увеличении общего проективного покрытия до 40–55% структура покрова оставалась неоднородной: старые дернины, молодые заросли и полосы размыва восстанавливались с разной скоростью. В аккумулятивной зоне формировались наиболее мощные селевые толщи – от 25–40 см до 1,2–1,5 м. На молодых поверхностях прежний профиль обычно не прослеживался, а на более старых формах появлялся только тонкий гумусированный слой 2–8 см. Поэтому внешнее зарастание на 45–60% не означало полного восстановления: почвенный слой сохранял признаки раннего развития, высокую каменистость и резкую неоднородность по мощности мелкозема. Полученные данные показывают, что органическое вещество является одним из наиболее чувствительных показателей трансформации почвенного покрова (рис. 4). При этом снижение его содержания связано не только с механическим удалением гумусового горизонта, но и с разбавлением почвенной массы минеральным материалом селевого происхождения.

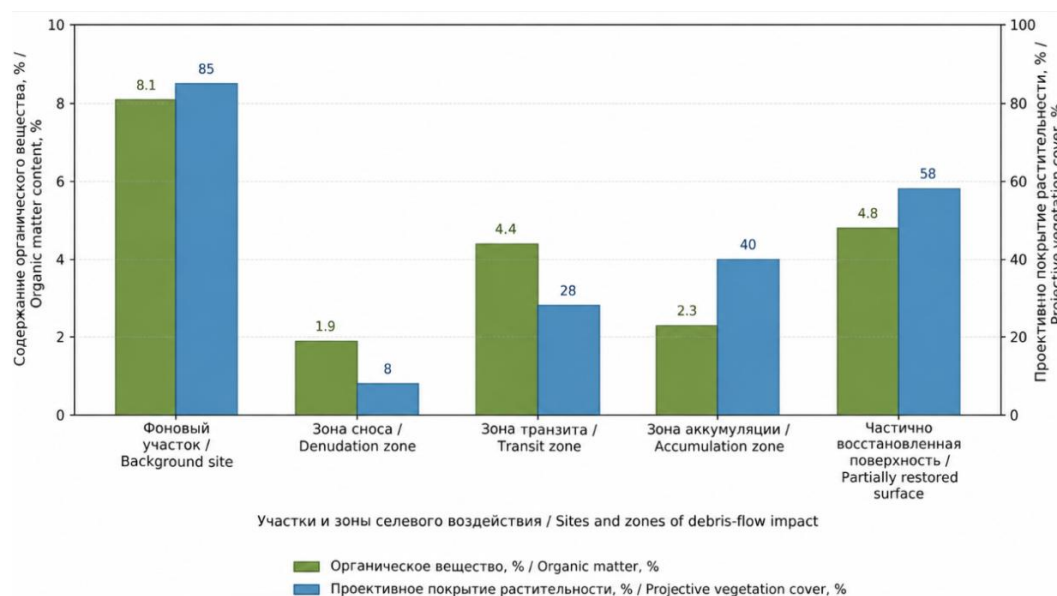


Рис. 4. Изменение содержания органического вещества в почве и проективного покрытия растительности в разных зонах селевого воздействия Центрального Кавказа /

Fig. 4. Changes in the content of organic matter in the soil and the projective cover of vegetation in different zones of mudflow impact in the Central Caucasus

Результаты лабораторного анализа подтвердили полевые наблюдения: селевые процессы резко меняют как почвенные свойства, так и структуру растительного покрова. На фоновых площадках содержание органического вещества в верхнем горизонте составляло в среднем 6,8–9,4%, а в отдельных луговых почвах достигало 10–12%. В зоне сноса этот показатель снижался до 1,1–2,6%, то есть примерно в 3–7 раз. На свежем аккумулятивном материале он обычно находился в пределах 1,5–3,0%, а в транзитной части занимал промежуточное положение – 3,2–5,7% (рис. 5).

Гранулометрический состав после прохождения селевого потока заметно изменялся. В зоне сноса доля скелетного материала крупнее 2 мм составляла 45–70%, а на наиболее промытых участках достигала 75–80%. Такие поверхности хуже удерживали влагу и затрудняли закрепление корней, поэтому даже близко расположенные участки одного возраста могли иметь разное проективное покрытие – от 10–15% до 45–60%.

Растительность восстанавливалась стадийно. Свежие нарушения фиксировались по снижению NDVI с фоновых 0,62–0,78 до 0,12–0,28; при частичном восстановлении значения повышались до 0,34–0,52. Однако для малых форм требовалась проверка по данным БПЛА и полевых наблюдений.

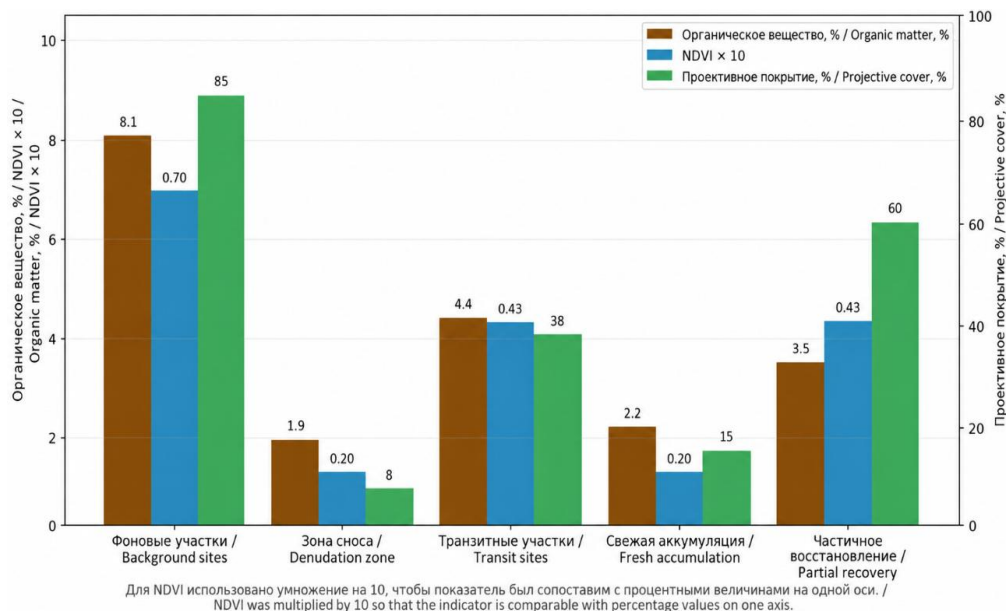


Рис. 5. Изменение органического вещества, NDVI и растительного покрытия на фоновых и селевых поверхностях Центрального Кавказа /

Fig. 5. Changes in organic matter, NDVI and vegetation cover on background and mudflow surfaces of the Central Caucasus

В аккумулятивной зоне выявлены погребенные гумусированные горизонты на глубине 30–70 см, перекрытые плохо сортированным селевым материалом. Это указывает на многоэтапное формирование конусов выноса. Даже при травяном покрытии 55–75% почвенный профиль может сохранять следы нарушений 20–50 лет и более.

Поэтому при геоэкологической оценке недостаточно учитывать только NDVI или визуальную долю зелени. Необходимо сопоставлять строение профиля, мощность наносов, гранулометрический состав, органическое вещество, микрорельеф, покрытие и видовую структуру растительности.

Представленная схема показывает (рис. 6), что трансформация почвенно-растительного покрова имеет выраженную продольную дифференциацию. В верхней части селевой системы преобладает разрушение почвенного профиля, в средней формируется мозаичное нарушение, а в нижней происходит погребение прежних почв и начало нового этапа почвообразования на селевых отложениях. Результаты исследования подтверждают значительную роль селей в современном преобразовании ландшафтов Центрального Кавказа. В пределах одной долины они формируют сочетание полностью разрушенных, частично сохранившихся и относительно стабильных участков, расстояние между которыми иногда составляет всего 10–100 м.

Наиболее сильные изменения связаны с зонами сноса и свежей аккумуляции. В зоне сноса поток удаляет почвенный слой мощностью 20–80 см и снижает проективное покрытие до 0–12%; в зоне аккумуляции прежняя поверхность перекрывается наносами толщиной 25–150 см. Транзитная зона отличается наиболее сложным строением: здесь чередуются промоины, гряды, молодые наносы и фрагменты дернины.

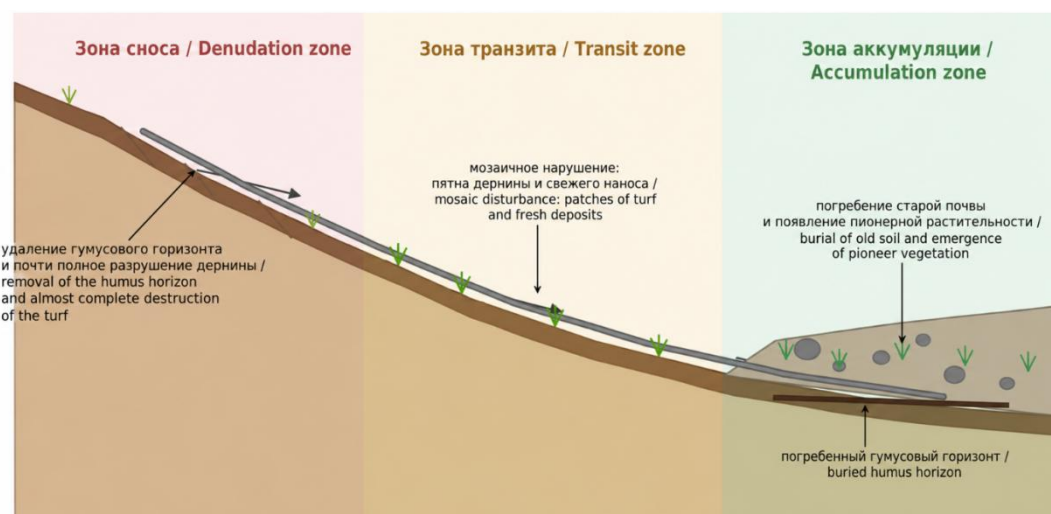


Рис. 6. Схема трансформации почвенно-растительного покрова в пределах селевой системы Центрального Кавказа /

Fig. 6. Scheme of transformation of soil and vegetation cover within the mudflow system of the Central Caucasus

Восстановление нарушенных участков имеет стадийный характер: сначала закрепляются единичные растения, затем формируются куртины площадью 1–10 м², после чего покрытие возрастает до 30–60%. Скорость восстановления определяется почвенными, литологическими, гидрологическими и геоморфологическими условиями. Поэтому состояние почвы и растительности можно использовать как показатель последствий селевого события, устойчивости ландшафта и вероятности повторного нарушения.

Выводы

На основании исследования установлено, что селевые процессы на Центральном Кавказе являются фактором длительной трансформации почвенно-растительного покрова. В зоне сноса преобладают разрушение почвенного профиля, удаление гумусового горизонта и снижение растительности; в зоне транзита сочетаются размыв, частичное погребение и сохранение дернины; в зоне аккумуляции формируются новые поверхности, перекрытые селевыми наносами.

После прохождения потока проективное покрытие снижается с 70–90% до 5–18%, а доля открытого минерального материала возрастает до 65–95%. В зоне сноса почва удаляется на 15–80 см, а на конусах выноса прежняя поверхность перекрывается наносами мощностью до 1,2–1,5 м. Важным признаком нарушения является снижение содержания органического вещества.

Растительность восстанавливается быстрее почвы: пионерные виды появляются через 1–3 года, травянистые пятна – через 4–8 лет, затем развивается кустарниковый ярус. Однако даже при зарастании 55–70% сообщества остаются мозаичными, а почвенный профиль сохраняет признаки нарушений значительно дольше. Для оценки последствий селей необходимо учитывать строение профиля, мощность наносов, гранулометрический состав, открытость поверхности, проективное покрытие, микрорельеф, NDVI и положение площадки относительно русла. Результаты важны для геоэкологического мониторинга, картирования селевой опасности и выбора площадок повторных наблюдений. Полное восстановление почвенного профиля может занимать 20–50 лет и более.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В. Теоретические исследования возможности использования туннельных волн для мониторинга состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.
2. Гакаев Р.А., Пуреховский А.Ж. Пространственная структура горно-лесных ландшафтов Восточного Кавказа: соотношение природных и социальных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 3. – С. 1482–1494. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1482-1494.
3. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Анализ сезонной и разногодичной динамики горных ландшафтов Северного Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 4. – С. 1090–1097. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1090-1097.
4. Поспехов Г.Б., Кутепов Ю.Ю., Кондакова В.Н. Мониторинг гидрогеомеханических процессов при складировании в отвал отходов углеобогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 99–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_99.
5. Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Лебедева Л.В. Оценка экологической реакции пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) на воздействие разных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94.
6. Толеубекова Ж.З., Тиреуов К.М., Курмангалиева З.Н., Татаринцев В.Л. Экологическая реакция сельскохозяйственных культур на условия выращивания как основа управления устойчивостью агроландшафтов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712.
7. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 86. – Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
8. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks // Mathematics. – 2024. – Vol. 12. No. 3. – Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.
9. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2025. – Vol. 17. No. 4. – pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
10. Posphehov G.B., Savon-Vaciano Yusra. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2024. – No. 12-1. – pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_1_178.
11. Yadav M., Verma M.K. Examining the role of geospatial data and AI in conducting comprehensive forestry inventories and mapping to support sustainable forest management // Advances in Geographic Information Science. – 2025. – Part F5035. – pp. 215–235. DOI: 10.1007/978-3-032-03714-5_10.
12. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2026. – Vol. 2026. No. 3. – pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.
13. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Y., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media // Geosciences. – 2024. – Vol. 14. No. 4. – Art. No. 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.

References

1. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V. Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2024. No. 4. pp. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155. (In Russ.)
2. Gakaev R.A., Purekhovskii A.G. Spatial structure of mountain-forest landscapes of the Eastern Caucasus: relationship between natural and social factors. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. No. 3. pp. 1482–1494. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1482-1494. (In Russ.)

3. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Analysis of seasonal and early dynamics of mountain landscapes of the North Caucasus. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 4. pp. 1090–1097. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1090-1097. (In Russ.)
4. Posphehov G.B., Kutepov Yu.Yu., Kondakova V.N. Monitoring of hydro-geomechanical processes in piling coal preparation refuse. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025. No. 2. pp. 99–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_99. (In Russ.)
5. Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Lebedeva L.V. Assessment of the ecological reaction of soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to the effects of various factors. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026. Vol. 18. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94. (In Russ.)
6. Toleubekova Z.Z., Tireuov K.M., Kurmangalieva Z.N., Tatarintsev V.L. Ecological response of agricultural crops to growing conditions as a basis for managing the sustainability of agricultural landscapes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 2. pp. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712. (In Russ.)
7. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
8. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. *Mathematics*. 2024. Vol. 12. No. 3. Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.
9. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
10. Posphehov G.B., Savon-Vaciano Yusmira. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 12-1. pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.
11. Yadav M., Verma M.K. Examining the role of geospatial data and AI in conducting comprehensive forestry inventories and mapping to support sustainable forest management. *Advances in Geographic Information Science*. 2025. Part F5035. pp. 215–235. DOI: 10.1007/978-3-032-03714-5_10.
12. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.
13. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Y., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. *Geosciences*. 2024. Vol. 14. No. 4. Art. No. 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.

УДК 556.512.001.572:551.508.826
DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

Оригинальная статья

Организация комплексного мониторинга заливов русловых водохранилищ Юга России с использованием данных дистанционного зондирования

И.Е. Курбатова^{1,2}, М.О. Мулин^{1,3}

¹ Институт водных проблем РАН, Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3;

² Московский государственный университет геодезии и картографии,
Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4;

³ Государственный университет по землеустройству, Россия, 105064,
г. Москва, ул. Казакова, 15, e-mail: mulin_99@mail.ru

Статья поступила: 27.03.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Русловые водохранилища Юга России на всем протяжении своего существования подвергаются значительным изменениям за счет интенсивной переработки берегов, заиливания и зарастания. Выполнение своевременной оценки степени происходящих изменений в условиях масштабной антропогенной нагрузки региона, климатической нестабильности и дефицита регулярных наземных наблюдений является важной и актуальной задачей. К числу наиболее динамичных участков берегов водохранилищ относятся заливы, образовавшиеся в результате затопления русел и долин боковых притоков главной реки подпором созданного водохранилища. Трансформация таких заливов зависит от суммарного влияния гидрологических, физических, морфологических, биологических и других доминирующих факторов. **Цель работы** заключается в обосновании и разработке структуры комплексного мониторинга современного геоэкологического состояния крупных заливов за последнее десятилетие. **Методы исследования.** В основу разрабатываемых методов положена бассейновая концепция природопользования, которая признана наиболее важным и эффективным методом территориальной организации мониторинга. Применительно к заливам водохранилищ использование этой концепции позволяет выявить взаимосвязи и взаимозависимости частей единой геосистемы «водосбор–водоток–устье–залив–приемный водоем». Особое влияние на формирование экологического состояния заливов оказывают не только разновременные и разнонаправленные колебания уровня водохранилища, но и режим и качество речного стока, характер и интенсивность антропогенной нагрузки на водосбор. Разработка содержания информационных блоков мониторинга осуществлялась с применением дистанционных и картографических методов на основе ГИС-технологий. **Результаты.** Разработана структура блоков комплексного мониторинга заливов русловых водохранилищ и апробирована методика их информационного наполнения на примере заливов Цимлянского водохранилища. В данной статье приводятся результаты исследований, выполнявшихся для Новоцимлянского залива и водосборов впадающих в него рек Цимлы и Россосы за период 2015–2025 гг. на основе совместного использования спутниковой информации, картографических материалов, ГИС-технологий, данных Донского бассейнового водного управления (БВУ) и экспертных оценок. Основным источником информации являлись многолетние данные искусственных спутников Земли (ИСЗ) Sentinel-2A, Sentinel-2B, Landsat-8,9. С помощью расчетных спектральных индексов (водных и вегетационных) получены данные о многолетних изменениях площади зеркала воды залива и динамике его зарастания. По разновременным снимкам прослежено изменение границ зон переменного подпора залива при максимальных и минимальных годовых изменениях уровня водохранилища.

Ключевые слова: геосистема «водосбор–водоток–водоем», водохранилище, спутниковый мониторинг, колебания уровня, боковые притоки, антропогенная нагрузка, изменение климата, зоны переменного подпора, картографический метод, ГИС-технологии.

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы № FMWZ–2025–0002 Государственного задания ИВП РАН.

Для цитирования: Курбатова И.Е., Мулин М.О. Организация комплексного мониторинга заливов русловых водохранилищ Юга России с использованием данных дистанционного зондирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

Original paper

Organization of comprehensive monitoring of embayments in channel reservoirs of Southern Russia using remote sensing data

I.E. Kurbatova^{1,2}, M.O. Mulin^{1,3}

¹ Water Problem Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina Str.,
Moscow 119333, Russian Federation;

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, 4 Gorokhovskiy Lane,
Moscow 105064, Russian Federation;

³ State University of Land Use Planning, 15 Kazakova Str.,
Moscow 105064, Russian Federation, e-mail: mulin_99@mail.ru

Received: 27.03.2026, revised: 10.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Channel-type reservoirs of Southern Russia have undergone substantial transformations throughout their existence as a result of intensive shoreline reworking, sedimentation, and overgrowth by aquatic and semi-aquatic vegetation. Timely assessment of the magnitude and direction of these changes under conditions of strong anthropogenic pressure, climatic instability, and a lack of regular in situ observations is a critical and highly relevant task. Among the most dynamic shoreline segments of reservoirs are bays formed by the inundation of channels and valleys of lateral tributaries of the main river due to backwater effects caused by reservoir impoundment. The transformation of such bays is governed by the combined influence of hydrological, physical, morphological, biological, and other dominant factors. **Objective.** The objective of this study is to substantiate and develop the structure of an integrated monitoring system for assessing the current geoecological condition of large reservoir bays over the past decade. **Methods.** The proposed methodology is based on the basin-oriented concept of nature management, which is recognized as one of the most effective approaches to the territorial organization of environmental monitoring. When applied to reservoir bays, this concept makes it possible to identify interconnections and interdependencies between components of the unified geosystem “catchment-main river-estuaries-reservoir”. The ecological condition of reservoir bays is strongly influenced not only by asynchronous and multidirectional water-level fluctuations of the reservoir, but also by the regime and quality of river runoff, as well as the nature and intensity of anthropogenic pressure within the catchment area. The development of the monitoring information blocks was carried out using remote sensing and cartographic methods based on GIS technologies. **Results.** A structured system of integrated monitoring blocks for bays of channel-type reservoirs was developed, and the methodology for their informational content was tested using the bays of the Tsimlyansk Reservoir as a case study. This paper presents the results of studies conducted for the Novotsimlyansky Bay and the catchments of the Tsimla and Rossosh rivers discharging into it over the

period 2015–2025. The analysis was based on the combined use of satellite imagery, cartographic materials, GIS technologies, data from the Don Basin Water Authority, and expert assessments. The primary data sources were long-term satellite observations from Sentinel-2A, Sentinel-2B, and Landsat-8/9. Calculated multispectral indices (water and vegetation indices) were used to quantify long-term changes in the bay's water surface area and the dynamics of its overgrowth. Multitemporal imagery enabled tracing changes in the boundaries of zones subject to variable backwater influence under conditions of maximum and minimum annual reservoir water-level fluctuations.

Keywords: geosystem “catchment-main river-reservoir”, reservoir, satellite monitoring, water level fluctuations, lateral inflows, anthropogenic load, climate change, variable backwater area, cartographic method, GIS technologies.

Acknowledgements: *This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ–2025–0002.*

For citation: Kurbatova I.E., Mulin M.O. Organization of comprehensive monitoring of embayments in channel reservoirs of Southern Russia using remote sensing data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

Введение

На всем протяжении многолетнего существования русловых водохранилищ происходит переформирование береговой зоны, специфика которого определяется конкретными геологическими и геоморфологическими особенностями строения ложа и берегов искусственного водоема, внутригодовыми изменениями уровня воды за счет сработки/заполнения водохранилища и многолетними климатическими флуктуациями, определяющими многоводные и маловодные длительные периоды [Авакян, 2002; Водохранилища..., 1986; Вода России..., 2001; Шинкаренко и др., 2021]. Разные участки береговой зоны водохранилищ отличаются по степени пространственной и временной изменчивости в зависимости от доминирования того или иного фактора. Наиболее чувствительны к преобразованиям заливы, которые на протяжении десятилетий испытывают сильное влияние не только со стороны водоема, но и со стороны притока (в нижнем течении которого залив сформировался) и его водосбора.

Потребность в мониторинге береговой зоны водохранилища, включая заливы, определяется условиями водопользования, землепользования, рыбоводства, предотвращения опасных природных явлений (Правила использования водных ресурсов Цимлянского водохранилища. Федеральное Агентство водных ресурсов. 02 июня 2016. 125 с.) [Матишов, Дженюк, 2006; Скрипка и др., 2017]. В условиях дефицита стационарных и эпизодичности полевых наблюдений использование спутниковых данных высокого пространственного разрешения и их расчетных преобразований является источником актуальной информации для осуществления мониторинга переформирования заливов (как сезонных, так и межгодовых), и водоохраных зон для накопления, систематизации, анализа и картографирования полученной информации на базе ГИС-технологий [Губанов, 2022; Курбатова, Мулин, 2024].

Исследования проводились на примере Новоцимлянского залива Цимлянского водохранилища. Всего в водохранилище впадает 24 притока, суммарная площадь их водосборов составляет 46 тыс. км² – 16% от общей площади водосбора Дона (рис. 2а), а суммарный объем бокового стока может достигать 1,1 км³ (около 6% всех поступлений) [Гидрометеорологический..., 1977; Научно-прикладной..., 2020]. Новоцимлянский залив является самым большим по площади среди остальных заливов.

Цель данной работы – разработать структуру комплексного спутникового мониторинга заливов как главного звена единой геосистемы «водосбор – водоток – залив – приемный водоем», выявить зону переменного подпора при разных положениях уровня водохранилища и оценить межгодовые и сезонные изменения зарастания залива влаголюбивой растительностью за 2015–2025 гг.

Материалы и методы исследования

Разработка структурных направлений комплексного геоэкологического мониторинга базировалась на бассейновом подходе, при котором водохранилище рассматривается как составная часть единой геосистемы «водосбор – водоток – устье – залив – приемный водоем», а главным звеном системы являлся залив.

Многофакторные закономерности трансформации заливов требуют особого подхода к выявлению внешних и внутренних взаимозависимостей, связанных как с вкладом бокового стока в заиление и загрязнение вод залива, так и с переформированием подводной и надводной частей его берегов в результате волновой абразии, оползневых, эрозионных и других процессов в зоне изменений уровня воды. Такой подход в условиях многолетнего дефицита наземных наблюдений реализован на основе разработанных методических рекомендаций по совместному использованию космических снимков (КС), топографических карт и ГИС-технологий [Курбатова, Мулин, 2023, 2024].

Зона переменного подпора залива является наиболее чувствительной к воздействию изменений, происходящих как на водосборе, так и в водохранилище. Основные взаимосвязи геосистемы «водосбор – река – зона переменного подпора – приемный водоем» в диапазоне изменения от НПУ до уровня мертвого объема (УМО) представлены на рисунке 1.

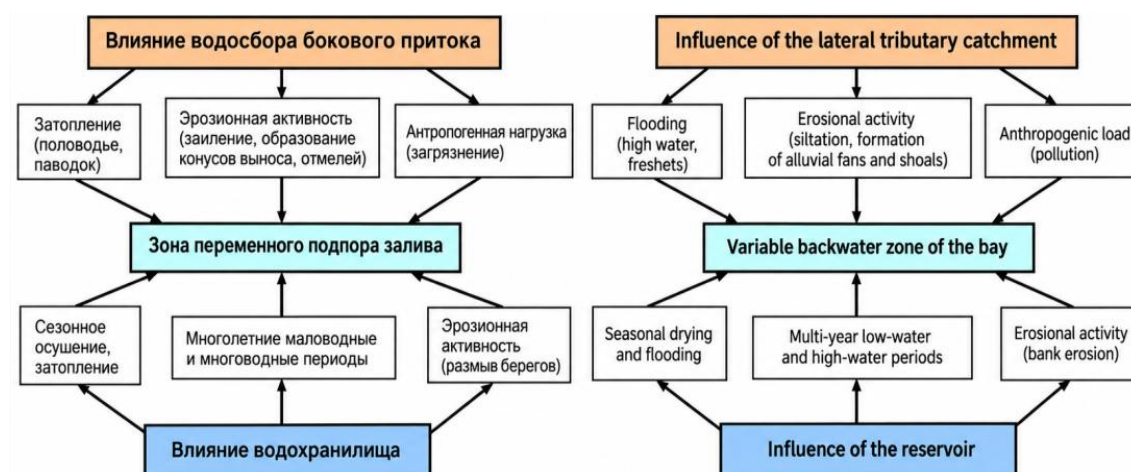


Рис. 1. Основные факторы, влияющие на трансформацию и экологическое состояние зоны переменного подпора заливов водохранилища /

Fig. 1. The main factors influencing the transformation and ecological state of the variable backwater zone of the reservoir bays

К экологически значимым факторам в зоне переменного подпора относятся разнонаправленные колебания уровня, длительность осушения/затопления, заиление или размыв мелководных участков, загрязнение (поступающее со стоком реки и водохранилища). Непредсказуемость продолжительности и интенсивности проявления этих факторов, зависящих от водности года, усиления антропогенной нагрузки на водосбор и/или водоем требует регулярных наблюдений для выявления негативных последствий.

Информационное обеспечение исследований включает:

- подбор спутниковой информации высокого разрешения за исследуемый период для: а) залива, включающий сезонные и межгодовые уровни наполнения/сработки водохранилища; б) устья притока на период половодья и межени в разные по водности годы;

- обеспечение дат спутниковой съемки данными Донского БВУ об уровне водохранилища;

– результаты преобразования мультиспектральных ДЗЗ с помощью следующих расчетных разностных индексов – модифицированного водного индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) для определения динамики площади водной поверхности и вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для изучения состояния и распределения жизненных форм растительности.

Эти индексы давно зарекомендовали свою надежность при изучении зон периодического затопления/осушения при колебаниях уровня водных объектов и выявлении связи растительного покрова с частотой затопления [Baigaliyeva et al., 2024; Li et al., 2024; Tolepbayeva et al., 2025].

Разработанная авторами концепция структуры и содержания блоков мониторинга, исходная информация для решения базовых задач и визуализация результатов представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Разработка содержания блоков комплексного мониторинга зон переменного подпора крупных заливов водохранилищ /
Development of the content of integrated monitoring units for variable back-up zones of large reservoir bays**

Блоки / Object name (Blocks)	Задачи/ Tasks	Исходная информация/ Initial information	Расчетные данные/ Calculation Data	Визуализация результатов/ Visualization of results
1	2	3	4	5
Водосбор: Физико-гео- графические условия/ Catchment: Physical and geographic char- acteristic.	Выделение границ водосбора; Построение гидрографической сети (реки, пруды, озера); Оценка рельефа и состояния почвенно-растительного покрова/ Selection of catchment area boundary; Construction of a hydrographic network (rivers, ponds, lakes); Assessment of the relief and condition of the soil and vegetation cover.	Топографические, почвенные, ландшафтные карты; Данные ДЗЗ для обновления топографических карт; цифровая модель рельефа (ЦМР) и ее производные/ Topographic, soil, and landscape maps; Remote sensing data for updating topographic maps; digital elevation model (DEM) and its derivatives.	Площадь водосбора; длины главной реки и ее притоков; Распределение высот, углов наклона; Лесистость, озерность, заболоченность, овражность/ Catchment area boundary; length of the main river and its tributaries; distribution of elevations and slopes; forest cover, lake cover, swampiness, and gully coverage.	Карты водосбора: гидрографическая сеть, гипсометрическая, углов наклона поверхности, растительности, почвенная/ Catchment area maps: hydrographic network, hypsometric data, surface slopes, vegetation, and soil data.
Антропогенная нагрузка/ Anthropogenic load.	Выявление населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных объектов, транспортной сети/ Identification of settlements, industrial and agricultural facilities, and the transportation network.	Топографические карты, материалы визуального и автоматизированного дешифрирования КС, статистические и экспертные данные/ Topographic maps, materials on visual and automated interpretation of satellite images, statistical and expert data.	Оценка демографического давления, густоты транспортной сети (с зоной загрязнения), доля пашен (с водной эрозией, без нее и зарастающих) / Assessment of population pressure, transport network density, and the proportion of arable land (with and without water erosion, and overgrown).	Карты современного состояния водосбора с оценкой сельскохозяйственных земель по степени развития эрозионных процессов/ Current watershed maps with assessment of agricultural lands based on the degree of erosion.

1	2	3	4	5
Устья притоков/ Estuaries of tributaries.	Выявление степени затопления, заиления и зарастания устьев при высоких и низких паводках, наполнении или сработке водохранилища/ Determination of the degree of flooding, siltation, and plantgrowing of estuaries during high and low floods, filling or decrease of storage reservoir.	Комплект КС за исследуемый период половодий и межени; Экспертные данные о выносах твердых взвесей речным стоком с пашен/ A set of satellite images for the studied period of floods and low water. Expert data on the outwash of suspended solid materials by river runoff from arable land.	Оценка площадей пахотных земель по степени востребованности, развитию эрозионных процессов, выносов твердых взвесей и диффузных загрязнений по экспертным данным/ Estimation of arable land area by demand, development of erosion processes, removal of suspended solids, and diffuse pollution based on expert data.	Карты динамики дельтообразования при разных отметках уровня водохранилища; Расчет вероятного поступления твердых взвесей с водосбора в залив/ Maps of delta formation dynamics at different reservoir elevations; Calculation of the probable influx of suspended solids materials and diffuse pollutants from the catchment into the bay.
Залив/ Bay.	Установление зоны переменного подпора. Контроль и слежение за изменением положения уреза воды при различных стояниях уровня водоема / Determination of a variable backwater area. Monitoring and tracking changes in the waterline at different reservoir levels.	Архив КС за выбранный период. Данные постов наблюдения БВУ об уровне водохранилища на даты съемки/ Archive of satellite images for the selected period. Data from BWM observation posts on reservoir levels as of the survey dates.	Расчетные данные индексов – водного MNDVI, вегетационного NDVI, мутяевого выноса NDTI. Определение площадей зеркала воды, зарастания и заиления залива на разные даты/ Calculated indices – aquatic MNDVI, vegetation NDVI, and turbidity removal NDTI. Determination of the water surface area, overgrowth, and siltation of the bay on various dates.	Установление зон переменного подпора в устьях притоков и берегов залива; Оценка поступления диффузных загрязнений с водосбора; Прогнозная карта затопления/осушения залива/ Determination of a variable backwater area at the estuaries of tributaries; Distribution of suspended solid materials across the bay. Predictive flooding/drainage map.

Результаты

Новоцимлянский залив образован на правом берегу глубоководного приплотинного участка водохранилища в результате затопления нижнего течения рек Цимла и Россошь (рис. 2б), совместная площадь водосборов которых составляет 2730 км². Методика формирования блока мониторинга «водосбор» рассмотрена в статье [Kurbatova et al., 2024], где с помощью ДЗЗ дана оценка современной антропогенной нагрузки на водосбор и определены в первом приближении объемы поступлений в залив диффузных загрязнений и твердых взвесей с распаханых территорий, подверженных водной эрозии.

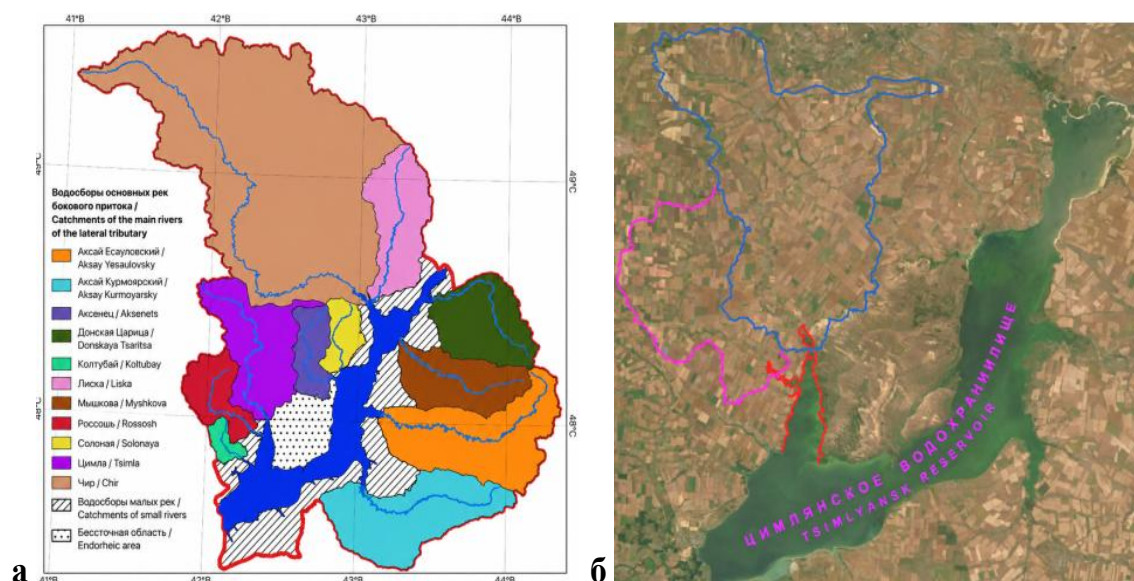


Рис. 2. Цимлянское водохранилище:

а – структура водосборов боковых притоков;

б – Новоцимлянский залив и водосборы рек Цимла и Россошь /

Fig. 2. Tsimlyansk reservoir:

a – is the structure of the catchments of the lateral tributaries;

b – is the Novotsimlyansk Bay and the catchments of the Tsimla and Rossosh rivers

Комплексный мониторинг залива проводился согласно разработанной авторами методике и охватывает период наблюдения с 2015 г. по 2025 г. Выбор этого временного диапазона обусловлен нестабильностью уровня водохранилища за счет чередования многоводных (2018, 2023, 2024 гг.) и маловодных (2015, 2020, 2021 гг.) периодов климатических флуктуаций. Выбор спутниковых изображений определялся отсутствием облачности, полнотой охвата территории и обеспеченностью данными Донского БВУ об уровне воды в водохранилище на дату съемки. Всего было выбрано 25 спектральных снимков с ИСЗ Landsat-8/9, Sentinel-2A, Sentinel-2B. Определение площади водной поверхности залива выполнялось с помощью расчетного индекса MNDWI в программе ArcGis Pro. Для построения таблиц и проведения интерполяции полученных данных использовалась программа Microsoft Excel. Индекс MNDWI считается наиболее точным при определении положения береговой линии водных объектов [Токарев, 2019; Tolerbayeva et al., 2025], поскольку обеспечивает наиболее корректное выделение водной поверхности за счет подавления спектрального вклада растительности и позволяет достаточно легко выделять границу воды и суши по снимкам в автоматическом режиме.

В статье приводятся примеры только основных этапов многолетних и сезонных колебаний уровня водохранилища в диапазоне от НПУ (36,0 м) до близкого к УМО (31,0 м). Диапазон колебаний уровня водохранилища находится в пределах 5 м, что дает возможность прогноза площади зеркала воды и осушаемых мелководий при различных колебаниях уровня между НПУ и УМО. В качестве примера приведены изображения индекса MNDWI для шести дат, отображающих минимальные, максимальные и промежуточные положения уровня воды за выбранный период (рис. 3).

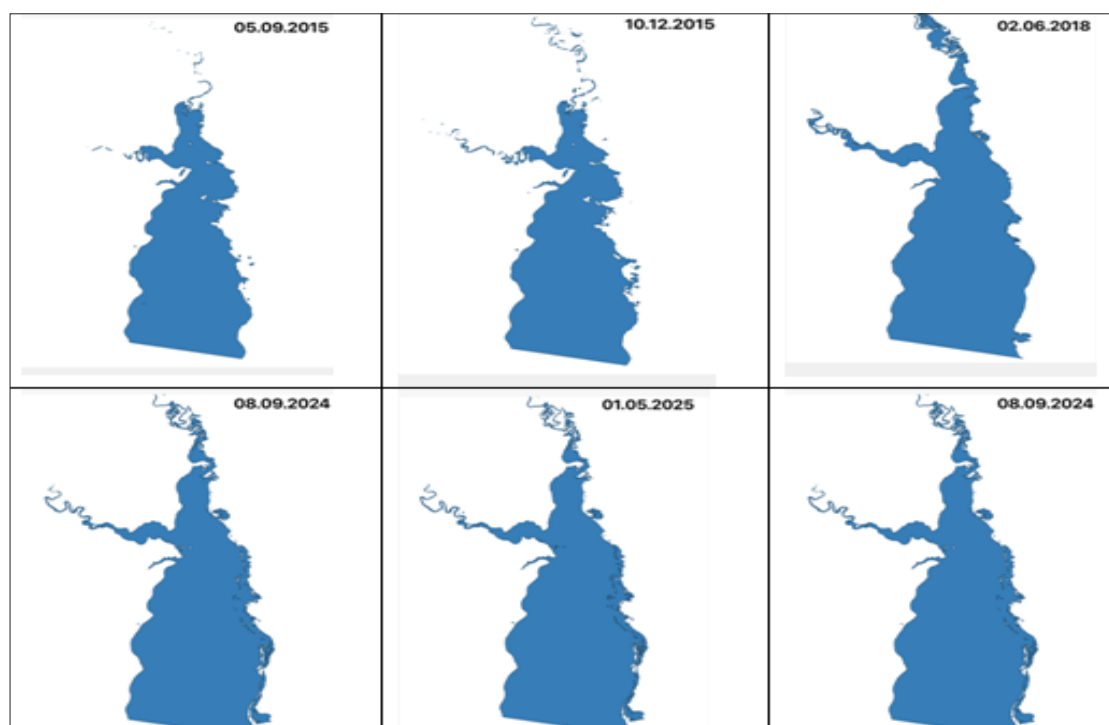


Рис. 3. Изменения площади водной поверхности залива за 2015–2025 гг. /
Fig. 3. Changes in the area of the bay's water surface 2015–2025

В таблице 2 приведены значения площади залива при разных положениях уровня. За эталон размера залива (100%) было принято его изображение на топографической карте масштаба 1:200000 (1999 г.), которое соответствует положению береговой линии при отметке уровня НПУ и составляет 132 км². Так, при низком уровне, близком к УМО, площадь водной поверхности сокращается до 66% от площади при НПУ, а при самом высоком уровне наполнения водохранилища в 2018 г. – составляет 91%. При промежуточных уровнях около 34 м абс. площадь акватории за счет глубокководности центральной и западной частей изменяется незначительно, в пределах 80–86%, что наглядно показывает сопоставление графиков колебания уровня и изменения площади водной поверхности залива (рис. 4).

Таблица 2 / Table 2

Изменение площади водной поверхности залива при максимальном, минимальном и промежуточных положениях уровня водохранилища /
Changes in the area of the water surface of the bay at maximum, minimum and intermediate positions of the reservoir level

Дата снимка/ satellite image date	05.09.2015	10.12.2015	02.06.2018	08.09.2024	01.05.2025	08.09.2025
Уровень воды, м / Water level, m	31,50	31,34	35,91	34,10	34,06	32,97
Расчеты по MNDWI / Calculations by MNDWI						
Площадь воды, км ² / Water area, km ²	86,0	87,5	120,7	113,7	86,0	87,5
Площадь воды, % / Water area, %	65,2	66,3	91,4	86,1	86,0	79,8
Площадь осушки, % / Land area, %	34,8	33,7	8,6	13,9	14,0	20,2

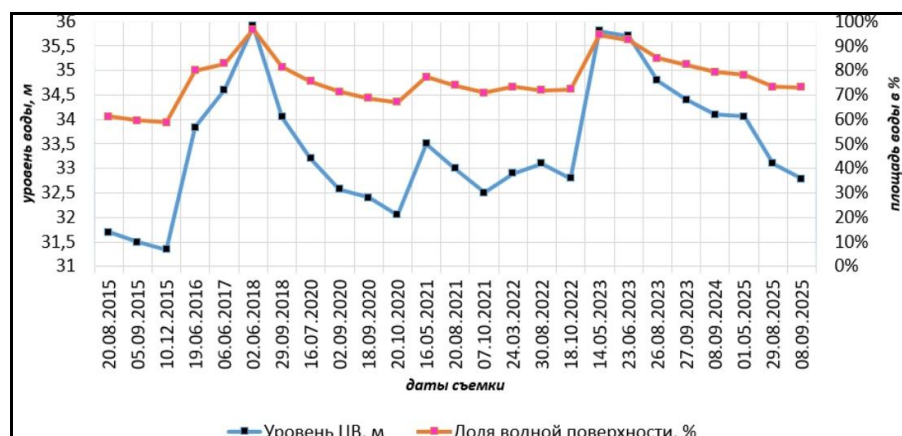


Рис. 4. Соотношение доли водной поверхности залива (в %) с уровнем Цимлянского водохранилища (м) /

Fig. 4. The ratio of the share of the water surface of the bay (%) with the level of the Tsimlyansk reservoir (m)

Наиболее подвержен изменениям мелководный восточный абразионно-аккумулятивный берег залива и его вершинный аккумулятивный участок в местах впадения рек Цимла и Россось. Вдоль приглубого западного абразионно-обвального берега перемещения границы «вода–суша» при колебаниях уровня водохранилища незначительны (рис. 5а, б).

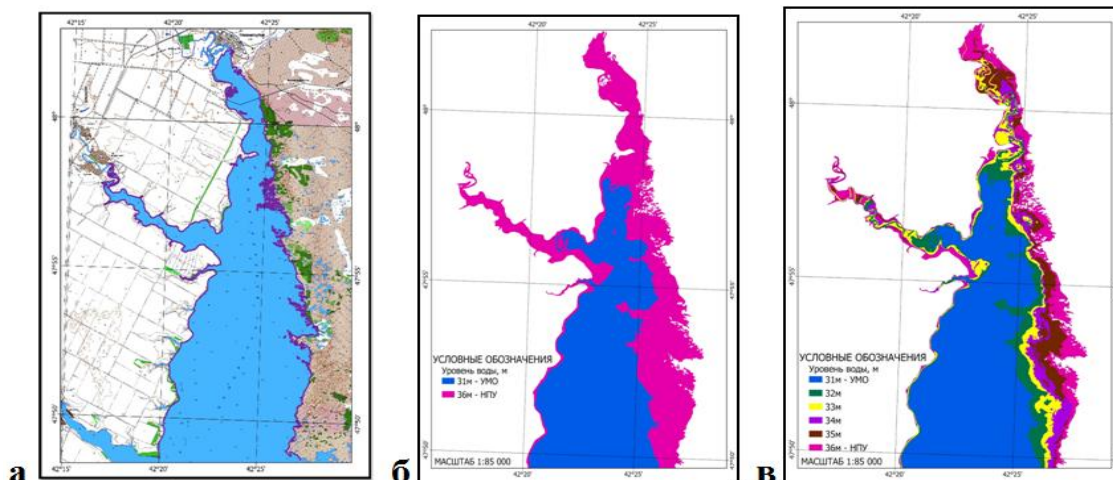


Рис. 5. Картографическая оценка изменения водной поверхности залива при разных положениях уровня водохранилища: а – при НПУ; б – при УМО (синим цветом);

в – прогнозная карта зоны затопления/осушения при изменении уровня через 1 м в диапазоне 31,0–36,0 м (зеленым 31,0–32,0; желтым 32,0–33,0; сиреневым 33,0–34,0; коричневым 34,0–35,0; фиолетовым 35,0–36,0) /

Fig. 5. Cartographic assessment of changes in the water surface of the bay at different reservoir levels: а – at RDSL; б – at RWLL (blue); в – forecast map of flooding/drying zones with water-level changes at 1 m intervals within the range of 31.0–36.0 m (green 31.0–32.0; yellow 32.0–33.0; lilac 33.0–34.0; brown 34.0–35.0; purple 35.0–36.0)

На завершающем этапе этого блока мониторинга построена картографическая модель динамики площади зеркала воды залива при изменении уровня водохранилища на 1 м для прогноза затопления или осушения береговой зоны (рис. 5в). Установлено, что при изменении уровня воды на 0,1 м площадь водного зеркала увеличивается на 1%. По данным «Справочника основных гидрологических характеристик водных объектов

бассейна реки Дон» [Научно-прикладной..., 2020] такая же зависимость наблюдается в среднем для всего Цимлянского водохранилища. Интерполяция полученных данных на конкретные даты съемки позволила определить изменения площади водного зеркала при всех возможных вариантах значений уровня воды от 31,0 м (УМО) до 36,0 м (НПУ) с шагом 1 м (рис. 5в). К примеру, при УМО доля площади водной поверхности от НПУ составляет 56,9%, то есть при обмелении залива с 36,0 м до 31,0 м площадь водного зеркала сокращается на 43,1%. При промежуточной отметке в 33,0 м площадь зеркала воды сократится на 25,6%.

Изменение уровня воды относится к экологически значимым факторам. В первую очередь осушение или затопление мелководий влияет на степень зарастания залива, состояние нерестилищ и изменение кормовой базы рыб. Однако получение натурной информации о пространственном зарастании залива является трудоемким и времязатратным процессом. Современные спутниковые снимки позволяют дистанционно осуществлять мониторинг акваторий на качественно ином уровне, дополняя и частично заменяя непосредственные полевые исследования [Кутявина и др., 2024; Кочеткова, 2019, 2018; Погорелов и др., 2017; Li et al., 2024]. Участки зарастания, особенно куртины тростника, хорошо опознаются при визуальном дешифрировании снимков в видимом диапазоне, но использование вегетационного индекса NDVI, отражающего количество фотосинтетически активной биомассы на исследуемой территории, является более эффективным и надежным способом. Для определения состояния растительного покрова сравнивают значения поглощения и отражения красных и инфракрасных лучей. NDVI помогает отличить погруженную водную растительность от чистой воды (<1). Для водной растительности значения обычно положительны (0,2–0,5), причем чем выше значение индекса, тем больше зеленой фитомассы на участке (рис. 6).

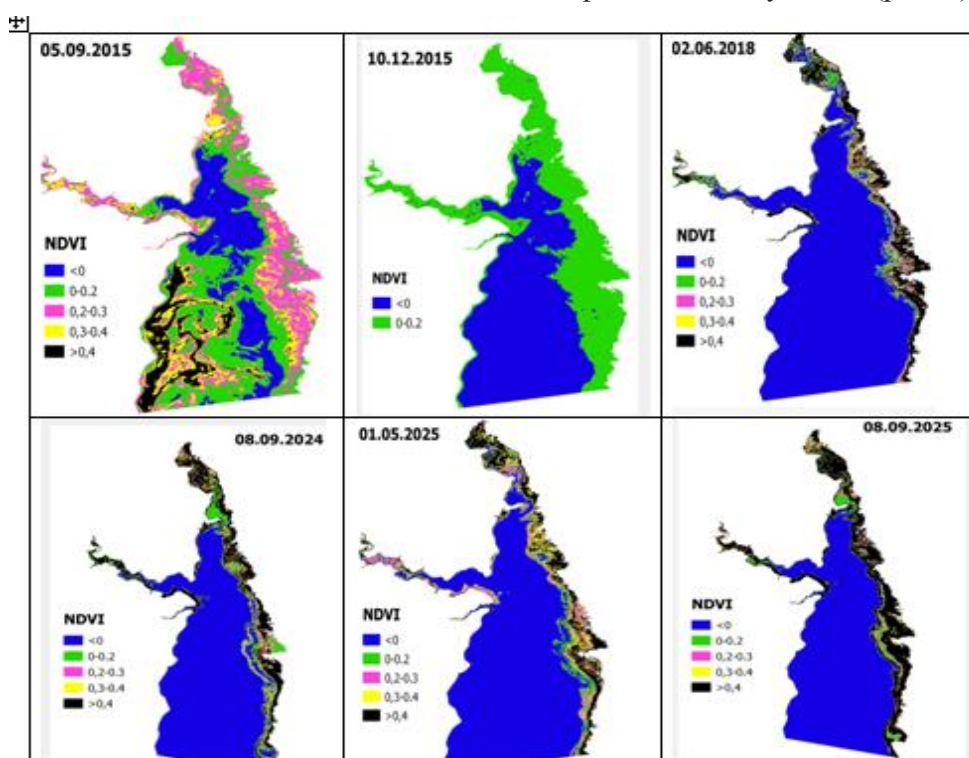


Рис. 6. Пространственно-временная изменчивость зарастания Новоцимлянского залива за 2015–2025 гг. (<0 – чистая водная поверхность; 0–0,2 – водоросли, ряска; 0,2–0,3 – разреженная ВВР; 0,3–0,4 – сплошная ВВР; $>0,4$ – околотовдная растительность) /
Fig.6. Spatiotemporal variability of overgrowth of the Novotsimlyansky Bay 2015–2025. (<0 – clean water surface; 0–0.2 – algae, duckweed; 0.2–0.3 – sparse water surface; 0.3–0.4 – continuous water surface; >0.4 – semi-aquatic vegetation)

Анализ разновременных снимков показал, что зарастание мелководий залива ВВР происходит при постепенном понижении уровня на протяжении двух или нескольких лет (маловодный период). При наступлении многоводного периода и увеличении глубин при постоянном повышении уровня наблюдается отмирание высшей водной растительности (ВВР) в зависимости от длительности и величины затопления. Полученные данные позволяют прогнозировать те или иные изменения зарастания залива для различных по водности периодов. Совместный анализ результатов визуального дешифрирования снимков с сервиса Google Earth Pro и изображений вегетационного индекса NDVI позволил выделить ареалы распространения погруженной, околотовной растительности, сплошных и разреженных куртин ВВР. Наибольшее зарастание отмечается в верхней части залива и вдоль его восточного берега, особенно в конце лета и осенью. Ситуация декабря 2015 г. отображает зафиксированную индексом NDVI единую область распространения растительности в период прекращения вегетации.

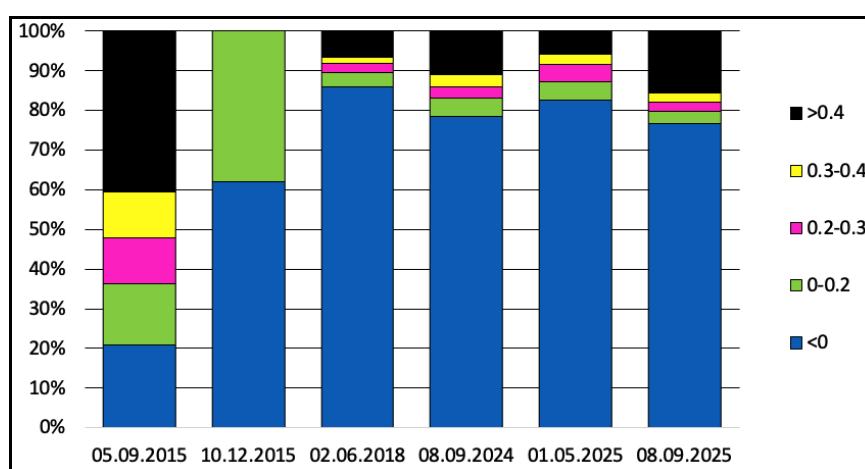


Рис. 7. Площадь и структура зарастания залива в 2015–2025 гг. /

Fig. 7. Area and structure of overgrowing of the bay 2015–2025

На рисунке 7 представлена диаграмма распределения площадей и структуры водной растительности для разных лет и сезонов. Самая большая площадь зарастания залива (80%) отмечалась в сентябре 2015 г. при уровне выше УМО лишь на 0,5 м, самая незначительная (14%) – в полноводном 2018 г. Сезонная тенденция к увеличению площадей зарастания прослеживается ежегодно, но их доля будет зависеть от климатических флуктуаций и характера водных периодов.

Выводы

– Разработанный методический подход к структурированию блоков спутникового мониторинга на основе бассейновой концепции позволяет систематизировать базовые задачи, информационное обеспечение, его обработку и визуализацию результатов. Такой подход может быть использован для любой геосистемы «водосбор – водоток – устье – залив – приемный водоем»;

– Использование спектрально-аналитических спутниковых данных и расчетных индексов MNDWI и NDVI в условиях дефицита наземных наблюдений и труднодоступности местности является ценным источником информации для изучения динамики водного зеркала залива и условий его зарастания;

– Выполнена оценка изменения площади водной поверхности залива для уровней воды на даты спутниковой съемки. За исследуемый период площадь залива менялась от 65 до 91% от площади при НПУ. Такое изменение объясняется глубинами залива 8–10 м в средней и западной его частях;

– Разработана прогнозная карта зон затопления/осушения залива, на которой показаны границы его водной поверхности при разнонаправленном изменении уровня на 1 м в диапазоне 31,0–36,0 м (УМО-НПУ);

– Получены количественные и качественные оценки зарастания берегов и устьев притоков залива водной и околоводной растительностью в зависимости от сезона и водности года.

Подобные исследования для Новоцимлянского залива проводились впервые. Разработанная методика спутникового мониторинга может быть использована для изучения многолетней трансформации аналогичных заливов других русловых водохранилищ.

Литература

1. Авакян А.Б. Многоликие водохранилища – феномен XX века. Актуальные проблемы водохранилищ. – Ярославль: ИБВВ РАН, 2002. – С. 3–6.
2. Вода России. Водоохранилища / под ред. А.М. Черняева. – ФГУП РосНИИВХ. – Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. – 700 с.
3. Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду. – М.: Наука, 1986. – 368 с.
4. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища / под ред. В.А. Знаменского, В.М. Гейтенко. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 204 с.
5. Губанов Р.С. Оценка состояния водоохранных зон Центрального Предкавказья, на примере водных объектов Красногвардейского муниципального округа Ставропольского края при помощи методов дистанционного зондирования Земли // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 3. – С. 157–169. DOI: 10.46698/VNC. 2022.95.62.011.
6. Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Баранова М.С., Фотина О.С. Михайлова Е.А., Курыкин А.А., Строганов А.В. Тенденции зарастания крупных заливов на месте устьевых областей рек Цимлянского водохранилища за период 1987–2019 гг. // Вестник Института. – 2019. – № 1(38). – С. 149–151. DOI: 10.24411/2071-7830-2019-10042.
7. Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Калужная И.Ю., Сиротина С.Л., Самотеева В.В., Ракшенко Е.П. Динамика зарастания Цимлянского водохранилища // Принципы экологии. – 2018. – № 1. – С. 60–72. DOI: 10.15393/j1.art.2018.7202.
8. Курбатова И.Е., Мулин М.О. Оценка геоэкологического состояния водосборов боковых притоков Цимлянского водохранилища (на примере р. Россосшь) // Труды IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». Т. 1. – Пермь: ПГУ, 2023. – С. 265–269.
9. Курбатова И.Е., Мулин М.О. Опыт разработки картографической оценки влияния водосборов на русловые водохранилища юга России с использованием ГИС-технологий // Материалы 9-ой Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в геологии, геофизике и географии–2024». – М.: Перо, 2024. – С. 74–76.
10. Кутявина Т.И., Рутман В.В. Ашихмина Т.Я. Оценка динамики зарастания высшими водными растениями акватории эвтрофного водохранилища с использованием спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21. № 1. – С. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299–307.
11. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л. Концепция экосистемного мониторинга аридных зон юга России // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России: сборник научных статей / отв. ред. Г.Г. Матишов. – Ростов-н/Д: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 17–34.
12. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон. – СПб.: Свое издательство, 2020. – 262 с.
13. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник. – 2017. – № 1(40). – С. 130–137.
14. Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. Современные береговые процессы Цимлянского водохранилища // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2017. – Т. 1. № 2. – С. 308–311.
15. Токарев А.В. Спектральные индексы растительности и воды // Современные проблемы ДЗЗ. – 2019. – Т. 16. № 2. – С. 45–56.

16. Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А. Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. № 1. – С. 248–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254.
17. Baigaliyeva M., Atakhanova Z., Kairat A. Spatiotemporal variations in urban wetlands in Kazakhstan: a case of the Taldykol lake system in Astana city // Sustainability. – 2024. – Vol. 16(16). – Art. No. 7077. DOI: 10.3390/su16167077.
18. Kurbatova I.E., Mulin M.O., Shirokova V.A. Assessment of diffuse runoff formation using geoinformation technologies // Water Resources. – 2024. – Vol. 51. (Suppl 2). – pp. S262–S272. DOI: 10.1134/S0097807824605053.
19. Li S., Cheng L., Chang L., Fu C., Guo Z., Liu P. Multi-factor weighted image fusion method for high spatiotemporal tracking of reservoir drawdown area and its vegetation dynamics // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2024. – Vol. 129. – Art. No. 103855. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103855.
20. Tolepbayeva A., Abiyeva D., Karagulova R., Tanbayeva A., Sharapkhanova Z. Identification of small lakes in Kazakhstan using remote sensing data // Journal of the Geographical Institute “Jovan Cvijic” SASA. – 2025. – Vol. 75. No. 2. – DOI: 10.2298/IJGI241025005T.

References

1. Avakyan A.B. The many-faced reservoirs – a phenomenon of the 20th century. Actual problems of reservoirs. Yaroslavl. IBVV RAS. 2002. pp. 3–6. (In Russ.)
2. Water of Russia. Reservoirs. Ed. by A.M. Chernyaev. RRIWR. Yekaterinburg. AQUA-PRESS. 2001. 700 p. (In Russ.)
3. Reservoirs and their impact on the environment. Moscow. Nauka. 1986. 368 p. (In Russ.)
4. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Tsimlyansk, watershed and Manych reservoirs. Eds. V.A. Znamensky, V.M. Geitenko. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1977. 204 p. (In Russ.)
5. Gubanov R.S. Assessment of the state of water protection zones of the Central Caucasus, on the example of water bodies of the Krasnogvardeysky Municipal District of the Stavropol Territory using remote sensing methods of the Earth. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 157–169. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011. (In Russ.)
6. Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S., Baranova M.S., Fotina O.S., Mikhailova E.A., Kurykin A.A., Stroganov A.V. Trends in overgrowth of large bays formed at the river-mouth areas of the Tsimlyansk Reservoir during 1987–2019. *Bulletin of the Institute*. 2019. No. 1(38). pp. 149–151. DOI: 10.24411/2071-7830-2019-10042. (In Russ.)
7. Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S., Kalyuzhnaya I.Yu., Sirotina S.L., Samoteeva V.V., Rakshenko E.P. Dynamics of overgrowth of the Tsimlyansk Reservoir. *Principles of Ecology*. 2018. No. 1. pp. 60–72. DOI: 10.15393/j1.art.2018.7202. (In Russ.)
8. Kurbatova I.E., Mulin M.O. Assessment of the geoecological state of the catchments of lateral tributaries of the Tsimlyansk Reservoir (on the example of the Rossosh River). In: *Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation “Modern Problems of Reservoirs and Their Catchments”*. Vol. 1. Perm. PGU. 2023. pp. 265–269. (In Russ.)
9. Kurbatova I.E., Mulin M.O. Experience in developing a cartographic assessment of the impact of catchments on channel reservoirs in Southern Russia using GIS technologies. In: *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Innovations in Geology, Geophysics and Geography–2024”*. Moscow. Pero. 2024. pp. 74–76. (In Russ.)
10. Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Assessment of the dynamics of overgrowth by higher aquatic vegetation in the water area of a eutrophic reservoir using satellite images. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2024. Vol. 21. No. 1. pp. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307. (In Russ.)
11. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L. The concept of ecosystem monitoring of arid zones in Southern Russia. In: *Modern Problems of Arid and Semi-Arid Ecosystems of Southern Russia: Collection of Scientific Articles*. Ed. by G.G. Matishov. Rostov-on-Don. Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2006. pp. 17–34. (In Russ.)
12. Scientific and applied reference book: Basic hydrological characteristics of water bodies in the Don River basin. Saint Petersburg. Svoe Izdatelstvo. 2020. 262 p. (In Russ.)

13. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S. Satellite monitoring of the Krasnodar Reservoir. *Geographical Bulletin*. 2017. No. 1(40). pp. 130–137. (In Russ.)
14. Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bepalova L.A. Modern coastal processes of the Tsimlyansk Reservoir. *Ecology. Economy. Informatics. Series: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems*. 2017. Vol. 1. No. 2. pp. 308–311. (In Russ.)
15. Tokarev A.V. Spectral indices of vegetation and water. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019. Vol. 16. No. 2. pp. 45–56. (In Russ.)
16. Shinkarenko S.S., Solodovnikov D.A., Bartalev S.A. Hydrological situation at reservoirs in the south of the European part of Russia in 2020. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2021. Vol. 18. No. 1. pp. 248–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254. (In Russ.)
17. Baigaliyeva M., Atakhanova Z., Kairat A. Spatiotemporal variations in urban wetlands in Kazakhstan: a case of the Taldykol lake system in Astana city. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(16). Art. No. 7077. DOI: 10.3390/su16167077.
18. Kurbatova I.E., Mulin M.O., Shirokova V.A. Assessment of diffuse runoff formation using geoinformation technologies. *Water Resources*. 2024. Vol. 51. Suppl. 2. pp. S262–S272. DOI: 10.1134/S0097807824605053.
19. Li S., Cheng L., Chang L., Fu C., Guo Z., Liu P. Multi-factor weighted image fusion method for high spatiotemporal tracking of reservoir drawdown area and its vegetation dynamics. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 129. Art. No. 103855. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103855.
20. Tolepbayeva A., Abiyeva D., Karagulova R., Tanbayeva A., Sharapkhanova Z. Identification of Small Lakes in Kazakhstan Using Remote Sensing Data. *Journal of the Geographical Institute “Jovan Cvijic” SASA*. 2025. Vol. 75. No. 2. DOI: 10.2298/IJGI241025005T.

УДК 556.114.6

DOI: 10.46698/VNC.2026.42.32.001

Оригинальная статья

Современное состояние вод р. Камбилеевки и её притоков

Н.В. Реутова[✉], Т.В. Реутова[✉], Ф.Р. Дреева[✉], А.М. Хутуев[✉]

Кабардино-Балкарский научный центр РАН,
Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2,
e-mail: reutova371@mail.ru

Статья поступила: 03.06.2026, доработана: 11.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Горная промышленность является самой высокоотходной отраслью. В результате деятельности комбинатов по обогащению цветных металлов накоплены миллионы тонн хвостов обогащения, которые привели к значительному загрязнению прилегающих территорий, в том числе и поверхностных вод. **Целью** данной работы является оценка современного состояния поверхностных вод бассейна р. Камбилеевки по содержанию потенциально токсичных элементов и соединений азота и фосфора. **Материалы и методы.** Был проведен сравнительный анализ уровней загрязнения поверхностных вод р. Камбилеевки (Республика Северная Осетия-Алания) и её притоков во время работы ОАО «Электроцинк» (2004–2018 гг.) и через 7 лет после его закрытия. Исследование современного состояния поверхностных вод было проведено в 2025 г. Отбор проб производили в период летнего паводка. Концентрации Al, As, Cu, Mn, Mo, Pb и Zn в растворённой форме определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с электротермической атомизацией на приборе МГА-915. Концентрации нитритов, аммония и фосфатов определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-104Т». **Результаты работы.** В период работы предприятия концентрации меди, марганца, кадмия и молибдена в р. Камбилеевке в основном варьировали в пределах 3–5,5 ПДК для водоёмов рыбохозяйственного назначения. Через 7 лет после закрытия ОАО «Электроцинк» концентрации этих металлов не превышают ПДК. Концентрации цинка остались повышенными до 6 ПДК. До закрытия завода регистрировались высокие концентрации цинка до 11–19 ПДК. В р. Собачья балка снижение концентраций потенциально токсичных элементов проявилось в значительно большей степени. Концентрации кадмия и молибдена снизились в 5 раз, марганца и меди – в 10–12 раз. Концентрации цинка остались на прежнем уровне 6 ПДК (если не учитывать 2007 и 2013 гг.). В настоящее время повышенные концентрации цинка соответствуют уровню природного загрязнения и объясняются наличием геохимических аномалий в данном регионе, что подтверждается составом вод, не испытывающих антропогенной нагрузки. В р. Камбилеевке содержание аммония и фосфатов снизилось, а нитритов осталось высоким (8,4 ПДК). В р. Собачья балка остался повышенный уровень загрязнения нитритами, аммонием и фосфатами. Таким образом, закрытие ОАО «Электроцинк» привело к снижению концентраций тяжелых металлов до уровня природного загрязнения. Загрязнение соединениями азота и фосфатами осталось высоким, что говорит об ином источнике их поступления.

Ключевые слова: поверхностные воды, потенциально токсичные элементы, ОАО «Электроцинк», р. Камбилеевка.

Для цитирования: Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М. Современное состояние вод р. Камбилеевки и её притоков. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.42.32.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.42.32.001

Original paper

The current status of the Kambileyevka River and its tributaries

N.V. Reutova^{ORCID}, T.V. Reutova^{ORCID}, F.R. Dreeva^{ORCID}, A.M. Khutuev^{ORCID}

Kabardino-Balkar Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
2 Balkarova Str., Nalchik 360000, Russian Federation,
e-mail: reutova371@mail.ru

Received: 03.06.2026, revised: 11.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Mining is the most waste-intensive industry. As a result of the activities of non-ferrous metal processing plants, millions of tons of wastes have accumulated, which have led to significant pollution of adjacent territories, including surface waters. **The aim** of this work is to assess the current state of the surface waters of the Kambileyevka River basin in terms of the content of potentially toxic elements and nitrogen and phosphorus compounds. **Materials and methods.** A comparative analysis of the surface waters pollution of the Kambileyevka River (Republic of North Ossetia-Alania) and its tributaries was carried out during the operation of “Electrozink” (2004–2018) and 7 years after its closure. The study of the current state of surface waters was conducted in 2025. Concentrations of Al, As, Cu, Mn, Mo, Pb, and Zn were determined using atomic absorption spectrometry (AAS). The concentrations of nitrites, ammonium, and phosphates were determined by capillary electrophoresis. **Results.** During the period of operation of the enterprise, concentrations of copper, manganese, cadmium and molybdenum in the Kambileyevka River varied within 3–5.5 MAC_{fish}. 7 years after the closure of the enterprise, the concentrations of these metals do not exceed the maximum permissible concentration. Zinc concentrations remained elevated to 6 MAC_{fish}. During the operation of the plant, high concentrations of zinc were recorded up to 11–19 MAC_{fish}. In the Sobachya Balka River, a decrease in concentrations of potentially toxic elements was manifested much greater. Concentrations of cadmium and molybdenum decreased by 5 times, manganese and copper by 10–12 times. Zinc concentrations remained the same 6 MAC_{fish} (excluding 2007 and 2013). Currently, the increased zinc concentrations correspond to the level of natural pollution and are explained by the presence of geochemical anomalies in the region. In the Kambileyevka River, the content of ammonium and phosphates decreased, while nitrites remained high (8.4 MAC_{fish}). There is an increased level of pollution with nitrites, ammonium and phosphates in the Sobachya Balka River. Thus, the closure of “Electrozink” led to a decrease in heavy metal concentrations to the level of natural pollution. Ion pollution remained high, which indicates another source of their intake.

Keywords: surface waters, potentially toxic elements, ElectroZink, Kambileyevka River.

For citation: Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. The current status of the Kambileyevka River and its tributaries. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.42.32.001

Введение

Горная промышленность является самой высокоотходной отраслью. В результате деятельности комбинатов по обогащению цветных металлов накоплены миллионы тонн хвостов обогащения, которые привели к значительному загрязнению прилегающих территорий, в том числе и поверхностных вод [Simion et al., 2019]. Вопросы устойчивого восстановления этих территорий привлекают пристальное внимание во всем мире [Braun et al., 2021; Hellweg et al., 2023; Yuanyuan et al., 2026].

Центральный Кавказ не является исключением. В верховьях бассейна р. Терек в г. Владикавказе расположены предприятия по переработке сырья цветных металлов.

В результате их деятельности р. Камбилеевка оказалась наиболее загрязненной рекой в бассейне Терека. Основным загрязнителем реки является приток Собачья балка, в который попадают стоки предприятий г. Владикавказа, расположенных в северо-восточной части города. Основными источниками загрязнения вод являлись: ОАО «Электроцинк», осуществлявший переработку цинкового и свинцового сырья с производством товарного свинца, кадмия, цинка и серной кислоты; ОАО «Победит», который производит продукцию из вольфрама и молибдена [Гаджиев и др., 2015]. «Электроцинк» начал свою работу в 1902 году. По данным В. Х. Дзапарова (2009), в результате деятельности этих предприятий в черте города скопилось более 3 млн т отходов, в составе которых содержится более 300 т ртути, 8 тыс. т мышьяка, по 25 тыс. т меди и свинца и 50 тыс. т цинка. Годовой объем сточных вод составлял 10000 тыс. м³, из которых проходили очистку только 1500 тыс. т. Очистка производилась известковым молоком в отстойниках.

В «Государственном докладе о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году» [Государственный доклад..., 2009] отмечалось, что реки Камбилеевка и Собачья балка наряду с реками Баксан и Малка являются основными загрязнителями р. Терек.

ОАО «Электроцинк», который являлся основным источником поступления в реку Собачья балка тяжелых металлов, прекратил свою деятельность в 2018 году. Целью данной работы является оценка современного состояния поверхностных вод бассейна р. Камбилеевки по содержанию потенциально токсичных элементов (ПТЭ) и соединений азота и фосфора.

Материалы и методы

Описание места исследования

Река Камбилеевка является правым притоком р. Терек и впадает в него на 428-м км от устья в районе с. Карджин. Длина реки 103 км. Она берет свое начало на северном склоне Скалистого хребта на высоте 1850 м. Питание реки в основном формируется за счет подземных вод и дополняется атмосферными осадками. Площадь водосбора составляет 954 км², средняя высота водосбора – 990 м. Бассейн реки расположен на северном склоне Скалистого и передовых хребтов, Северо-Осетинской равнине и южном склоне Сунженского хребта [Панов и др., 2015].

В бассейне р. Камбилеевки расположен целый ряд промышленных предприятий: предприятия цветной металлургии, металлообработки, строительно-технологические, приборостроения, электронной промышленности и транспорта [Цгоев, Амбалов, 2020].

Методика исследования

Отбор проб производили в период летнего паводка в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 в 2025 г. Поскольку определяли только растворенную форму ПТЭ, все пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Консервацию проб для определения Al, As, Cu, Mn, Mo, Pb и Zn осуществляли азотной кислотой (ОСЧ) из расчета 0,5% в соответствии с ГОСТ Р 57162-2016. Транспортировку и хранение проб осуществляли при температуре 2–5 °С.

Концентрации ионов определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-104Т». Содержание остальных элементов определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе МГА-915.

На рисунке 1 приведена карта-схема расположения пунктов отбора проб. Для сравнения приведены данные по составу поверхностных вод р. Терек на территории г. Владикавказа (№ 1). № 2 – верховья р. Камбилеевки до г. Владикавказа; № 3 – р. Камбилеевка до впадения р. Собачья балка; № 4 – р. Камбилеевка в районе устья; № 5 и 6 – р. Собачья балка на территории г. Владикавказа и устье соответственно; № 7 – р. Жеко. Номера проб на рисунке 1 и в таблицах совпадают.

	Собачья балка Sobachya Balka	425	4	2,6	68	2,3	9,4	160
	ПДК _{рыбхоз} / MAC _{fish} *	40	50	1	10	1	6	10
	ПДК _{питьев.} / MAC _{drink}	500	10	1000	100	250	30	50

<ПО – ниже предела определения / – below the definition limit

«–» – данные отсутствуют / no data available

Алюминий – самый распространенный металл в земной коре. Он является необходимым элементом для всех живых организмов. Но в то же время это один из токсичных элементов, вызывающих целый ряд заболеваний человека [Шугалей и др., 2012; Rondeau et al., 2009]. Концентрации алюминия во всех обследуемых водотоках невысокие и в основном не превышают ПДК. Они уменьшаются вниз по течению рек Камбилеевка и Собачья балка.

Мышьяк считается одним из наиболее токсичных элементов для человека и может вызывать как канцерогенные, так и неканцерогенные заболевания. Высокие концентрации мышьяка в питьевой воде (≥ 50 мкг/л) являются причиной возникновения рака легких, печени, почек, мочевого пузыря и кожи [Saint-Jacques et al., 2014; Goswami et al., 2020; Middleton et al., 2020]. Повышенными концентрациями мышьяка отличается р. Собачья балка, а также р. Камбилеевка после впадения в нее р. Жеко. Самая высокая концентрация мышьяка отмечена в этой реке и, по-видимому, имеет природное происхождение [Reutova et al., 2023].

В настоящее время во всех изученных водотоках содержание меди находится в пределах ПДК_{рыбхоз}. Только в р. Собачья балка на территории города концентрация марганца составила 2 ПДК_{рыбхоз}. В остальных изученных реках она не превышает ПДК. Концентрации молибдена и свинца не превышают допустимых значений. Только концентрации цинка составляют 6–9 ПДК_{рыбхоз}, но это характерно для региона верховий р. Терек, где расположено большое количество свинцово-цинковых месторождений [Письменный, 2021]. Это обуславливает наличие геохимических аномалий, что отражается на составе поверхностных вод. Таким образом, в настоящее время концентрации ПТЭ в реках Камбилеевке, Собачьей балке и Тереке на территории города в основном не превышают ПДК для водоёмов рыбохозяйственного назначения. Исключение составляют только концентрации цинка во всех изученных реках и концентрация марганца в р. Собачьей балке на территории г. Владикавказа.

Данные, приведённые в работе И.Д. Алборова и соавторов (2023), значительно выше наших результатов, полученных в 2025 году.

Мы провели сравнительный анализ состояния вод рек Камбилеевки и Собачьей балки в период с 2004 по 2024 годы с использованием доступных данных Министерства природных ресурсов и экологии Республики Северная Осетия-Алания. В основном имеющиеся данные относятся ко времени работы ОАО «Электроцинк» (2004–2018 гг.). В Государственных докладах «О состоянии и об охране окружающей среды и природных ресурсов Республики Северная Осетия – Алания» за 2004–2024 годы приведены данные по кадмию, меди, марганцу, молибдену и цинку, а также разрозненные данные по нитритному азоту, аммонии и фосфатам.

На рисунке 2 приведены диаграммы по содержанию металлов в р. Камбилеевке после впадения р. Собачьей балки и в р. Собачьей балке. Поскольку в «Государственных докладах Министерства природных ресурсов и экологии Республики Северная Осетия-Алания» данные приведены в виде кратности превышения предельно допустимых концентраций, на рисунке 2 по оси ординат приведена кратность превышения ПДК_{рыбхоз}. За 2023 год приведены данные из работы И.Д. Алборова и соавторов (2023), за 2025 год – собственные данные.

Как видно из рисунка 2, за изучаемый период концентрации меди в р. Камбилеевке практически не изменялись. В основном они варьировали в пределах 3,5–5 ПДК, что соответствует 3,5–5 мкг/дм³. В 2025 году содержание меди в воде р. Камбилеевки после впадения р. Собачьей балки составило 2,2 ПДК (табл. 1).

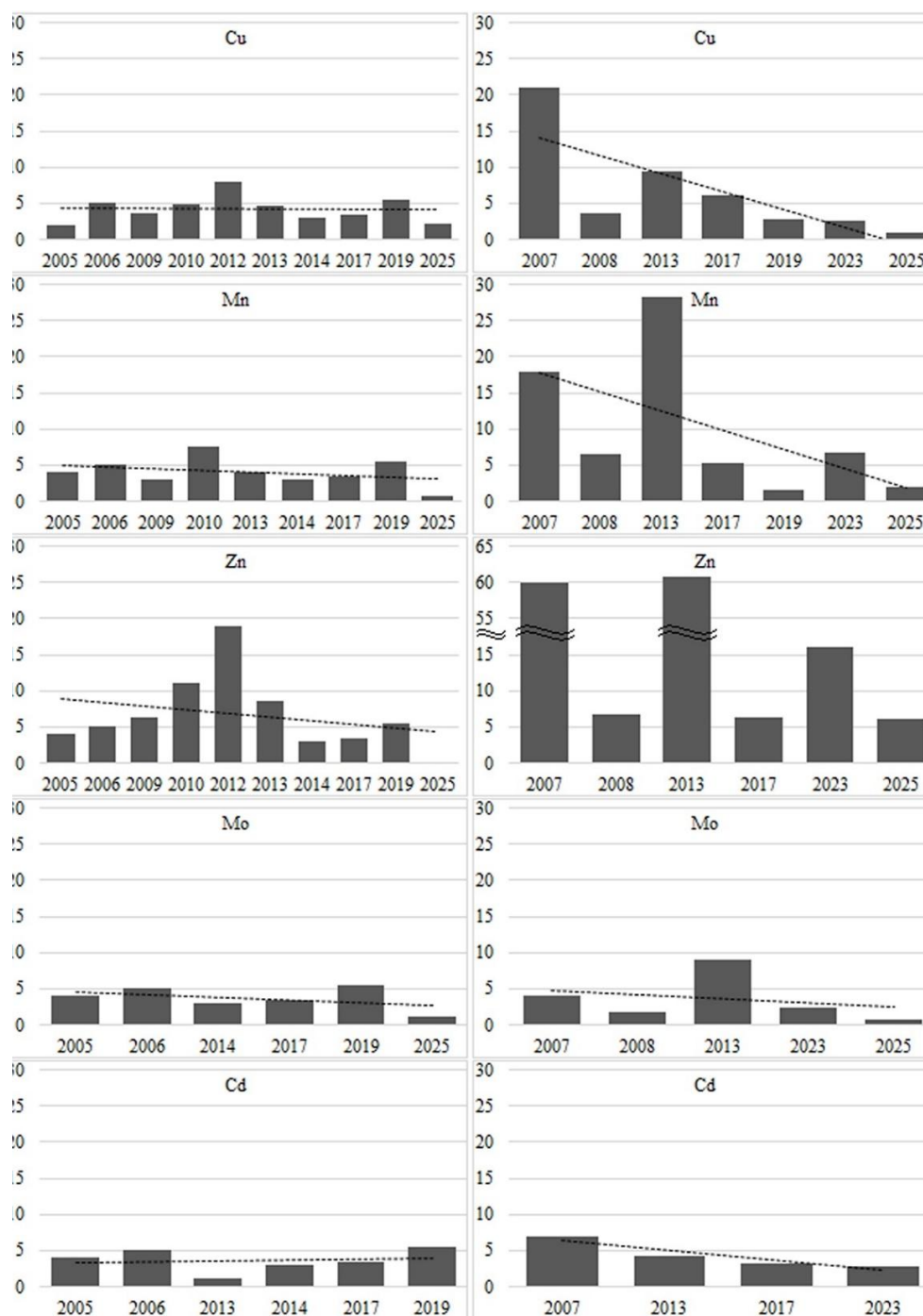


Рис. 2. Концентрации тяжелых металлов в р. Камбилеевке после впадения р. Собачьей балки (слева) и р. Собачья балка на территории г. Владикавказа (справа) /

Fig. 2. Heavy metals concentrations in the Kambileyevka river after the confluence of the Sobagya Balka River (left) and the Sobachya Balka River on the territory of Vladikavkaz (right)

Концентрации марганца в этом створе в среднем также составляли 3–5 ПДК, что соответствует 30–50 мкг/дм³. В отдельные годы отмечались высокие концентрации. Так, в 2010 году концентрация марганца составляла 76 мкг/дм³, а в 2019 году (после прекращения работы «Электроцинк») – 54 мкг/дм³. В 2025 году марганца было только 7,8 мкг/дм³. Концентрации цинка в основном изменялись от 50 до 80 мкг/дм³ с очень высокими значениями 190 мкг/дм³ в 2012 году и 110 мкг/дм³ в 2010 году. В 2025 г. содержание цинка было ниже предела определения. Концентрации молибдена составляли 3–5 мкг/дм³, а в 2025 году снизились до 1,1 мкг/дм³. Содержание кадмия было высоким и колебалось от 3 до 5,4 ПДК, что соответствует 15–25 мкг/дм³.

Особенно высокие концентрации отмечены в 2019 году (27 мкг/дм³), уже после закрытия «Электроцинк». В настоящее время имеющиеся концентрации кадмия значительно ниже ПДК_{рыбхоз.} (5 мкг/дм³). Таким образом, в р. Камбилеевке до 2018 года концентрации Cd, Cu, Mn, Mo и Zn в основном оставались неизменными и колебались в пределах 3–5 ПДК. В 2025 году все они не превышали ПДК и соответствовали уровню природного загрязнения (р. Жеко). Только по меди и цинку составили 2,2 ПДК и 6 ПДК соответственно.

В р. Собачьей балке снижение концентраций потенциально токсичных элементов проявилось в значительно большей степени. Концентрации меди были сравнимы с её содержанием в р. Камбилеевке. Только в 2007 году зафиксирована очень высокая концентрация 21 мкг/дм³. В настоящее время и в черте города, и в устье концентрации этого элемента соответствуют ПДК (табл. 1). Содержание марганца было очень переменным. В 2007 г. концентрации достигали 180 мкг/дм³, а в 2013 г. – 283 мкг/дм³. В настоящее время в черте города концентрация марганца остается повышенной (20,5 мкг/дм³), а в устье снизилась до 5,5 мкг/дм³. Концентрации цинка в 2007 и 2013 годах были очень высокими и достигали 600 мкг/дм³. В остальные годы были на том же уровне, что и сейчас – 6 ПДК, что соответствует 60 мкг/дм³. По данным Д.И. Алборова и соавторов (2023), содержание цинка в р. Собачьей балке было 160 мкг/дм³. Концентрация молибдена в 2013 году достигала 9 мкг/дм³. В остальные годы концентрация варьировала в пределах 2 мкг/дм³, сейчас она ниже ПДК. Концентрации кадмия в 2007 г. составили 35 мкг/дм³, в 2013 и 2017 гг. – 21 и 16 мкг/дм³ соответственно. По данным [Алборов и др., 2023] в 2023 г. содержание кадмия составило 14 мкг/дм³. Следовательно, состояние р. Собачьей балки значительно улучшилось после закрытия ОАО «Электроцинк».

Таким образом, в период работы предприятия концентрации меди, марганца, кадмия и молибдена в р. Камбилеевке в основном варьировали в пределах 3–5,5 ПДК для водоёмов рыбохозяйственного назначения. Через 7 лет после закрытия ОАО «Электроцинк» концентрации этих металлов не превышают ПДК. Концентрации цинка остались повышенными до 6 ПДК, что объясняется наличием природных аномалий в данном районе [Письменный и др., 2021]. Это соответствует природному уровню загрязнения ряда рек РСО-Алания [Реутова и др., 2025]. В период работы комбината регистрировались высокие концентрации цинка до 11–19 ПДК. В р. Собачьей балке снижение концентраций потенциально токсичных элементов проявилось в значительно большей степени. Концентрации кадмия и молибдена снизились в 5 раз, марганца и меди – в 10–12 раз. Концентрации цинка остались на прежнем уровне 6 ПДК (если не учитывать 2007 и 2013 гг.).

Литературные данные по содержанию соединений азота и фосфора в водах рр. Камбилеевки и Собачьей балки очень разрозненны. В таблице 2 приведены имеющиеся данные за период работы «Электроцинк» и наши данные за 2025 г.

Таблица 2 / Table 2

**Содержание соединений азота и фосфора мг/дм³ в поверхностных водах
(превышение ПДК) /
Nitrogen and phosphorus compounds mg/dm³ in surface waters (exceeding MAC_{fish})**

№	Река (расстояние от истока, км) / River (distance from source, km)	Год / Year	Азот нитритный / Nitrite nitrogen	Аммоний солевой / Ammonium salt	Фосфаты / Phosphates
1	Камбилеевка после впадения р. Собачьей балки/ Kambileyevka after the confluence of the Sobachya Balka River	2004	0,06 (3)	-	-
2		2009	—	1,4 (2,8)	—
3		2010	0,034 (1,7)	—	0,345 (2,3)
4		2012	0,266мг/л (13,3)	—	
5		2013	—	0,8 (1,6)	0,42 (2,8)
6		2017	—	1,7 (3,4)	—
7	Собачья балка / Sobachya Balka	2013	—	1,85 (3,9)	0,81 (5,4)
№	Река (расстояние от истока, км) / River (distance from source, km)	Год / Year	Нитриты / Nitrite	Аммоний солевой / Ammonium salt	Фосфаты / Phosphates
1	Терек (99,1) / Terek	2025	<ПО	0,10	<ПО
2	Камбилеевка (14,8) / Kambileyevka	2025	0,05	0,51	<ПО
3	Камбилеевка (34,9) / Kambileyevka	2025	0,08	0,08	0,02
4	Камбилеевка (96,8) / Kambileyevka	2025	0,67 (8,4)	0,40	Следы
5	Собачья балка (1,2) / Sobachya Balka	2025	0,34 (4,25)	2,0 (4,0)	0,10
6	Собачья балка (7,4) / Sobachya Balka	2025	<ПО	0,23	0,08
7	Жеко (4,7) / Zheko	2025	<ПО	0,03	<ПО
	ПДК _{рыбхоз.} / MAC _{fish}		0,08(0,02 азот / nitrogen)	0,5(0,4 азот/ nitrogen)	0,15(0,05 фосфор / phosphorus)

<ПО – ниже предела определения / < – below the definition limit

«–» – данные отсутствуют / no data available

В настоящее время реки Камбилеевка и Собачья балка остаются значительно загрязненными нитритами и аммонием. Наблюдается и наличие фосфатов, хотя и ниже ПДК. Если сравнивать современные данные с уровнем загрязнения поверхностных вод до закрытия предприятия «Электроцинк», то следует отметить, что в р. Камбилеевке ниже впадения р. Собачьей балки содержание нитритов повысилось до уровня более 8 ПДК. По данным Госдоклада Министерства природных ресурсов и экологии Республики Северная Осетия-Алания за 2012 год, такая высокая концентрация была зафиксирована однократно в 2012 году. Концентрации аммония снизились. До 2018 года они составляли примерно 2 ПДК, в 2025 году во всех створах р. Камбилеевки были ниже ПДК. Концентрации фосфатов также снизились. Если до 2018 года они колебались в пределах 2,3–5,4 ПДК, то в настоящее время не превышают ПДК. В р. Собачьей балке концентрации нитритов и аммония остались на прежнем уровне. Таким образом, уровень загрязнения рек Камбилеевки и Собачьей балки ионами металлов не изменился, а по содержанию нитритов даже ухудшился после закрытия ОАО «Электроцинк». Следовательно, загрязнение поверхностных вод соединениями азота и фосфора не было связано с деятельностью этого предприятия.

Заключение

При проведении сравнительного анализа было выявлено, что в р. Камбилеевке концентрации меди, марганца и молибдена снизились в 2, 4–7 и 3–5 раз соответственно. В настоящее время они не превышают ПДК. Концентрации цинка остались на прежнем уровне (6 ПДК), что соответствует уровню природного загрязнения в данном регионе. В р. Собачьей балке снижение концентраций потенциально токсичных элементов произошло в значительно большей степени. Концентрации кадмия и молибдена снизились в 5 раз, марганца и меди – в 10–12 раз. Концентрации цинка остались на прежнем уровне 6 ПДК (если не учитывать 2007 и 2013 гг.). В р. Камбилеевке содержание аммония и фосфатов снизилось, а нитритов осталось высоким (8,4 ПДК). В р. Собачьей балке остался повышенный уровень загрязнения нитритами, аммонием и фосфатами. Таким образом, закрытие ОАО «Электроцинк» привело к снижению концентраций тяжелых металлов в исследуемых водах до уровня природного загрязнения. Загрязнение соединениями азота и фосфора осталось высоким, что говорит об ином источнике их поступления. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Литература

1. Алборов И.Д., Тедеева Ф.Г., Вернигор В.В. Экологическое оздоровление бассейна реки Терек – основа рекреационной привлекательности и роста благосостояния населения // Вестник МАНЭБ. – 2023. – Т. 28. № 4. – С. 64–71.
2. Гаджиев, М.К., Зербалиев А.М., Омаргаджиева З.М. Экологическое состояние водных объектов Бассейна реки Терек // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Бассейн реки Терек: проблемы регулирования, восстановления и реабилитации водных объектов» / отв. ред. Э.В. Запороженко. – Махачкала, Нальчик, Пятигорск: Севкавказпроводхоз, 2015. – С. 41–49.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году» // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2011. – № 3(39). – С. 14–19.
4. Дзапаров, В. Х. Угроза безопасности жизнедеятельности региона РСО–Алания // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2009. – № 3(27). – С. 75–76.
5. Панов В.Д., Базельюк А.А., Лурье П.М. Река Терек. Гидрография и режим стока. – Ростов н/Д: Донской издательский дом, 2015. – 606 с.
6. Письменный А.Н. Горбачев С.А. Вертий С.Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 200 000 Издание второе. Серия Кавказская. Лист К-38-IX,XV (Владикавказ) Объяснительная записка. – М.: ВСЕГЕИ, – 2021. 224 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. Цгоев Т.Ф., Амбалов В.Б. Экологическое состояние малых рек на примере РСО–Алания // Национальная Ассоциация Ученых. – 2020. – Т. 58. № 3(58). – С. 24–27. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.3.58.284.
9. Шугалей И.В., Гарабаджиу А.В., Илюшин М.А., Судариков А.М. Некоторые аспекты влияния алюминия и его соединений на живые организмы // Экологическая химия. – 2012. – Т. 21. № 3. – С. 172–186.
10. Braun A.B., Visentin C., William Da Silva Trentin A., Thome A. List of relevant sustainability indicators in remediation processes and their validation by stakeholders // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 317. – Art. No. 128440. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128440.
11. Goswami R., Kumar M., Biyani N., Shea P.J. Arsenic exposure and perception of health risk due to groundwater contamination in Majuli (river island), Assam, India // Environmental Geochemistry and Health. – 2020. – Vol. 42. – pp. 443–460. DOI: 10.1007/s10653-019-00373-9.
12. Hellweg S., Benetto E., Huijbregts M.A.J., Verones F., Wood R. Life-cycle assessment to guide solutions for the triple planetary crisis // The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2023. – Vol. 4. – pp. 471–486. DOI: 10.1038/s43017-023-00449-2.

13. Middleton D.R.S., McCormack V.A., Watts M.J., Schuz J. Environmental geochemistry and cancer: a pertinent global health problem requiring interdisciplinary collaboration // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2020. – Vol. 42. – pp. 1047–1056. DOI: 10.1007/s10653-019-00303-9(0123).

14. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Arsenic in surface waters in the Central Part of The North Caucasus and correspondent health risk assessment // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2023 – Vol. 4. No. 16. – pp. 52–62. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-2748.

15. Rondeau V., Jacqmin-Gadda H., Commenges D., Helmer C., Dartigues J.-F. Aluminum and Silica in drinking water and the risk of alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID Cohort // *American Journal of Epidemiology*. – 2009. – Vol. 169. No. 4. – pp. 489–496. DOI: 10.1093/aje/kwn348.

16. Saint-Jacques N., Parker L., Brown P., Dummer T.J.B. Arsenic in drinking water and urinary tract cancers: a systematic review of 30 years of epidemiological evidence // *Environmental Health*. – 2014. – Vol. 13. No. 44. DOI: 10.1186/1476-069X-13-44.

17. Simion A.F., Drebenstedt C., Lazar M. The Influence of tailings storage facilities in the eastern part of Jiu valley on the water quality // *Mining Science and Technology (Russia)*. – 2019. – Vol. 4. No. 4. – pp. 292–301. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-292-301.

18. Yuanyuan L., Haihui F., Zhuo Z., Fang X., Shunyang W., Guanlin G., Kening W. Quantitative sustainability assessment and application of remediation technologies for heavy metal-contaminated sites based on multi-criteria decision-making method // *Environmental Technology and Innovation*. – 2026. – Vol. 42. – Art. No. 104860. DOI: 10.1016/j.eti.2026.104860.

References

1. Alborov I.D., Tedeeva F.G., Vernigor V.V. Ecological improvement of the Terek River basin is the basis for recreational attractiveness and population well-being growth. *MANEB Bulletin*. 2023. Vol. 28. No. 4. pp. 64–71. (In Russ.)

2. Gadzhiev, M.K., Zerbaliyev A.M., Omargadzhieva Z.M. Ecological status of water bodies in the Terek River Basin. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Terek River basin: problems of regulation, restoration and rehabilitation of water bodies”*. Ed. E.V. Zaporozhchenko. Makhachkala, Nalchik, Pyatigorsk. Sevkvagiprovodkhoz. 2015. pp. 41–49. (In Russ.)

3. The State Report “On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2009”. Water treatment. Water treatment. Water supply. 2011. No. 3(39). pp. 14–19. (In Russ.)

4. Dzaparov, V.H. The threat to the safety of life in the region of North Ossetia-Alania. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2009. No. 3(27). pp. 75–76. (In Russ.)

5. Panov V.D., Bazelyuk A.A., Lurye P.M. The Terek River. Hydrography and flow regime. Rostov-on-Don. Donskoy Publishing House. 2015. 606 p. (In Russ.)

6. Pys'menny A.N., Gorbachev S.A. Verty S.N. et al. State Geological Map of the Russian Federation scale 1 : 200 000. Second edition. Series Caucasian. Sheet K-38-IX,XV (Vladikavkaz). Explanatory note. Moscow. VSEGEI. 2021. 224 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. Tsgoev T. F., Ambalov V.B. The ecological state of small rivers on the example of North Ossetia-Alania. *National Association of Scientists*. 2020. No. 58-3(58). pp. 24–27. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.3.58.284. (In Russ.)

9. Shugalei V., Garabadzhiu A.V., Ilyushin M.A., Sudarikov A.M. Some aspects of effect of aluminium and its compounds on living organisms. *Environmental Chemistry*. 2012. No. 21(3). pp. 172–186. (In Russ.)

10. Braun A.B., Visentin C., William Da Silva Trentin A., Thome A. List of relevant sustainability indicators in remediation processes and their validation by stakeholders. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 317. Art. No. 128440. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128440.

11. Goswami R., Kumar M., Biyani N., Shea P.J. Arsenic exposure and perception of health risk due to groundwater contamination in Majuli (river island), Assam, India. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. Vol. 42. pp. 443–460. DOI: 10.1007/s10653-019-00373-9.

12. Hellweg S., Benetto E., Huijbregts M.A.J., Verones F., Wood R. Life-cycle assessment to guide solutions for the triple planetary crisis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2023. Vol. 4. pp. 471–486. DOI: 10.1038/s43017-023-00449-2.
13. Middleton D.R.S., McCormack V.A., Watts M.J., Schuz J. Environmental geochemistry and cancer: a pertinent global health problem requiring interdisciplinary collaboration. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. Vol. 42. pp. 1047–1056. DOI: 10.1007/s10653-019-00303-9(0123).
14. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Arsenic in surface waters in the Central Part of The North Caucasus and correspondent health risk assessment. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023 Vol. 4. No. 16. pp. 52–62. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-2748.
15. Rondeau V., Jacqmin-Gadda H., Commenges D., Helmer C., Dartigues J.-F. Aluminum and Silica in drinking water and the risk of alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID Cohort. *American Journal of Epidemiology*. 2009. Vol. 169. No. 4. pp. 489–496. DOI: 10.1093/aje/kwn348.
16. Saint-Jacques N., Parker L., Brown P., Dummer T.JB. Arsenic in drinking water and urinary tract cancers: a systematic review of 30 years of epidemiological evidence. *Environmental Health*. 2014. Vol. 13. No. 44. DOI: 10.1186/1476-069X-13-44.
17. Simion A.F., Drebenstedt C., Lazar M. The Influence of tailings storage facilities in the eastern part of Jiu valley on the water quality. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2019. Vol. 4. No. 4. pp. 292–301. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-292-301.
18. Yuanyuan L., Haihui F., Zhuo Z., Fang X., Shunyang W., Guanlin G., Kening W. Quantitative sustainability assessment and application of remediation technologies for heavy metal-contaminated sites based on multi-criteria decision-making method. *Environmental Technology and Innovation*. 2026. Vol. 42. Art. No. 104860. DOI: 10.1016/j.eti.2026.104860.

УДК 574.4:630:551.5:519.6

DOI: 10.46698/VNC.2026.12.55.001

Оригинальная статья

Межгодовая и сезонная изменчивость углеродного обмена широколиственного леса Северного Кавказа по результатам биогеохимического моделирования

Е.В. Фокеев¹, О.Э. Суховеева², А.В. Ольчев^{1,3}, И.А. Керимов³

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1;

² Институт географии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29;

³ Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100, e-mail: ibragim_kerimov@mail.ru

Статья поступила: 23.02.2026, доработана: 14.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Леса Северного Кавказа обладают значительным потенциалом поглощения диоксида углерода (CO_2), однако их углеродный баланс и устойчивость к климатическим аномалиям, особенно в горных районах с высокой ландшафтной неоднородностью, изучены недостаточно. **Целью исследования** является оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 и определение влияния температурного режима и условий увлажнения на углеродный баланс широколиственного леса предгорной зоны Северного Кавказа. **Методы исследования.** Расчеты выполнены с использованием биогеохимической модели Forest-DNDC для эталонного участка «Рошни-Чу» карбонового полигона Чеченской Республики за 2005–2025 гг. В качестве входных параметров использованы данные региональных ландшафтных исследований и реанализа ERA5. **Результаты.** Выявлена высокая межгодовая и сезонная изменчивость потоков CO_2 и чувствительность углеродного баланса к температурному и гидрологическому режимам. В благоприятные по увлажнению годы экосистема поглощала до 2000–2500 кг С/га в год, тогда как в жаркие и засушливые периоды становилась источником CO_2 с эмиссией до 200–400 кг С/га. Межгодовая изменчивость нетто экосистемного обмена (NEE) преимущественно определялась изменениями валовой первичной продукции (GPP) и гетеротрофного дыхания почвы (Rh), тогда как автотрофное дыхание (Ra) характеризовалось большей инерционностью. В условиях летней засушливости снижение GPP опережало уменьшение экосистемного дыхания (RE), что приводило к ослаблению поглощения CO_2 . Полученные результаты указывают на уязвимость углеродного баланса широколиственных лесов Северного Кавказа к дальнейшему потеплению и увеличению повторяемости климатических аномалий.

Ключевые слова: Forest-DNDC, углеродный баланс, потоки диоксида углерода, температурно-влажностные условия, климатические изменения.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации темы госзадания ГГНТУ имени академика М.Д. Миллионщикова, FZNU-2024-0002.

Для цитирования: Фокеев Е.В., Суховеева О.Э., Ольчев А.В., Керимов И.А. Межгодовая и сезонная изменчивость углеродного обмена широколиственного леса Северного Кавказа по результатам биогеохимического моделирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.12.55.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.12.55.001

Original paper

Interannual and seasonal variability in the carbon cycle of a broadleaf forest in the North Caucasus, based on biogeochemical modeling results

E.V. Fokeev¹, O.E. Sukhoveeva², A.V. Olchev^{1,3}, I.A. Kerimov³

¹ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow
119991, Russian Federation;

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetnyi Lane, Moscow
119017, Russian Federation;

³ Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: ibragim_kerimov@mail.ru

Received: 23.02.2026, revised: 14.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The forests of the North Caucasus have significant potential for carbon dioxide (CO₂) absorption. However, their carbon balance and resilience to climatic anomalies, especially in mountainous areas with high landscape heterogeneity, have not yet been thoroughly investigated. This study **aims** to evaluate the spatiotemporal variability of CO₂ fluxes and determine how temperature and moisture conditions influence the carbon balance of a broadleaf forest in the North Caucasus foothills. **Methods.** Calculations were performed using the Forest-DNDC biogeochemical model for the “Roshni-Chu” reference plot in the Chechen Republic’s carbon supersite from 2005 to 2025. Data from regional landscape studies and the ERA5 reanalysis were used as input parameters. **Results.** The study revealed high interannual and seasonal variability in CO₂ fluxes, as well as the sensitivity of the carbon balance to temperature and hydrological conditions. In years with favorable moisture conditions, the ecosystem absorbed 2000–2500 kg C/ha/year. During hot and dry periods, however, it released CO₂ into the atmosphere at rates of up to 200–400 kg C/ha/year. Interannual variability in net ecosystem exchange (NEE) was primarily determined by changes in gross primary production (GPP) and soil heterotrophic respiration (R_h). Autotrophic respiration (R_a), however, was characterized by greater inertia. Under summer drought conditions, the decline in GPP preceded the decrease in ecosystem respiration (RE), leading to a reduction in CO₂ uptake. These results suggest that the carbon balance of broadleaf forests in the North Caucasus is highly sensitive to further warming and an increase in the frequency of climate anomalies.

Keywords: Forest-DNDC, carbon balance, carbon dioxide fluxes, temperature and moisture conditions, climate change.

Acknowledgements: *The work was supported by the State Assignment of the Grozny State Oil Technical University (Project Reg. No. FZNU-2024-0002).*

For citation: Fokeev E.V., Sukhoveeva O.E., Olchev A.V., Kerimov I.A. Interannual and seasonal variability in the carbon cycle of a broadleaf forest in the North Caucasus, based on biogeochemical modeling results. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.12.55.001

Введение

Лесные экосистемы Северного Кавказа представляют собой уникальный природный комплекс, характеризующийся высоким биоразнообразием, сложной пространственной структурой и ярко выраженной ландшафтной неоднородностью. В условиях современных климатических изменений роль лесов существенно возрастает с учетом их высокого потенциала поглощения антропогенных выбросов диоксида углерода (CO_2) и других парниковых газов [Olchev, 2025]. По современным оценкам леса ежегодно поглощают около $3,5 \pm 0,4$ ПгС, что составляет порядка 30% суммарных антропогенных выбросов CO_2 [Friedlingstein et al., 2025; Pan et al., 2024]. Вместе с тем выраженная пространственная неоднородность лесных экосистем и существенные различия в их поглотительной способности, включая слабо изученные горные регионы, остаются одним из основных источников неопределенности при оценке региональных потоков парниковых газов.

Современные оценки динамики приземной температуры для значительной части Северного Кавказа указывают на их существенное превышение среднемировых значений температурных изменений [Serykh et al., 2025]. Подобные климатические сдвиги способны приводить к заметным изменениям структуры углеродного баланса лесных экосистем, включая соотношение процессов фотосинтеза растений, автотрофного и гетеротрофного дыхания. Такие изменения могут существенно варьировать даже в пределах относительно небольших территорий, что требует проведения комплексных исследований, объединяющих полевые наблюдения и компьютерное моделирование. Решение подобных задач является одним из ключевых направлений функционирования созданной в Российской Федерации сети карбоновых полигонов [Карбоновые полигоны..., 2025].

Именно для решения данного круга задач предгорья Большого Кавказа на протяжении последних лет являются объектом интенсивных экспериментальных и модельных исследований [Мухартова и др., 2023; Керимов и др., 2024]. Однако, несмотря на значительный объем накопленных экспериментальных данных, в условиях сложного рельефа, высокой мозаичности растительного покрова и ограниченных возможностей применения традиционных измерительных методов для потоков парниковых газов, задача комплексной оценки углеродного баланса горных лесов остается достаточно актуальной. Ограниченная пространственная репрезентативность наземных наблюдений существенно затрудняет экстраполяцию полученных локальных данных на региональный уровень.

В этих условиях наиболее перспективным подходом к решению данной задачи является интеграция результатов полевых наблюдений, данных дистанционного зондирования и численного моделирования, позволяющая совместить детальность локальных измерений с пространственным охватом дистанционного зондирования и модельных расчетов [Bastos et al., 2020]. Такой подход обеспечивает возможность количественной оценки потоков парниковых газов в различных временных и пространственных масштабах, включая районы с ограниченной сетью регулярных мониторинговых наблюдений, что особенно важно для горных регионов с высокой ландшафтной неоднородностью [Olchev, 2025].

Для описания углеродного баланса и потоков парниковых газов в настоящее время разработан широкий спектр математических моделей, различающихся по уровню детализации биофизических процессов в растительности и почве, временной динамике и пространственному охвату. Глобальные биогеохимические модели, такие как Biome-BGC, ORCHIDEE и LPJ [White et al., 2000; Sitch et al., 2003; Krinner et al., 2005], эффективно применяются для оценки континентальных и глобальных потоков парниковых газов, однако их использование в горных ландшафтах требует тщательной региональной калибровки и верификации [Thum et al., 2019; Adams et al., 2017]. В свою очередь, процесс-ориентированные модели экосистемного уровня, включая DNDC и Forest-DNDC [Li et al., 1992, 2000], позволяют детально описывать временную и про-

пространственную изменчивость углеродного баланса на локальном уровне и учитывать сложное взаимодействие климатических факторов, растительности и почв, включая отклик углеродного обмена на экстремальные погодные условия. Это делает данный тип моделей особенно перспективным для исследований в регионах со сложными природными условиями и высоким биоразнообразием, характерными для горных территорий [Gilhespy et al., 2014], а также для выполнения регионально ориентированных оценок чувствительности углеродного баланса к климатическим аномалиям.

В этом контексте актуальность настоящего исследования определяется необходимостью количественной оценки углеродного баланса широколиственных лесов Северного Кавказа, включая экосистемы с участием дикорастущих плодовых видов, параметры углеродного обмена которых до настоящего времени изучены крайне недостаточно. Особое значение имеет анализ реакции таких лесов на климатические аномалии, включая периоды засух, аномальной жары, интенсивных и продолжительных осадков [Reichstein et al., 2013], а также оценка их потенциального вклада в достижение целей национальной климатической политики Российской Федерации [Карбоновые полигоны..., 2025].

Целью настоящей работы является исследование пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 в широколиственном лесу на основе численного моделирования, а также оценка влияния аномалий температуры и осадков на компоненты углеродного баланса лесных экосистем Северного Кавказа. Научная новизна исследования заключается в проведении модельного исследования для большого временного интервала (2005–2025 гг.) с целью анализа реакции углеродного обмена широколиственных лесов, включая сообщества с участием дикорастущих плодовых пород, на экстремальные климатические условия (температура, осадки) различной направленности. Полученные результаты могут служить основой для оценки секвестрационного потенциала региональных лесов и разработки рекомендаций по их рациональному использованию в условиях меняющегося климата.

Методы и материалы

Моделирование углеродного обмена лесной экосистемы

Для оценки годовых и сезонных изменений потоков CO_2 в исследовании использована динамическая биогеохимическая модель Forest-DNDC (Forest DeNitrification-DeComposition), специально разработанная для моделирования углеродного обмена в лесных экосистемах. Эта модель относится к классу процесс-ориентированных и основана на описании фундаментальных биофизических и биогеохимических процессов, регулирующих процессы углеродного обмена между растительностью, почвой и атмосферой [Li et al., 2000]. Выбор данной модели обусловлен ее высокой эффективностью в воспроизведении углеродного цикла лесных экосистем в условиях умеренного климата и возможностью детального описания влияния климатических факторов на процессы фотосинтеза, дыхания и разложения органического вещества [Gilhespy et al., 2014].

Модель Forest-DNDC построена по модульному принципу (рис. 1) и включает четыре тесно взаимосвязанных блока: климатический, гидрологический, лесной растительности и почвенно-биогеохимический. Климатический блок использует ежедневные данные о температуре воздуха и количестве осадков для расчета температуры почвы и ее влагосодержания, которые определяют интенсивность фотосинтеза и дыхания растений, а также микробного разложения органического вещества в почве. Гидрологический блок описывает движение и перераспределение воды в экосистеме и определяет процессы испарения и водный режим почвы через решение уравнения водного баланса, включающего инфильтрацию, капиллярный подъем влаги и испарение. Лесная или фенологическая подмодель описывает рост и развитие растительных сообществ, их сезонную динамику и круговорот углерода, включая фенологические процессы, фотосинтез и дыхание растений. Почвенно-биогеохимический блок отвечает за процессы трансформации органи-

ческого вещества, распределение углерода между различными пулами, азотный цикл и оценку эмиссии парниковых газов с поверхности почвы. Углеродный баланс экосистемы, включая нетто-экосистемный обмен (NEE), рассчитывается с учетом всей совокупности атмосферных, почвенных факторов и свойств растительного покрова.

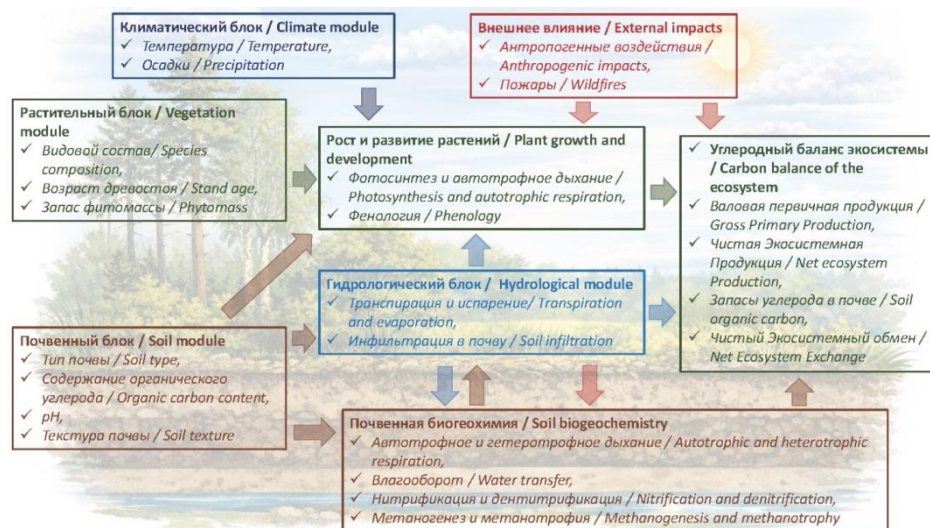


Рис. 1. Схема модели Forest-DNDC [Li et al., 2000] /
Fig. 1. Schematic diagram of the Forest-DNDC model [Li et al., 2000]

Район исследований и входные параметры

Объектом исследования послужил экспериментальный участок «Рошни-Чу» Карбонового полигона Чеченской Республики, расположенный в предгорной зоне Северного Кавказа (43.05° с.ш., 45.43° в.д.) (рис. 2). Климат района исследований умеренно континентальный с четко выраженными сезонами. Средняя температура января составляет $+2.0 \pm 1.0$ °C, средняя температура июля – $+22.5 \pm 1.5$ °C; годовое количество осадков – 400 ± 30 -50 мм [Керимов и др., 2021].



Рис. 2. Географическое положение модельного участка Рошни-Чу и фотография древесного полога. Карта построена с использованием спутниковых данных на платформе Google Earth /
Fig. 2. Geographic location of the Roshni-Chu experimental site. The map was created using satellite imagery from the Google Earth platform

Исследуемая территория имеет площадь 243 га и представляет собой переходный тип от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-лугово-кустарниковому подтипу. Территория характеризуется среднерасчлененным рельефом с перепадом высот от 418 до 550 м над уровнем моря. Геологическое строение представлено преимущественно песчано-глинистыми, сланцевыми и известняковыми отложениями палеоген-неогенового возраста.

Высокая пространственная неоднородность рельефа и почвенного покрова может обуславливать различия в влагообеспеченности, радиационном режиме и интенсивности почвенных процессов на отдельных участках территории, однако в настоящем исследовании эти различия не рассматривались как самостоятельные факторы межгодовой изменчивости NEE.

Для модельных расчетов потоков CO_2 между исследуемым лесным участком и атмосферой был выбран период 2005–2025 гг. Расчеты проводились с суточным шагом по времени.

Климатические данные, включали суточные значения максимальной и минимальной температуры воздуха, а также количества осадков из данных реанализа ERA-5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>).

Для интегральной характеристики температурно-влажностных условий использовался гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК). ГТК рассчитывался как отношение суммы атмосферных осадков к сумме положительных температур воздуха за период со среднесуточной температурой выше 10°C , умноженной на коэффициент 0,1. В работе применялись как годовые, так и среднемесячные значения ГТК. Годовые оценки использовались для анализа межгодовой изменчивости нетто-экосистемного обмена CO_2 , тогда как месячные значения ГТК применялись при интерпретации сезонной динамики потоков CO_2 и выявлении периодов температурного и водного стресса на протяжении вегетационного периода. Использование ГТК позволило интегрально оценить совместное влияние теплового и водного режимов на эмиссию и поглощение CO_2 в экосистеме.

Характеристики почвенного покрова были получены на основе полевых исследований и литературных данных. Для территории участка карбонового полигона «Рошни-Чу» характерны кислые почвы с pH 3,9–4,4 и низким содержанием гумуса (от 0,6 до 4,8%). Запас органического углерода в почве (SOC) для подстилки и нижележащих слоев (0–50 см) был принят равным 80000 кг С/га (по данным Научно-исследовательского центра «Цифровая почвенно-агроэкологическая карта России», <https://soil-db.ru/>). Гранулометрический состав почв характеризуется низким содержанием глинистой фракции (до 10%), плотность почвы варьирует в пределах 0,7–0,9 г/см³.

Структура и состав древостоя были определены на основе данных дистанционного зондирования с БПЛА и лесотаксационных исследований. Преобладающим видом в древостое является дуб кавказский, на который приходится около 60% общей биомассы. Широко распространен бук восточный, занимающий около 25% площади. Суммарная биомасса древесины для проведения модельных расчетов была принята равной 120 000 кгС/га; распределение биомассы по компонентам (стволы, ветви, листья, корни) выполнено в соответствии с аллометрическими соотношениями для широколиственных пород деревьев, принятыми в модели Forest-DNDC [Zhang et al., 2017]. Почвенный покров участка отличается сильной пространственной неоднородностью и представлен преимущественно горнолесными бурыми почвами, местами с признаками оподзоливания [Керимов и др., 2021].

Результаты

Годовая динамика потоков CO_2

Смоделированная годовая динамика NEE для широколиственного леса на участке «Рошни-Чу» (2005–2025 гг.) демонстрирует выраженную межгодовую изменчивость (рис. 3), связанную с различиями температурно-влажностных условий.

В большую часть исследуемого периода экосистема в модельных расчетах функционировала как поглотитель CO_2 (преобладание отрицательных значений NEE), при этом средние годовые значения NEE находились преимущественно в диапазоне от -500 до -1000 кг С/(га год). Максимальное поглощение достигало около -2500 и -2000 кг С/(га год) в 2009 и 2016 гг. соответственно, когда валовая первичная продукция (GPP) превышала экосистемное дыхание (RE).

В 2022 году NEE достиг положительных значений (до $+400$ кг С/(га год)), что соответствует превышению модельных значений RE над GPP. Таким образом, в этом году годовой углеродный баланс сместился от нетто-поглощения к чистой эмиссии CO_2 .

После 2017 г. в модельном ряду увеличилась повторяемость лет с ослабленным поглощением CO_2 , а в отдельные годы NEE принимал положительные значения. Эта особенность совпадает с повышением температурного фона и изменениями условий увлажнения, наблюдаемыми в рассматриваемый период.

Сопоставление межгодовой динамики NEE с метеорологическими параметрами (рис. 3) показывает, что годы максимального поглощения CO_2 , включая 2009 и 2016 гг., характеризовались более благоприятными условиями увлажнения и повышенными значениями ГТК. Напротив, в годы с повышенным температурным фоном и ограниченной влагообеспеченностью поглощение CO_2 ослаблялось, а в отдельных случаях годовые значения NEE становились положительными.

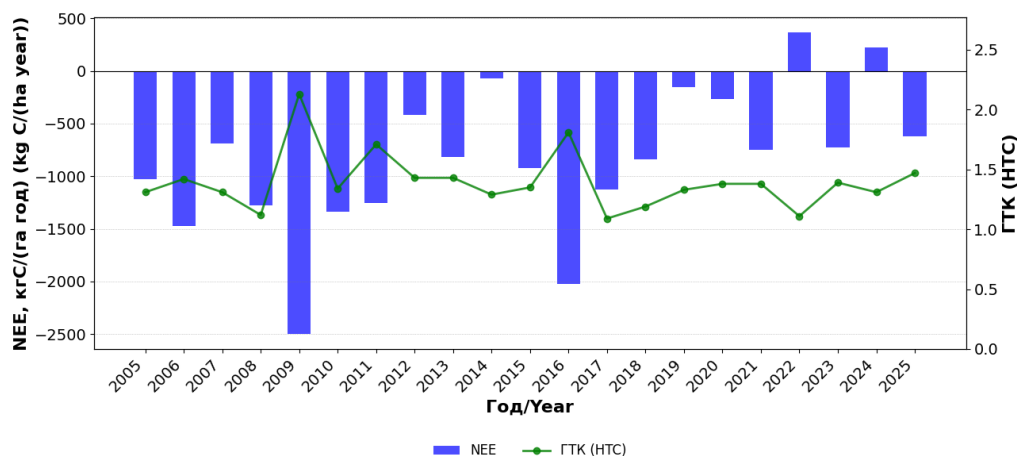


Рис. 3. Смоделированные годовые потоки нетто-экосистемного обмена (NEE) и гидротермического коэффициента (ГТК) за период с 2005 по 2025 гг. для рассматриваемого лесного участка /

Figure 3. Simulated annual net ecosystem exchange (NEE) and Selyaninov's hydrothermal coefficient (HTC) for the period 2005–2025 at the studied forest site

После 2017 г. на фоне повышения температуры и ограниченной влагообеспеченности снижение GPP сопровождалось изменениями компонентов дыхания. В результате годовой баланс CO_2 либо характеризовался слабым поглощением, либо смещался в область положительных значений NEE.

Для количественной оценки связи межгодовой изменчивости NEE с основными климатическими факторами был выполнен двухфакторный дисперсионный анализ (табл. 1). В качестве факторов использовались среднегодовая температура воздуха и

годовая сумма атмосферных осадков за 2005–2025 гг.; зависимой переменной являлось годовое значение NEE. Оба фактора оказывали статистически значимое влияние на межгодовую изменчивость NEE ($p < 0,05$), тогда как их взаимодействие не было значимым ($p > 0,05$). Доля объясненной дисперсии, связанная с осадками, составила 23,2%, с температурой – 18,8%, тогда как 53,5% изменчивости приходилось на факторы, не включенные в анализ.

Таблица 1 / Table 1

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния температуры воздуха и количества осадков на межгодовую изменчивость NEE (2005–2025 гг.) / Results of a two-way analysis of variance (ANOVA) assessing the effects of air temperature and precipitation on the interannual variability of NEE (2005–2025)

Источник изменчивости / Source of variation	Степени свободы / df	Сумма квадратов / Sum of squares	Средний квадрат / Mean square	F-критерий / F-value	P значение / p-value	Доля объясненной дисперсии / Explained variance, % ¹
Температура / Temperature	1	2294078	2294078	5,961	0,0259*	18,8%
Осадки / Precipitation	1	2840109	2840109	7,38	0,0147*	23,2%
Температура × Осадки / Temperature × Precipitation	1	554419	554419	1,441	0,2465	4,5%
Остаточная вариация / Residual error	17	6542600	384859			53,5%
Всего / Total	20	12231206				100,0%

¹ Рассчитывается как отношение суммы квадратов данного фактора к общей сумме квадратов / It is calculated as the ratio of the sum of the squares of the given factor to the total sum of squares.

Сезонная динамика потоков CO₂ в контрастные по климатическим условиям годы. Для анализа сезонных особенностей углеродного обмена была рассмотрена динамика NEE в двух климатически контрастных годах – 2016 и 2024 гг., характеризовавшихся соответственно выраженным годовым поглощением и положительным годовым NEE (рис. 4).

В 2016 г. в начале вегетационного периода формировалось устойчивое поглощение CO₂ до –500...–600 кг C/(га мес) при высоких значениях ГТК (>2). В июле–августе при снижении ГТК до значений менее 1 поглощение ослаблялось и кратковременно сменялось слабой эмиссией до +200 кг C/(га мес). В холодный период NEE принимал положительные значения.

В 2024 г. весеннее поглощение было значительно слабее (–200...–250 кг C/(га мес)), а с мая по октябрь модельные значения NEE преимущественно были положительными. Максимальная эмиссия в июле–августе достигала 450–500 кг C/(га мес) при ГТК около 1. В целом сезонная динамика 2024 г. характеризовалась существенно более слабым поглощением CO₂ по сравнению с 2016 г.

Сопоставление сезонной динамики NEE с метеорологическими параметрами (рис. 4) показывает существенные различия между контрастными годами. В 2016 г. сочетание более благоприятных температурно-влажностных условий в вегетационный период сопровождалось устойчивым поглощением CO₂, тогда как в 2024 г. повышенный температурный фон и ограниченная влагообеспеченность совпадали с ослаблением поглощения и преобладанием положительных значений NEE.

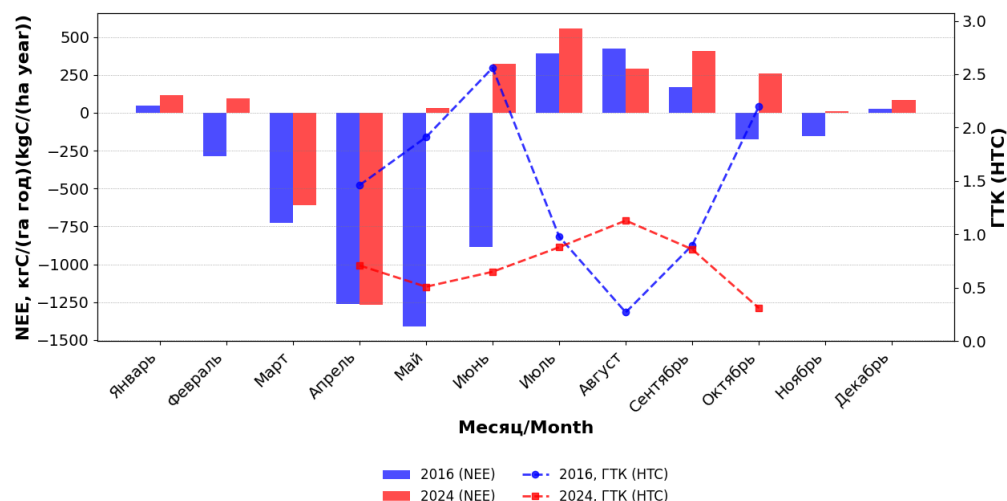


Рис. 4. Сезонная динамика нетто-экосистемного обмена (NEE) в 2016 и 2024 гг. /

Fig. 4. Seasonal dynamics of net ecosystem exchange (NEE) in 2016 and 2024

Для выявления причин межгодовой изменчивости NEE и анализа вклада основных компонент углеродного баланса были рассмотрены смоделированные годовые значения его основных составляющих (GPP, автотрофного дыхания растений (R_a) и гетеротрофного почвенного дыхания (R_h)) за период 2005–2025 гг. (рис. 5). Как показывают результаты расчетов, все компоненты углеродного баланса отличаются высокой межгодовой изменчивостью, отражающей различия в гидротермических условиях вегетационного периода.

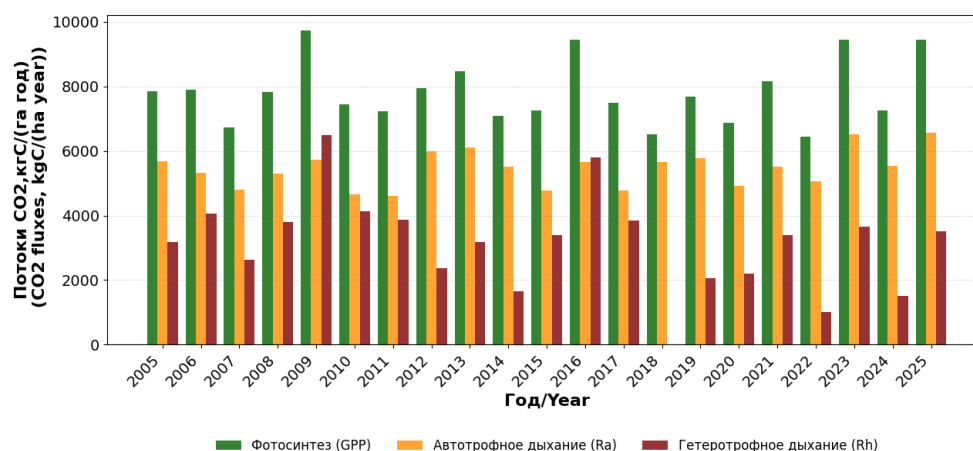


Рис. 5. Смоделированные годовые значения компонент углеродного баланса: валовой первичной продукции (GPP), автотрофного дыхания (R_a) и гетеротрофного дыхания (R_h) за период 2005–2025 гг. /

Fig. 5. Simulated annual values of carbon balance components: gross primary production (GPP), autotrophic respiration (R_a), and heterotrophic respiration (R_h) for the period 2005–2025

GPP изменялись в широком диапазоне от 6433 кг С/(га год) в экстремально засушливом 2024 г. до 9733 кг С/(га год) в аномально благоприятном по условиям увлажнения 2009 г., тогда как R_a имело меньшую амплитуду колебаний (от 4611 до 6559 кг С/(га год)). R_h также снижалось в засушливые годы и возрастало при благоприятном гидротермическом режиме. Положительное значение NEE в 2024 г. было связано прежде всего с уменьшением GPP, которое не компенсировалось сокращением RE.

В годы максимального поглощения CO_2 включая 2009 и 2016 гг., высокие значения GPP сочетались с увеличением R_h , однако прирост фотосинтетической продукции су-

щественно превышал потери на дыхание, что обеспечивало формирование отрицательного годового NEE.

В контрастном 2024 г. на фоне повышенного температурного режима и дефицита влаги наблюдалось резкое снижение GPP. Одновременно уменьшалось R_h , однако сокращение потерь на дыхание оказалось недостаточным для компенсации снижения ассимиляции, что привело к положительному годовому значению NEE.

Таким образом, межгодовая изменчивость NEE в значительной степени была связана с изменениями GPP и R_h в вегетационный период. При неблагоприятных температурно-влажностных условиях снижение GPP было более явным, чем сокращение эмиссионных потоков, тогда как R_a характеризовалось меньшей межгодовой изменчивостью.

Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют выявить основные закономерности влияния метеорологических факторов на углеродный обмен в широколиственном лесу Северного Кавказа. Ключевую роль в формировании годового и сезонного баланса играет соотношение между процессами ассимиляции углерода (фотосинтезом) и RE, который чувствителен к изменениям гидротермического режима. При этом выявленные зависимости следует рассматривать, прежде всего, как результат модельного эксперимента, характеризующий реакцию углеродного обмена на межгодовые и сезонные изменения температурно-влажностных условий.

Анализ годовой динамики NEE показывает, что на протяжении большей части периода наблюдений исследуемая экосистема являлась устойчивым поглотителем CO_2 из атмосферы. Этот вывод согласуется с современными представлениями о роли спелых широколиственных лесов умеренного пояса в региональном углеродном цикле [Швиденко, Щепашенко, 2014]. Вместе с тем модельные расчеты показывают тенденцию к ослаблению поглощения CO_2 в отдельные теплые и относительно засушливые годы, сопровождающуюся увеличением числа лет с положительными значениями NEE. Это указывает на потенциальное снижение устойчивости углеродного баланса к климатическим аномалиям. Полученный результат не следует интерпретировать как установленный переход экосистемы от нетто-поглотителя к нетто-источнику CO_2 , поскольку абсолютные значения NEE не были непосредственно валидированы по натурным наблюдениям. Однако он позволяет предполагать, что дальнейшее усиление температурного стресса при ограниченной влагообеспеченности может повышать вероятность ослабления углеродного стока в исследуемом типе лесной экосистемы.

Наиболее интенсивное поглощение CO_2 в модельных расчетах, зафиксированное в 2009 и 2016 гг., совпадало с периодами повышенной влагообеспеченности и высоких значений гидротермического коэффициента ($ГТК > 1,5$). В такие годы формировались условия, при которых GPP существенно превышала RE. Аналогичные закономерности между влажностным режимом и усилением ассимиляционных процессов выявлены для лесных экосистем различных климатических зон [Reichstein et al., 2013]. Дополнительным фактором, усиливающим поглощение CO_2 в рассматриваемый период, может быть относительно умеренный температурный фон в 2006–2016 гг., способствующий снижению интенсивности R_a [Kim et al., 2025].

Начиная с 2018 г. в модельных расчетах прослеживается изменение режима углеродного обмена, связанное с сочетанием повышенного температурного фона и нормального или пониженного уровня осадков, при значениях ГТК преимущественно около 1–1,5. Подобное сочетание климатических факторов рассматривается как неблагоприятное для функционирования лесных экосистем, поскольку повышение температуры в условиях ограниченной влагообеспеченности может приводить к более выраженному снижению фотосинтетической активности по сравнению с изменениями эмиссионных

потоков [Zhang et al., 2017; Bastos et al., 2020]. В результате в модельном эксперименте экосистема в отдельные годы утрачивала способность к нетто-поглощению CO_2 , что проявлялось в положительных значениях NEE.

Сезонный анализ для климатически контрастных лет (2016 и 2024 гг.) позволяет уточнить временные масштабы действия этих механизмов. Контраст 2016 и 2024 гг. показывает, что наиболее уязвимым периодом является начало и середина вегетационного сезона, когда дефицит влаги при повышенных температурах ограничивает фотосинтетическую продуктивность [Швиденко, Щепаченко, 2014]. При этом снижение R_h при водном стрессе не обязательно компенсирует снижение GPP, вследствие чего годовой NEE может смещаться в область положительных значений. Подобные сценарии рассматриваются как один из возможных вариантов реакции лесных экосистем в условиях современного и прогнозируемого роста глобальной температуры [IPCC..., 2021].

Вместе с тем интерпретация выявленной зависимости только через температурно-влажностный стресс требует осторожности. Исследуемый участок характеризуется сложным рельефом и выраженной пространственной неоднородностью условий произрастания, вследствие чего влияние температуры и осадков на углеродный обмен может модифицироваться экспозицией и крутизной склонов, особенностями поверхностного стока, глубиной залегания грунтовых вод, свойствами почвы, а также пространственным распределением растительного опада и мортмассы. Эти факторы в настоящем исследовании не рассматривались как самостоятельные пространственно распределенные регуляторы NEE, что ограничивает возможность прямого переноса выявленных зависимостей на каждый отдельный микроландшафт исследуемой территории.

Анализ динамики ключевых составляющих углеродного баланса позволяет дополнительно уточнить выявленные закономерности. В годы максимального поглощения CO_2 высокие значения GPP сопровождались также увеличением R_h , однако прирост ассимилированного углерода существенно превышал почвенные потери CO_2 . В 2024 г. наблюдалось резкое подавление как GPP, так и гетеротрофного дыхания, что отражает чувствительность микробных процессов к изменениям влагообеспеченности почвы. Тем не менее даже столь значительное снижение R_h не компенсировало падения скорости ассимиляционных процессов, что в итоге привело к положительному годовому значению NEE. R_a при этом показывало более инерционный характер и меньшую амплитуду отклика на климатические аномалии, что также отмечается в ряде исследований [Reichstein et al., 2013].

Следует отметить, что полученные результаты не позволяют однозначно выделить температуру как единственный или доминирующий фактор межгодовой изменчивости NEE. Результаты дисперсионного анализа показывают сопоставимый вклад температуры и осадков в объясненную вариацию NEE, тогда как значительная доля остаточной вариации указывает на влияние других факторов, не включенных в рассматриваемую двухфакторную схему. Поэтому выявленная реакция NEE, вероятно, определяется совокупным воздействием температурного режима, влагообеспеченности и особенностей пространственно-временного состояния экосистемы.

Таким образом, полученные результаты показывают высокую чувствительность смоделированного углеродного обмена широколиственного леса предгорной зоны Северного Кавказа к изменениям температурно-влажностных условий, особенно в течение вегетационного периода. Межгодовые и сезонные различия NEE в значительной степени связаны с изменениями GPP, тогда как снижение эмиссионных потоков при дефиците влаги не всегда компенсирует уменьшение ассимиляции углерода. Вместе с тем выявленные зависимости следует рассматривать с учетом ограничений модельного подхода.

Количественные оценки потоков CO_2 в настоящей работе получены исключительно на основе численного моделирования и не подвергались прямой валидации по данным натурных измерений NEE непосредственно на исследуемом участке. Проведение такой

валидации для рассматриваемой территории сопряжено с существенными методическими ограничениями, обусловленными сложным рельефом, значительным перепадом высот и выраженной пространственной неоднородностью растительного и почвенного покрова. Локальные измерения потоков CO_2 , даже при их наличии на отдельных точках, не могут непосредственно характеризовать пространственно интегрированный поток для всей исследуемой территории без дополнительного масштабирования и учета ландшафтной неоднородности [Bastos et al., 2020]. Поэтому абсолютные значения NEE следует рассматривать как модельные оценки, чувствительные к параметризации Forest-DNDC, заданным характеристикам растительности и почвы и качеству метеорологических входных данных. В то же время анализ межгодовой и сезонной изменчивости и сопоставление модельных потоков с изменениями температурно-влажностных условий позволяют оценивать направление и характер модельной реакции углеродного обмена экосистемы на климатическую изменчивость.

Заключение

На основе численного моделирования с использованием процесс-ориентированной биогеохимической модели Forest-DNDC выполнена оценка межгодовой и сезонной изменчивости потоков CO_2 в широколиственном лесу предгорной зоны Северного Кавказа. Результаты моделирования показали существенную изменчивость углеродного баланса в зависимости от сочетания температурных и гидрологических условий.

Показано, что в годы с повышенной влагообеспеченностью и благоприятными гидротермическими условиями модельные значения NEE характеризовались сильным поглощением CO_2 , достигающим 2000–2500 кг С/га в год. В отдельные теплые и засушливые годы NEE, напротив, принимал положительные значения до 200–400 кг С/га в год. Таким образом, изменение температурно-влажностных условий может сопровождаться существенным ослаблением поглощения CO_2 и смещением годового баланса в сторону эмиссии.

Анализ компонентов углеродного баланса показал, что межгодовая изменчивость NEE в значительной степени связана с вариациями GPP и R_h , тогда как R_a характеризуется меньшей амплитудой отклика на климатические условия. В засушливые годы снижение GPP оказывалось более выраженным, чем сокращение R_h , вследствие чего уменьшение потерь на дыхание не компенсировало ослабление ассимиляции углерода.

Сезонный анализ показал, что ключевые изменения углеродного баланса формируются преимущественно в вегетационный период. Наиболее выраженное ослабление поглощения CO_2 наблюдалось при сочетании повышенных температур и недостаточной влагообеспеченности, когда снижение фотосинтетической активности ограничивало GPP и приводило к смещению NEE в сторону положительных значений. При этом результаты дисперсионного анализа указывают на совместное влияние температуры и осадков и на существенную роль факторов, не учтенных в рассматриваемой климатической схеме.

Полученные результаты показывают перспективность применения процесс-ориентированного моделирования для анализа углеродного обмена горных лесных экосистем при ограниченной возможности пространственно репрезентативных натурных наблюдений. Вместе с тем абсолютные значения NEE в настоящей работе не подвергались прямой валидации по данным измерений непосредственно на исследуемой территории. Они должны рассматриваться как модельные оценки, чувствительные к параметризации Forest-DNDC, характеристикам растительности и почвы, а также качеству метеорологических входных данных. Высокая пространственная неоднородность рельефа, почвенного и растительного покрова дополнительно ограничивает возможность прямого сопоставления локальных измерений с интегральными модельными оценками.

Таким образом, результаты исследования показывают, что углеродный баланс широколиственных лесов Северного Кавказа может существенно изменяться в зависимости от межгодовых и сезонных температурно-влажностных условий. Выявленная чувствительность экосистемы к климатическим аномалиям указывает на необходимость дальнейшего совершенствования пространственной параметризации и региональной калибровки Forest-DNDC, а также интеграции модельных расчетов с независимыми полевыми и дистанционными наблюдениями. Расширение пространственного охвата и проведение прогнозных расчетов по различным климатическим сценариям позволят повысить надежность оценки будущей роли горных лесов в региональном углеродном цикле.

Литература

1. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии / под ред. С.К. Гулева, А.В. Ольчева. – М.: Научный мир, 2025. – 420 с.
2. Керимов И.А., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. № 3(25). – С. 35–47. DOI: 10.25744/genb.2021.28.73.004.
3. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу») // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 180–191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015.
4. Мухартова Ю.В., Гибадуллин Р.Р., Ольчев А.В., Керимов И.А. Модельный подход для восстановления приземных вертикальных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 149–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012.
5. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 1. – С. 69–92.
6. Adams H.D., Zeppel M.J.B., Anderegg W.R.L., Hartmann H. et al. A multispecies synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality // Nature Ecology and Evolution. – 2017. – Vol. 1. No. 9. – pp. 1285–1291. DOI: 10.1038/s41559-017-0248-x.
7. Bastos A., O'Sullivan M., Ciais P., Makowski D. et al. Sources of uncertainty in regional and global terrestrial CO₂ exchange estimates // Global Biogeochemical Cycles. – 2020. – Vol. 34. DOI: 10.1029/2019GB006393.
8. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Dorothee C.E. Bakker et al. Global Carbon Budget 2024 // Earth System Science Data. – 2025. – Vol. 17. – pp. 965–1039. DOI: 10.5194/essd-17-965-2025.
9. Gillespy S.L., Anthony S., Cardenas L.M., Chadwick D.R., Li C. et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model Evolution // Ecological Modelling. – 2014. – Vol. 292. – pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.
10. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. – 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.
11. Kim H., Kim S., Woo S., Min K. Soil heterotrophic and autotrophic respiration respond differently to seasonal variations in temperature and water content under monsoon continental climate // Scientific Reports. – 2025. – No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-06082-x.
12. Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudre N., Ogee J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice I.C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system // Global Biogeochemical Cycles. – 2005. – Vol. 19. – GB1015. DOI: 10.1029/2003GB002199.
13. Li C., Aber J., Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen H. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2000. – Vol. 105. No. D4. – pp. 4369–4384.
14. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1992. – Vol. 97. No. D9. – pp. 9759–9776.

15. Olchev A.V. Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century // *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2025. – Vol. 61. Suppl. 1. – pp. S74–S100. DOI: 10.1134/S0001433825701166
16. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J. et al. The enduring world forest carbon sink // *Nature*. – 2024. – Vol. 631. – pp. 563–569. DOI: 10.1038/s41586-024-07602-x.
17. Reichstein M., Bahn M., Ciais P., Frank D., Mahecha M.D. et al. Climate extremes and the carbon cycle // *Nature*. – 2013. – Vol. 500. No. 7462. – pp. 287–295. DOI: 10.1038/nature12350.
18. Serykh I., Krashenninnikova S., Safarov S., Safarov E., Oskouei E.A., Gorbunova T., Gorbunov R., Falamarzi Y. Near-surface temperature climate change in the Caspian region: a study using meteorological station data, reanalyses, and CMIP6 models // *Climate*. – 2025. – Vol. 13. No. 10. – Art. No. 201. DOI: 10.3390/cli13100201.
19. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model // *Global Change Biology*. – 2003. – Vol. 9. No. 2. – pp. 161–185.
20. Thum T., Caldararu S., Engel J., Kern M., Pallandt M. et al. A new model of the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in the terrestrial biosphere (QUINCY v1.0; revision 1996) // *Geoscientific Model Development*. – 2019. – Vol. 12. No. 11. – pp. 4781–4802. DOI: 10.5194/gmd-12-4781-2019.
21. White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls // *Earth Interactions*. – 2000. – Vol. 4. No. 3. – pp. 1–85.
22. Zhang Y., Xiao X., Wu X., Zhou S., Zhang G. et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016 // *Scientific Data*. – 2017. – Vol. 4. No. 1. – Art. No. 170165. DOI: 10.1038/sdata.2017.165.

References

1. Carbon supersites: monitoring, geographic information systems, and sequestration technologies. Eds. S.K. Gulev, A.V. Olchev. Moscow. Nauchny Mir. 2025. 420 p. (In Russ.)
2. Kerimov I.A., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3/25. pp. 35–47. DOI: 10.25744/genb.2021.28.73.004. (In Russ.)
3. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site “Roshni-Chu”). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 180–191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015. (In Russ.)
4. Mukhartova Yu.V., Gibadullin R.R., Olchev A.V., Kerimov I.A. Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 149–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012. (In Russ.)
5. Shvidenko A., Schepaschenko D. Carbon budget of Russian forests. *Siberian Journal of Forest Science*. 2014. Vol. 1. pp. 69–92. (In Russ.)
6. Adams H.D., Zeppel M.J.B., Anderegg W.R.L., Hartmann H. et al. A multispecies synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology and Evolution*. 2017. Vol. 1. No. 9. pp. 1285–1291. DOI: 10.1038/s41559-017-0248-x.
7. Bastos A., O’Sullivan M., Ciais P., Makowski D. et al. Sources of uncertainty in regional and global terrestrial CO₂ exchange estimates. *Global Biogeochemical Cycles*. 2020. Vol. 34. DOI: 10.1029/2019GB006393.
8. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Dorothee C.E. Bakker et al. Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*. 2025. Vol. 17. pp. 965–1039. DOI: 10.5194/essd-17-965-2025.
9. Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L.M., Chadwick D.R., Li C. et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model Evolution. *Ecological Modelling*. 2014. Vol. 292. pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.
10. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci,

R. Yu, and B. Zhou. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.

11. Kim H., Kim S., Woo S., Min K. Soil heterotrophic and autotrophic respiration respond differently to seasonal variations in temperature and water content under monsoon continental climate. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-06082-x.

12. Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudre N., Ogee J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice I.C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*. 2005. Vol. 19. GB1015. DOI: 10.1029/2003GB002199.

13. Li C., Aber J., Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen H. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2000. Vol. 105. No. D4. pp. 4369–4384.

14. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1992. Vol. 97. No. D9. pp. 9759–9776.

15. Olchev A.V. Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century. *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*. 2025. Vol. 61. Suppl. 1. pp. S74–S100. DOI: 10.1134/S0001433825701166.

16. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J. et al. The enduring world forest carbon sink. *Nature*. 2024. Vol. 631. pp. 563–569. DOI: 10.1038/s41586-024-07602-x.

17. Reichstein M., Bahn M., Ciais P., Frank D., Mahecha M.D. et al. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*. 2013. Vol. 500. No. 7462. pp. 287–295. DOI: 10.1038/nature12350.

18. Serykh I., Krasheninnikova S., Safarov S., Safarov E., Oskouei E.A., Gorbunova T., Gorbunov R., Falamarzi Y. Near-surface temperature climate change in the Caspian region: a study using meteorological station data, reanalyses, and CMIP6 models. *Climate*. 2025. Vol. 13. No. 10. Art. No. 201. DOI: 10.3390/cli13100201.

19. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*. 2003. Vol. 9. No. 2. pp. 161–185.

20. Thum T., Caldararu S., Engel J., Kern M., Pallandt M. et al. A new model of the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in the terrestrial biosphere (QUINCY v1.0; revision 1996). *Geoscientific Model Development*. 2019. Vol. 12. No. 11. pp. 4781–4802. DOI: 10.5194/gmd-12-4781-2019.

21. White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions*. 2000. Vol. 4. No. 3. pp. 1–85.

22. Zhang Y., Xiao X., Wu X., Zhou S., Zhang G. et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. *Scientific Data*. 2017. Vol. 4. No. 1. Art. No. 170165. DOI: 10.1038/sdata.2017.165.

УДК 622.23

DOI: 10.46698/VNC.2026.59.83.001

Оригинальная статья

Методика расчета параметров комбинированной крепи выработок в условиях неустойчивого массива

Т.Ф. Харисов[✉], А.Е. Балек[✉], Д.В. Прищепа[✉],
Д.А. Коптяков[✉], Н.А. Масальский[✉]

Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620075,
г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58,
e-mail: timur-ne@mail.ru

Статья поступила: 02.03.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы обусловлена тем, что действующие нормативные документы не обеспечивают адекватных методов расчета для крепления подготовительно-нарезных горных выработок, эксплуатируемых в неустойчивых скальных массивах IV–V категорий и в зонах влияния очистных работ. Это приводит либо к рискам обрушения из-за недостаточной прочности крепи, либо к значительному удорожанию работ из-за её необоснованного усиления. **Цель работы:** разработка усовершенствованной, комплексной методики расчета параметров комбинированной крепи, которая включает анкерную, набрызгбетонную и металлическую арочную (СВП) крепь. Методика должна обеспечивать надежность конструкции с заданным коэффициентом запаса и оптимизировать материальные затраты. **Методы.** На основе анализа физико-механических свойств пород и данных склерометрии были установлены ключевые корреляции. Для расчета нагрузки использовалась модель хрупко-разрушающейся среды, а для учета влияния очистных работ – методы трехмерного численного моделирования и GEP-анализ для определения коэффициента концентрации напряжений. Расчет комбинированной крепи выполняется поэтапно: сначала определяется упрочнение массива от анкерования по эмпирическим зависимостям, затем рассчитывается нагрузка, и, наконец, методом конечных элементов подбираются параметры поддерживающей крепи (набрызгбетон, СВП). **Результаты исследования.** На примере расчетов для выработок шириной 5 и 6 м в различных горно-геологических условиях продемонстрирована эффективность методики. Методика позволяет обоснованно выбирать параметры комбинированной крепи, обеспечивая ее устойчивость с коэффициентом запаса, и оптимизировать затраты на крепление. Отмечены текущие ограничения метода, связанные с максимальной длиной канатных анкеров (5 м) и использованием характеристик бетона класса В25, которые планируется устранить в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: несущая способность крепи, комбинированная крепь, неустойчивый горный массив, коэффициент упрочнения, скальный массив.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания № 075-00408-26-00. № гос. рег. 123012300007-7.

Для цитирования: Харисов Т.Ф., Балек А.Е., Прищепа Д.В., Коптяков Д.А., Масальский Н.А. Методика расчета параметров комбинированной крепи выработок в условиях неустойчивого массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.59.83.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.59.83.001

Original paper

Method for calculating the parameters of combined support for mine workings in an unstable rock mass

T.F. Kharisov^{ORCID}, A.E. Balek^{ORCID}, D.V. Prishchepa^{ORCID},
D.A. Koptiyakov^{ORCID}, N.A. Masalskiy^{ORCID}

Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
58 Mamina-Sibiryaka Str., Yekaterinburg 620075, Russian Federation,
e-mail: timur-ne@mail.ru

Received: 02.03.2026, revised: 10.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The study is driven by the fact that current regulatory documents do not provide adequate calculation methods for supporting development and preparatory mine workings in unstable rock masses of stability categories IV–V and within zones affected by stoping operations. This leads either to collapse risks due to insufficient support strength or to significant cost overruns due to unjustified over-reinforcement.

Aim. To develop an improved, comprehensive methodology for calculating the parameters of a combined support system comprising rock bolting, shotcrete, and steel arch (SVP) support. The methodology should ensure structural reliability with a specified safety factor and optimize material costs. **Methods.** Key correlations were established based on the analysis of rock physico-mechanical properties and sclerometric data. The load calculation employed a brittle-fracturing medium model, while the influence of stoping operations was accounted for using 3D numerical modeling methods and GEP analysis to determine the stress concentration factor. The combined support calculation is performed in stages: first, rock mass strengthening from bolting is determined using empirical dependencies; then, the load is calculated; and finally, the parameters of the ground support (shotcrete, SVP arches) are selected using the finite element method. **Results.** The methodology's effectiveness was demonstrated through calculations for 5 m and 6 m wide workings under various mining and geological conditions. It enables a well-founded selection of combined support parameters, ensuring its stability with a safety factor and optimizing support costs. Current limitations of the method are noted, related to the maximum cable bolt length (5 m) and the use of characteristics for B25 class concrete, which are planned to be addressed in future research.

Keywords: load-bearing capacity of support, combined support, unstable rock mass, strengthening coefficient, rock mass.

Acknowledgments: *This work was carried out within the framework of the state assignment No. 075-00408-26-00 (state registration No. 123012300007-7).*

For citation: Kharisov T.F., Balek A.E., Prishchepa D.V., Koptiyakov D.A., Masalskiy N.A. Method for calculating the parameters of combined support for mine workings in an unstable rock mass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.59.83.001

Введение

В горной промышленности, обеспечение устойчивости и безопасности горных выработок является ключевой задачей, напрямую влияющей на эффективность добычи полезных ископаемых и сохранность жизни персонала. Крепление горных выработок как основной способ поддержания их формы и предотвращения обрушений играет в этом процессе определяющую роль. Разработка и внедрение эффективных и надежных

методик расчета параметров крепи – сложная и актуальная научно-техническая задача, требующая учета множества факторов, в первую очередь, смещений массива горных пород и нагрузок, действующих на крепь. Недостаточная несущая способность крепи может привести к деформациям, разрушениям и, как следствие, к аварийным ситуациям. В то же время, избыточное усиление конструкции крепи ведет к неоправданным затратам на материалы и трудоемкость работ.

В условиях скальных массивов ключевым нормативным документом, регламентирующим методику расчета смещений приконтурного массива и нагрузок на крепь горных выработок, является «СП 91.13330.2012. Свод правил. Подземные горные выработки». Однако данный свод правил предписывает, что для слабоустойчивых пород IV-й категории и ниже, а также для выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ, расчет проектных параметров и смещений породных стенок, кровли и почвы должен выполняться с привлечением специализированных организаций, имеющих соответствующие методики и опыт.

Следовательно, СП 91.13330.2012 подходит лишь для капитальных горных выработок в устойчивых массивах. В условиях неустойчивых массивов (IV–V категории) и подготовительно-нарезных выработок в зоне влияния очистных работ необходима альтернативная методика расчета смещений, нагрузок и параметров крепи, учитывающая дополнительные факторы, влияющие на устойчивость системы «крепь-массив».

Многолетние исследования, подтвержденные опытом горнорудных предприятий, показывают, что для скальных массивов IV–V категории устойчивости наиболее подходящей является модель хрупко-разрушающейся среды [Балек и др., 2024; Головин и др., 2024; Корчак, 2021; Плешко и др., 2020; Плешко и др., 2022]. Применение данной модели позволяет использовать аналитические решения плоской геомеханической задачи для расчета радиуса зоны неупругого деформирования (нарушенной зоны) r :

$$r = R \left[\frac{\beta(2q - [\sigma]) + (\beta + 2)[\sigma_o]}{(\beta + 2)(\beta P + [\sigma_o])} \right]^{1/\beta}; \quad (1)$$

Внешняя максимальная нагрузка на крепь определяется исходя из веса налегающих разрушенных пород в зоне неупругих деформаций P_g :

$$P_g = \gamma(r - R), \quad (2)$$

где r – радиус (от центральной оси выработки) зоны неупругого деформирования массива, м;

$R = (S/\pi)^{0.5}$ – эквивалентный радиус рассматриваемой выработки с площадью поперечного сечения S в проходке (вчерне), м;

q – главные максимальные напряжения (для условий объемного равнокомпонентного поля) в массиве в районе проходки выработки, МПа. Если выработка проходится в нетронutom массиве, то главные максимальные напряжения равняются природным напряжениям $q = q_{i0}$. Если выработка находится в зоне влияния очистных работ, q определяется по формулам (3, 4);

β – параметр линеаризации, огибающей кругов Кулона-Мора;

φ – угол внутреннего трения;

μ – коэффициент Пуассона;

σ – предел прочности (на одноосное сжатие) вмещающего выработку породного массива вне зоны неупругих деформаций, МПа;

σ_o – предел остаточной прочности (на одноосное сжатие) нарушенного массива вмещающих пород в зоне неупругих деформаций, МПа;

P – реактивный отпор поддерживающей крепи, численно равный ее несущей способности, МПа;

γ – объемный вес породного массива в зоне неупругих деформаций.

Материалы и методы

Для усовершенствования приведенной аналитической формулы расчета радиуса зоны неупругого деформирования, которая не учитывает вторичное поле напряжений, вызванное ведением очистных работ, и не может применяться в расчетах максимальной нагрузки на крепь для подготовительно-нарезных выработок, выполнена оценка напряженно-деформированного состояния массива вблизи очистных выработок методом численного объемного моделирования [Качурин и др., 2024; Матаев и др., 2023; Муратбакиев, Судариков, 2021; Голик и др., 2021].

В процессе поэтапного моделирования оценивались главные максимальные напряжения в массиве σ_1 на различном расстоянии от очистного пространства L и его размеры по осям XYZ .

Для выявления нелинейной зависимости использовался GEP-метод [Behnia et al., 2017; Candida, 2002; Dehghani et al., 2021; Monjezi et al., 2021; Ozbek et al., 2013; Shirani et al., 2017; Zhang et al., 2023]. Изменение напряжений выражается через коэффициент концентрации K :

$$K = \frac{q}{q_{np}}, \quad (3)$$

где q – главные максимальные напряжения (для условий объемного равнокомпонентного поля) в массиве в зоне влияния очистных работ, МПа.

q_{np} – природные (исходные) напряжения (для условий объемного равнокомпонентного поля) окружающего породного массива в районе проходки выработки, МПа.

$$K = \left(\frac{1}{0,1 \cdot (L - y - 2,23)} + 0,97 + \frac{z}{x(y - 13,9)} + \frac{1}{1,26 / y^{1/4} + 9,2 \cdot L / x} \right), \quad (4)$$

где K – коэффициент концентрации напряжений в массиве;

q – главные максимальные напряжения в массиве, МПа;

x – размер выработанного (очистного) пространства по оси X , м;

y – размер выработанного (очистного) пространства по оси Y , м;

z – размер выработанного (очистного) пространства по оси Z , м;

L – расстояние от контура выработанного (очистного) пространства, м.

Анализ существующих методик расчета параметров крепи показал, что аналитические формулы ориентированы на отдельные типы крепежных конструкций [Габараев и др., 2020; Масаев, Масаев, 2023]. Однако комплексный подход к расчету параметров комбинированной крепи, включающей, например, набрызгбетон, металлическую сетку, анкерную крепь различного типа (в том числе канатные анкеры) и т.д., в настоящее время не имеет унифицированного методического обеспечения.

Сложность заключается в необходимости учета комбинированного взаимодействия нескольких типов крепей различной жесткости и их совместного усиливающего воздействия на обеспечение устойчивости приконтурного массива.

Предложенная авторами методика расчета параметров крепи сводится к обеспечению гарантии того, что в течение эксплуатации крепь не будет разрушена, то есть будет соблюдаться условие прочности:

$$P_p \leq \sum R_p, \quad (5)$$

где P_p – расчетная нагрузка на крепь, МПа;

R_p – расчетная несущая способность крепи, МПа.

Суммарная несущая способность комбинированной крепи не может быть корректно определена как сумма значений несущей способности различных типов крепи (набрызгбетон, анкера, металлические рамы СВП и т.д.), так как они обладают разной жесткостью (модулем упругости).

Авторами предлагается методика расчета параметров комбинированной крепи, учитывающая влияние различных видов анкерной и поддерживающей крепи на устойчивость вмещающего массива через коэффициенты упрочнения. Методика основана на зависимости упрочнения массива от параметров анкерной крепи (длина анкера, сетка анкерования, несущая способность анкера), полученной по данным модельных испытаний проф. Г.И. Краченко и канд. техн. наук О.В. Тимофеева (рис. 1). Натурные исследования и практика горных работ свидетельствуют, что армированный анкерами массив не теряет своей несущей способности даже при его разрушении, а эффект применения анкерной крепи проявляется, в первую очередь, в упрочнении окружающих выработку пород, армированных анкерами.

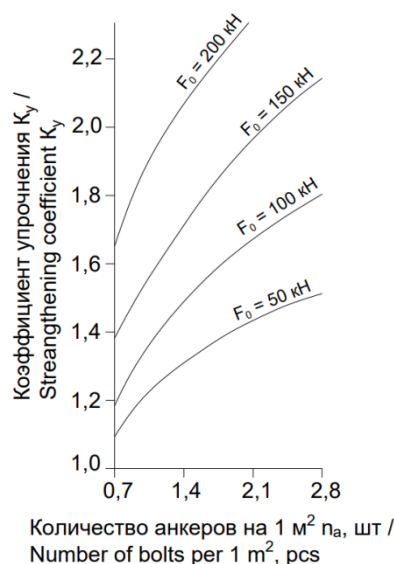


Рис. 1. Зависимость коэффициента упрочнения пород от числа анкеров и их несущей способности: n_a – количество анкеров на 1 м^2 , шт., F_0 – несущая способность анкера, кН /

Fig. 1. Dependence of the rock strengthening coefficient on the number of bolts and their load-bearing capacity: n_a – number of bolts per 1 m^2 , pcs., F_0 – bolt load-bearing capacity, kN

Анкерная крепь с заданными параметрами позволяет сшить структурные блоки массива, повысить предел его прочности и категорию устойчивости массива. На основании категории устойчивости закрепленного анкерной крепью массива, действующих напряжений и параметров выработки рассчитывается нагрузка на крепь. Исходя из значений нагрузок, рассчитанных по формулам 1–2, подбирается соответствующий тип и параметры поддерживающей крепи, несущая способность которой превышает расчетные нагрузки со стороны массива.

В качестве поддерживающей крепи может выступать металлическая рамная, набрызгбетонная, бетонная, и др. типы крепи. Несущая способность металлической рамной крепи из профиля СВП может быть принята из справочного материала.

Несущую способность набрызгбетонной крепи необходимо оценивать так же, как несущую способность конструкции, поскольку она зависит от ее формы, толщины и характеристик бетона. Значения несущей способности набрызгбетонной и бетонной крепи в справочном материале отсутствуют, поэтому для их оценки построен ряд конечно-элементных моделей конструкций крепи для выработок от 3 до 8 метров ши-

риной сводчатой формы поперечного сечения и с разной толщиной крепи от 100 до 500 мм. При толщине крепи менее 100 мм ее несущая способность не оценивалась, так как при данной толщине набрызгбетон применяется как изолирующее покрытие, а при толщине более 100 мм как самостоятельная поддерживающая крепь (несущая конструкция).

Кроме того, расчетам несущей способности подвергалась набрызгбетонная крепь, армированная фиброволокном, металлической сеткой с диаметром прутка 6 и 12 мм с размером ячейки 100x100 мм.

При поэтапных расчетах по мере увеличения внешней нагрузки на конструкцию крепи оценивались сжимающие и растягивающие напряжения, возникающие в бетоне класса В25, а также продольные силы, изгибающие моменты и сдвигающие силы, возникающие в бетоне и металлической арматуре (сетке), с целью определения оптимальных нагрузок, при которых полученные значения близки к предельным.

Результаты исследования

Предельные значения прочности бетона при сжатии и растяжении представлены в таблице 2. Предельные осевые усилия, моменты металлической сетки и результаты расчетов представлены на рисунках 1–2.

Таблица 1 / Table 1

**Соотношение между классами бетона по прочности на сжатие и растяжение и марками /
Correlation between concrete strength classes in compression and tension, and grades**

Класс бетона по прочности / Concrete strength class	Средняя прочность бетона, МПа / Average concrete strength, MPa	Ближайшая марка бетона по прочности / Nearest concrete grade by strength
Сжатие / Compression		
B22,5	29	M300
B25	33	M350
B30	39	M400
B35	46	M450
Растяжение при изгибе / Flexural tensile strength		
B _{tb} 2,0	2,62	P _{tb} 25
B _{tb} 2,4	3,1	P _{tb} 30
B _{tb} 2,8	3,6	P _{tb} 35
B _{tb} 3,2	4,2	P _{tb} 40

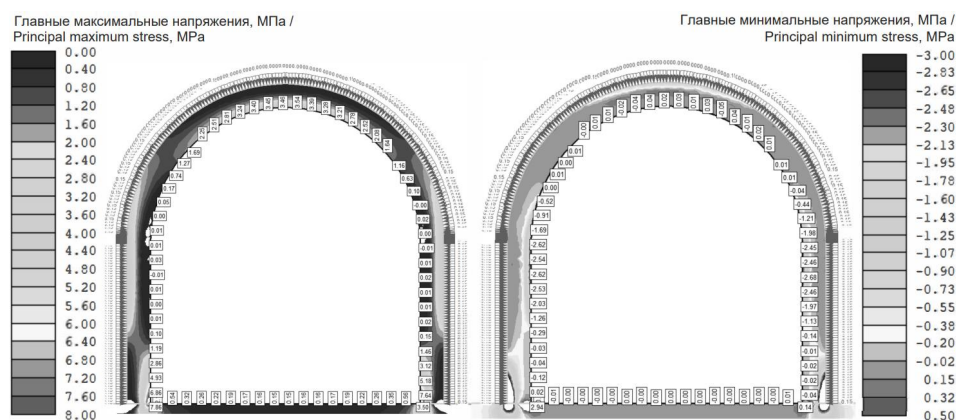


Рис. 2. Главные максимальные (сжимающие) и главные минимальные (растягивающие) напряжения на контуре набрызгбетонной крепи выработки шириной 4 м при нагрузке 0,15 МПа /

Fig. 2. Principal maximum (compressive) and principal minimum (tensile) stresses on the contour of the 4 m wide excavation with shotcrete lining under a load of 0.15 MPa

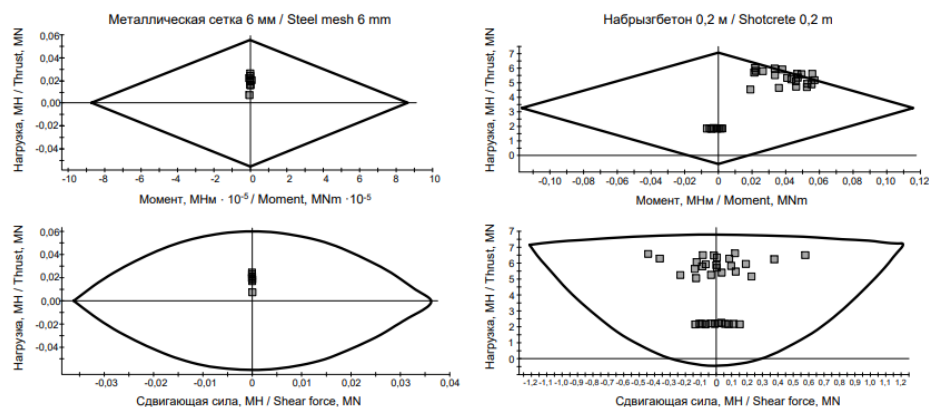


Рис. 3. Паспорт несущей способности набрызгбетонной крепи, армированной металлической сеткой/

Fig. 3. Load-bearing capacity diagram of the shotcrete lining reinforced with steel mesh

Расчеты выполнены для набрызгбетонной, фибро-набрызгбетонной и набрызгбетонной крепи, армированной металлической сеткой толщиной 6 мм и 12 мм. Результаты моделирования представлены в виде диаграмм с зависимостью несущей способности крепи от параметров крепи и размеров выработки на рисунках 4–5.

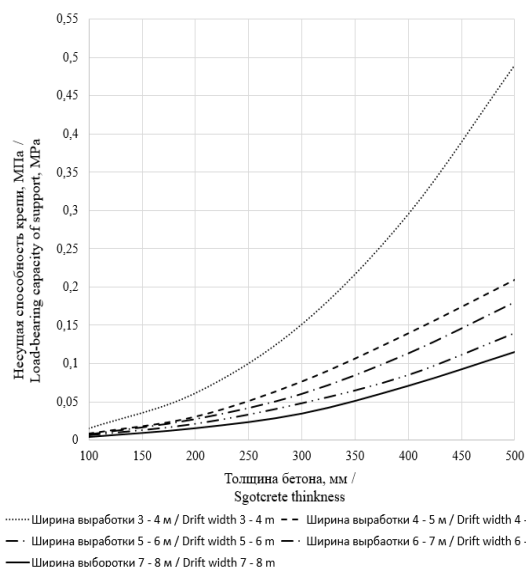


Рис. 4. Несущая способность набрызгбетонной крепи /
Fig. 4. Load-bearing capacity of shotcrete support

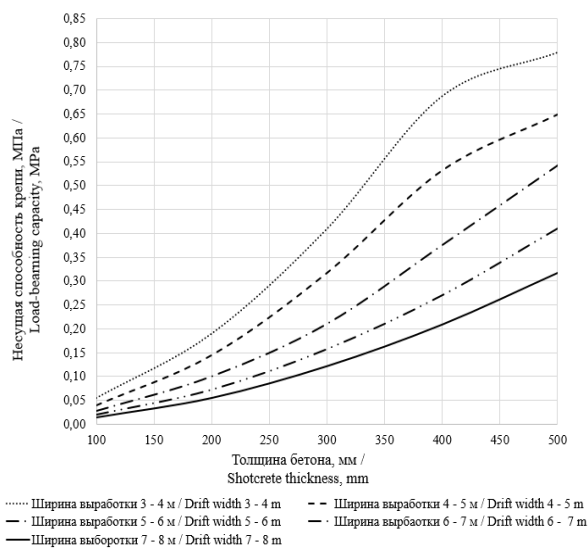


Рис. 5. Несущая способность набрызгбетонной крепи
с арматурой 6 мм /
Fig. 5. Load-bearing capacity of shotcrete support
reinforced with 6 mm reinforcement

В качестве примера в таблице 2 представлена схема расчета комбинированной крепи для подготовительно-нарезных выработок шириной 5 и 6 метров, находящихся в различных горно-геологических условиях: в IV и V категориях устойчивости приконтурного массива выработки при действии в окружающих породах сжимающих гидростатических напряжений 24 (вне зоны влияния очистных работ) и 42 (в зоне влияния очистных работ) МПа. При этом границы применимости подхода охватывают диапазон ширин от 3 до 8 м, что соответствует всему спектру сечений подготовительно-нарезных выработок современных рудников.

Таблица 2 / Table 2

**Расчет типов и параметров комбинированной крепи
подготовительно-нарезных выработок /
Design of composite support systems for development drifts**

Ширина выработки, м / Drift width, m	6,0	6,0	5,0	5,0
Максимальные напряжения сжатия в приконтурном массиве, МПа / Maximum compressive stresses in the excavation near-field, MPa	28 (вне зоны влияния очистных работ / outside mining influence zone)	42 (в зоне влияния очистных работ / within mining influence zone)	24 (вне зоны влияния очистных работ / outside mining influence zone)	35 (в зоне влияния очистных работ / within mining influence zone)
Предел прочности пород в образце, МПа / Uniaxial compressive strength of intact rock, MPa	99	99	99	99
Категория устойчивости выработки / Stability class of the drift	IV	V	IV	V
Коэффициент структурного ослабления приконтурного массива / Damage factor for the near-field rock mass	0,15	0,1	0,15	0,1
Предел прочности приконтурного массива, МПа / Strength of the excavation-damaged zone, MPa	15	10	15	10
Этап 1: анкерование штангами / Stage 1: Rebar bolting				
Сетка анкерования, м / Bolt spacing, m	1,0 × 1,0	0,8 × 0,8	1,0 × 1,0	0,7 × 0,7
Длина анкера, м / Bolt length, m	2,4	2,4	2,4	2,4
Коэффициент упрочнения приконтурного массива / Confinement factor for the near-field rock mass	1,3	1,55	1,3	1,8
Предел прочности приконтурного массива после анкерования, МПа / Strength of the reinforced near-field rock mass, MPa	19,3	15,35	19,3	17,82
Категория устойчивости выработки после анкерования / Stability class after Bolting	IV	IV	IV	IV

Этап 2: анкерование канатами / Stage 2: Cable bolting				
Сетка канатного анкерования, м / Cable bolt spacing, m	1,2 × 1,2	1,0 × 1,0	1,2 × 1,2	1,0 × 1,0
Длина анкера, м / Bolt length, m	5	5	5	5
Коэффициент упрочнения приконтурного массива / Confinement factor for the near-field rock mass	1,7	1,9	1,7	1,9
Предел прочности массива после анкерования, МПа / Strength Limit of Rock Mass after Cable Bolting, MPa	32,82	29,16	32,82	33,86
Категория устойчивости массива после анкерования / Stability class after Cable Bolting	III	III	III	III
Нагрузка на крепь, МПа / Load on the Support, MPa	0,22	0,29	0,17	0,20
Этап 3: установка поддерживающей крепи / Stage 3: Installation of Additional Support				
Тип и параметры дополнительной поддерживающей крепи / Type and Parameters of Additional Support	Металлическая арочная СВП-22 с шагом 1,1 м / Steel arch support SVP-22 with 1.1 m spacing.	Металлическая арочная СВП-22 с шагом 0,8 м / Steel arch support SVP-22 with 0.8 m spacing.	Набрызг-бетон 220 мм + металлическая сетка 6 мм / Shotcrete 220 mm + steel mesh 6 mm	Набрызг-бетон 240 мм + металлическая сетка 12 мм / Shotcrete 240 mm + steel mesh 12 mm
Итоговая несущая способность комбинированной крепи, МПа / Final Load-Bearing Capacity of the Combined Support, MPa	0,264	0,348	0,2	0,24
Коэффициент запаса устойчивости / Stability Safety Factor	1,2	1,2	1,2	1,2

Данная методика позволяет выполнять расчет параметров крепи для всех категорий устойчивости скального массива с учетом комбинированной работы крепи. Стоит отметить, что на данном этапе исследований у нее есть ряд ограничений. Максимальная длина канатных анкеров в используемой номограмме ограничена 5 метрами. Кроме того, при расчете несущей способности монолитной бетонной крепи необходимо учитывать коэффициент армирования, так как диаметр арматуры не ограничен лишь 6 и 12 мм, размерами ячейки сетки 100x100 мм и т.д. Также в расчетах использовались только прочностные характеристики бетона класса В25 как наиболее распространенного при креплении выработок. В дальнейших исследованиях по данной тематике представленные ограничения будут учтены и границы применимости данной методики будут расширены.

Выводы

1. Рассчитана несущая способность основных типов поддерживающих крепей подготовительно-нарезных выработок: набрызгбетонной, фибронабрызгбетонной и железобетонной (набрызгбетонной, армированной металлической сеткой), учитывающая параметры выработки и крепи.

2. Усовершенствована методика расчета параметров комбинированной (анкерная + набрызгбетонная + металлическая арочная) крепи подготовительно-нарезных выработок, предусматривающая соблюдение условия ее устойчивости, при котором несущая способность крепи больше или равна нагрузке со стороны массива с учетом коэффициента упрочнения.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение границ применимости методики и учёт дополнительных факторов.

Литература

1. Балек А.Е., Харисов Т.Ф., Коптяков Д.А. Обоснование хрупкого режима разрушения низкопрочных сильнотрещиноватых массивов скальных горных пород // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 795–811.
2. Габараев О.З., Абдулхалимов А.Г., Келехсаев В.Б., Дзапаров В.Х. Методика расчета нагрузки на вновь возводимую крепь при реконструкции горных выработок // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – № 7. – С. 54–58. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-54-58.
3. Головин К.А., Копылов А.Б., Сушков С.Л., Сушков А.Д. К определению нагрузок на крепь горных выработок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 186–188. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-186-187.
4. Качурин Н.М., Соловьев Д.А., Соловьев Р.А., Стась П.П. Напряженно-деформированное состояние бетонной крепи сопряжений вертикального ствола с выработками околоствольного двора // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 528–537.
5. Корчак П.А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 5. – С. 85–98. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-5-0-85.
6. Масаев Ю.А., Масаев В.Ю. Анализ существующих методов расчета комбинированных крепей горных выработок // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – № 3. – С. 67–73.
7. Матаев А.К., Абеуов Е.А., Зейтинова Ш.Б., Шайке Н.К., Lozynskyi V. Исследование геомеханической ситуации в массиве горных пород в зоне влияния очистных работ в условиях шахты Хримтауского месторождения // Труды университета. – 2023. – № 3(92). – С. 220–231. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_220.
8. Муратбаев Э.Х., Судариков А.Е. 3D моделирование крепления горных выработок // Сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 241–246.
9. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В. Геофизический мониторинг разработки напряженно-деформированных рудовмещающих массивов // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 63–73. DOI: 10.46698/VNC.2021.57.57.005.
10. Плешко М.С., Давыдов А.А., Сильченко Ю.А., Каледин О.С. Эффективные решения по креплению сверхглубокого ствола СКС-1 рудника «Скалистый» в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. – 2020. – № 6. – С. 57–62. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.08.
11. Плешко М.С., Лобанов Е.А., Волков Д.С., Муштекенов Т.С. Опыт проходки и крепления сверхглубоких горных выработок рудника «Скалистый» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Горный журнал. – 2022. – № 7. – С. 32–37. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.05.
12. Behnia D., Behnia M., Shahriar K., Goshtasbi K. A new predictive model for rock strength parameters utilizing GEP method // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 191. – pp. 591–599. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.222.

13. Candida F. Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming // *Advances in Complex Systems*. – 2002. – Vol. 5. No. 4. – pp. 389–408. DOI: 10.1142/S0219525902000626.
14. Dehghani H., Jodeiri Shokri B., Mohammadzadeh H., Shamsi R., Abbas Salimi N. Predicting and controlling the ground vibration using gene expression programming (GEP) and teaching–learning-based optimization (TLBO) algorithms // *Environmental Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 80. No. 22. – pp. 1–15. DOI: 10.1007/s12665-021-10052-7.
15. Monjezi M., Dehghani H., Shakeri J., Mehrdaneh A. Optimization of prediction of flyrock using linear multivariate regression (LMR) and gene expression programming (GEP) – Topal Novin mine, Iran // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – Vol. 14. No. 15. – pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12517-021-07772-2.
16. Ozbek A., Unsal M., Dikec A. Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2013. – No. 5. – pp. 325–329. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.006.
17. Shirani F.R., Salimi A., Monjezi M., Ebrahimabadi A., Moormann Ch. Roadheader performance prediction using genetic programming (GP) and gene expression programming (GEP) techniques // *Environmental Earth Sciences*. – 2017. – Vol. 76. No. 16. – pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12665-017-6920-2.
18. Zhang R., Xue X., Deng C. Investigation of motion characteristics of catastrophic landslide using material point method and gene expression programming // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2023. – Vol. 170. – pp. 105507. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105507.

References

1. Balek A.E., Kharisov T.F., Koptiyakov D.A. Justification of the brittle mode of fracture in low-strength highly fractured rock massifs. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2024. No. 4. pp. 795–811. (In Russ.)
2. Gabaraev O.Z., Abdulkhalimov A.G., Kelekhsaev V.B., Dzaparov V.Kh. Procedure for calculation of load on newly erected support during reconstruction of mine workings. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2020. No. 7. pp. 54–58. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-54-58. (In Russ.)
3. Golovin K.A., Kopylov A.B., Sushkov S.L., Sushkov A.D. On the determination of loads on mine support. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2024. No. 4. pp. 186–188. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-186-187. (In Russ.)
4. Kachurin N.M., Solovyov D.A., Solovyov R.A., Stas P.P. Stress-strain state of the concrete support at the intersections of a vertical shaft with the pit bottom station workings *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2024. No. 1. pp. 528–537. (In Russ.)
5. Korchak P.A. Geomechanical prediction of the development of brittle fracture zones in the vicinity of mine working intersections in an overstressed rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2021. No. 5. pp. 85–98. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-5-0-85. (In Russ.)
6. Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. Analysis of existing methods for calculating combined supports of mine workings. *Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry*. 2023. No. 3. pp. 67–73. (In Russ.)
7. Mataev A.K., Abeuov E.A., Zeitinova Sh.B., Shayke N.K., Lozynskiy V. Investigation of the geomechanical situation in the rock mass in the zone of influence of stoping operations under the conditions of the Khromtau deposit mine. *University Proceedings*. 2023. No. 3(92). pp. 220–231. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_220. (In Russ.)
8. Muratbakeev E.Kh., Sudarikov A.E. 3D modeling of mine support. In: *Proceedings of the IV All-Russian Scientific Conference “Modern Educational Technologies in the Training of Specialists for the Mineral and Raw Material Complex”*. Saint Petersburg. Saint Petersburg Mining University. 2021. pp. 241–246. (In Russ.)
9. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V. Geophysical monitoring of the development of stress-deformed ore massives. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 63–73. DOI: 10.46698/VNC.2021.57.57.005. (In Russ.)
10. Pleshko M.S., Davydov A.A., Silchenko Yu.A., Kaledin O.S. Effective solutions for supporting the super-deep SKS-1 shaft of the Skalisty mine in complex geomechanical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 6. pp. 57–62. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.08. (In Russ.)

11. Pleshko M.S., Lobanov E.A., Volkov D.S., Mushtekov T.S. Experience in driving and supporting super-deep mine workings of the Skalisty mine, Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel. *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 7. pp. 32–37. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.05. (In Russ.)
12. Behnia D., Behnia M., Shahriar K., Goshtasbi K. A new predictive model for rock strength parameters utilizing GEP method. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. pp. 591–599. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.222.
13. Candida F. Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming. *Advances in Complex Systems*. 2002. Vol. 5. No. 4. pp. 389–408. DOI: 10.1142/S0219525902000626.
14. Dehghani H., Jodeiri Shokri B., Mohammadzadeh H., Shamsi R., Abbas Salimi N. Predicting and controlling the ground vibration using gene expression programming (GEP) and teaching–learning-based optimization (TLBO) algorithms. *Environmental Earth Sciences*. 2021. Vol. 80. No. 22. pp. 1–15. DOI: 10.1007/s12665-021-10052-7.
15. Monjezi M., Dehghani H., Shakeri J., Mehrdanesh A. Optimization of prediction of flyrock using linear multivariate regression (LMR) and gene expression programming (GEP) – Topal Novin mine, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. No. 15. pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12517-021-07772-2.
16. Ozbek A., Unsal M., Dikec A. Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. No. 5. pp. 325–329. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.006.
17. Shirani F.R., Salimi A., Monjezi M., Ebrahimabadi A., Moormann Ch. Roadheader performance prediction using genetic programming (GP) and gene expression programming (GEP) techniques. *Environmental Earth Sciences*. 2017. Vol. 76. No. 16. pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12665-017-6920-2.
18. Zhang R., Xue X., Deng C. Investigation of motion characteristics of catastrophic landslide using material point method and gene expression programming. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023. Vol. 170. pp. 105507. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105507.

УДК 528.94: 911.52

DOI: 10.46698/VNC.2026.13.84.001

Оригинальная статья

Кластеризация рельефа и землепользования в муниципальных образованиях Северного Кавказа

Е.Ю. Колбовский^{1,2}, А.Н. Гуня¹, А.Ж. Пуреховский¹

¹ Институт географии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29,
e-mail: a.n.gunya@igras.ru;

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Статья поступила: 17.07.2026, доработана: 11.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Обусловлена необходимостью оценки влияния горности на развитие регионов и муниципальных образований, находящихся в неблагоприятных условиях по отношению к равнинам. **Цель исследования** – оценка связи между рельефом и использованием земель на основе кластеризации муниципальных образований (округов и районов) Северного Кавказа. **Методы исследования.** Геоинформационный анализ рельефа и данных дистанционного зондирования позволил выполнить типизацию муниципальных образований и выделить кластеры по связи типов рельефа и типов земельного покрова. Для проверки связи между типами рельефа и характером землепользования была создана таблица сопряженности двух растров (растра мезоформ рельефа по 4 признакам и растра мозаики ландшафтного покрова и землепользования). **Результаты работы.** Объективные инструменты кластеризации позволили выявить высокие уровни эффективности кластеризации ($\text{Ratio} = 0,94$) при выделении 9–10 кластеров муниципальных образований Северного Кавказа. Такой порядок дифференциации территории вполне отвечает запросам практики, поскольку учитывает наиболее значимые различия. Разделение МО по данным критериям может быть положено в основу выравнивающих коэффициентов при поддержке развития. Разные полюса при этом занимают высокогорные МО (всего 15 МО) и высокоурбанизированные (10). Между ними располагается спектр МО, характеризующихся различным сочетанием рельефа и преобладающих типов использования.

Ключевые слова: муниципальные образования, Северный Кавказ, рельеф, земельный покров, кластеризация.

Благодарности: Статья подготовлена по материалам исследований по теме Государственного задания ИГ РАН.

Для цитирования: Колбовский Е.Ю., Гуня А.Н., Пуреховский А.Ж. Кластеризация рельефа и землепользования в муниципальных образованиях Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.13.84.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.13.84.001

Original paper

Clustering of terrain and land use in municipalities of the North Caucasus

E.Yu. Kolbovsky^{1,2}, A.N. Gunya¹, A.Zh. Purekhovsky¹

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: a.n.gunya@igras.ru;

² Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991,
Russian Federation

Received: 17.07.2026, revised: 11.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The relevance of the work is determined by the need to assess the influence of mountain conditions on the development of regions and municipalities that are in unfavourable conditions relative to the plains. **The aim** of the paper is to assess the relationship between terrain and land use based on clustering of municipalities (districts and areas) of the North Caucasus. **Methods.** Geoinformation analysis of terrain and remote sensing data made it possible to typify municipalities and to distinguish clusters by the relationship between terrain types and land cover types. To test the relationship between terrain types and land use, a contingency table of two rasters (a raster of terrain mesoforms by 4 features and a raster of the landscape cover and land use mosaic) was created. **Results.** Objective clustering tools revealed high levels of clustering efficiency (Ratio = 0.94) when distinguishing 9–10 clusters of the North Caucasus municipalities. Such an order of territorial differentiation fully meets practical demands, since it accounts for the most significant differences. The division of municipalities by these criteria may serve as a basis for equalizing coefficients in development support. The opposite poles are occupied by high-mountain municipalities (15 in total) and highly urbanized ones (10). Between them lies a spectrum of municipalities characterized by various combinations of terrain and prevailing land use types.

Keywords: municipalities, North Caucasus, terrain, land cover, clustering.

Acknowledgments: The article is based on research under the State Task of the Institute of Geography, Russian Academy of Sciences.

For citation: Kolbovsky E.Yu., Gunya A.N., Purekhovsky A.Zh. Clustering of terrain and land use in municipalities of the North Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.13.84.001

Введение

Рельеф является основным параметром, характеризующим горные территории. Однако влияние горных условий на человека далеко не всегда можно выразить чисто геоморфологическими параметрами: важную информацию о сложности природных условий даёт реальное использование тех или иных горных территорий и горного ландшафта в целом. Высокие горы и горные хребты являются настолько доминирующими элементами ландшафта, что они просто не могут не оказывать влияния на повседневную действительность жизни и, следовательно, социально-экономическое развитие. Различия между горным регионом и низменностью вполне достоверны и обнаруживаются при разных сценариях анализа [Атаев, 2025; Dematteis, 2018; Chilla, Lambracht, 2025]. Однако, какими бы правдоподобными эти различия ни казались на первый взгляд, при ближайшем рассмотрении вскрывается целый калейдоскоп сложностей, не

получающих объяснения в рамках традиционного подхода [Price, Kohler, 2013]. Так, например, в некоторых горных районах фиксируется социально-экономический спад [Capello, Cerisola, 2019; Modica, 2019], но при этом в непосредственной близости наблюдается нехватка жилья [Cede et al., 2018; Membretti, Lucchini, 2018], что не мешает этим же районам быть известными туристическими центрами с высокой миграционной активностью [Perlik, 2019; Drouet, Barrioz, 2024] даже на фоне плохой доступности в условиях сложного рельефа [Chilla et al., 2022].

Тем не менее в общем принято считать, что ограниченные возможности для развития, как правило, усугубляют проблемы территориального планирования и застройки, в частности в том, что касается сбалансированности экологических и социально-экономических требований [Elsen et al., 2020; Meyer et al., 2022; Bertram et al., 2024]. Отсюда – непрекращающиеся попытки анализировать причинно-следственные связи между характером «горности» и социально-экономическим развитием [Thornton et al., 2022] с опорой на существующие подходы к классификации на основе рельефа [Xuan, Xudong, 2024; Петров, 2023]. Общая методология таких исследований – поиск корреляции между природными особенностями, в основном рельефом, и социально-экономическими данными. В практическом плане проще всего связать «горность» с конкретными аспектами регионального развития – застройкой, прокладыванием и поддержанием транспортной сети, с выходом на усложнение и удорожание [Job et al., 2020]. Аналогичные оценки приводились в советской (а затем российской) практике территориального планирования [Бабурин и др., 2010]. Такая же специфика отмечается и в производстве сельскохозяйственной продукции (конкретная специализация и удорожание), и в лесном хозяйстве (сложности лесозаготовки и необходимость выделения целого спектра разнообразных охраняемых участков насаждений).

Целью данной статьи является оценка связи между рельефом и использованием земель на основе кластеризации муниципальных образований (МО – округов и районов) Северного Кавказа. Работа является продолжением исследований, начатых авторами и посвященных оценке вклада геоморфологических условий и динамики наземного покрова в проекции на задачи комплексного районирования условий жизнеобеспечения и хозяйствования [Гуля и др., 2025].

Материалы и методы исследования

В основу работы положено геоинформационное моделирование рельефа и использования земель в границах МО Северного Кавказа, ставших операционно-территориальными единицами (ОТЕ) исследования (всего 173 округа и района). Сетка для них была трансформирована для достижения относительно равновеликих размеров полигонов посредством избавления от небольших по площади ОТЕ.

Для извлечения параметров рельефа использовалась последняя версия SRTM (30 м). В качестве методов использовались инструменты программного пакета GeoDa [Anselin, 2024], позволяющие осуществлять индивидуальную и типологическую кластеризацию с контролем пространственных ограничений и использованием матрицы связности ОТЕ. Типологизация рельефа проводилась инструментом K-Means Clustering for Grids (SAGA GIS) с опцией Minimum Distance / Hill climbing. Оптимальное число кластеров определялось по случайной сетке векторных точек с извлеченными в них значениями привлеченных растров методом NB-Cluster с верификацией по стандартному отклонению значений внутри каждого кластера после процедуры кластеризации.

Выбранные параметры извлекались в полигоны МО инструментом Grid Statistics for Polygons (SAGA GIS) для определения характера горности. Кластеризация проводилась в программном комплексе GeoDa методом K-Medians++ со стандартизацией исходных значений, случайной инициализацией и функцией расстояния Manhattan. В этом случае оптимальное число кластеров определялось методом «проб и ошибок»:

постепенным увеличением числа кластеров с оценкой эффективности кластеризации (Ratio) как отношения суммы квадратов расстояний между кластерами к общей сумме квадратов расстояний [Anselin, 2024].

Землепользование моделировалось на основе покрытия GLAD ARD (Global Land Analysis and Discovery – Analysis Ready Data), подготовленного в Мэрилендском университете на основе полного архива съёмки Landsat [Potapov et al., 2020] с масштабом 30 м в пикселе. Картографирование типов наземного покрова выполнено методом машинного обучения на основе ансамбля деревьев решений (Classification and Regression Trees, CART) с бэггингом – бутстрэп-агрегацией, снижающей переобучение модели, реализованным в GLAD Tools [Potapov et al., 2023]. Для каждого целевого класса эксперт вручную оцифровывал обучающие полигоны двух категорий – «целевой» и «фоновой»; по ним модель оценивала для каждого пикселя вероятность принадлежности к искомому типу покрова, а иерархическая (последовательная) классификация с наложением масок ранее выделенных классов позволяла корректно разделить весь спектр категорий (хвойные, смешанные и широколиственные леса, пастбища, сельхозугодья, застроенные территории, переувлажнённые участки, акватории, непокрытые растительностью поверхности, вечные снега и льды). Итоговая мозаика наземного покрова и землепользования, а также площади выделенных классов оценивались по независимой стратифицированной выборке эталонных участков с расчётом общей точности и её стандартной ошибки. Валидация полученных классов проводилась на основе полевых данных, полученных авторами в ходе экспедиций на территории Адыгеи, Карачаево-Черкесии, Чечни, Северной Осетии и Ингушетии в период с 2018 по 2026 гг. Особое внимание уделялось идентификациям пастбищных угодий, которые традиционно сложно отделить от природных лугов (grassland в принятых глобальных классификациях наземного покрова). Типизация МО по специфике ландшафтного покрова и характеру землепользования была проведена в ПК GeoDa (алгоритм K-Medians++) с предварительным определением оптимального числа ступеней классификации.

Особый интерес в рамках данного исследования представляла связь между типами рельефа и характером землепользования, которая, как считается, жёстко задаёт параметры хозяйствования. Для проверки данной гипотезы была создана таблица сопряжённости двух растров (растра мезоформ рельефа по 4 признакам и растра мозаики ландшафтного покрова и землепользования) инструментом Tabulate Area (ArcGIS 10.8). В этой таблице в строках – категории землепользования, а в колонках «вклад» разных типов мезоформ рельефа. Как известно, для выявления связи между категориальными данными оптимально использовать коэффициент сопряжённости Пирсона (C), который был рассчитан специальным скриптом на языке R с получением тепловой карты, наглядно отображающей характер и силу связи.

Основные результаты и обсуждение

Кластеризация по параметрам рельефа

Для типологического районирования МО Северного Кавказа по параметрам рельефа (высота, уклон, индекс пересечённости рельефа, глубина долин) высокое значение эффективности кластеризации (Ratio = 0,94) было достигнуто при числе кластеров 9. Результат кластеризации отображён на рисунке 1, а основные характеристики кластеров приведены в таблице 1.

Кластеризация «горности» весьма чётко дифференцирует регион, выделяя МО с выраженным классическим альпийским рельефом, приподнятые равнины и предгорья. Характерно, что в отдельные кластеры выделились три типа с преобладанием удлинённых асимметричных куэстовых гряд (6, 7 и 8), которые хорошо фиксируются на местности, в частности при пересечении всего макрорегиона по дороге от Минеральных Вод до Теберды.

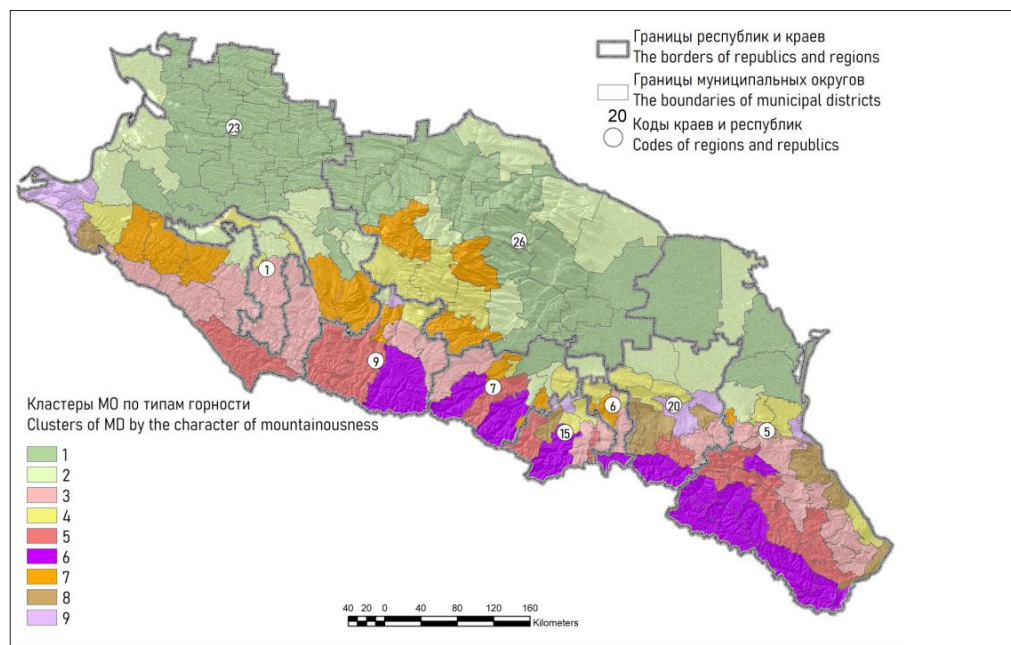


Рис. 1. Кластеризация МО Северного Кавказа по характеру горности с учётом признаков: нормализованная высота, уклон, индекс пересечённости рельефа, глубина долин /
Fig. 1. Clustering of the North Caucasus municipalities by the character of mountainousness accounting for the features: normalized height, slope, terrain ruggedness index, valley depth

Таблица 1 / Table 1

Кластеры МО по характеру горности /
Clusters of municipalities by the character of mountainousness

№	Норм. высота / Normalized height	Уклон / Slope	Индекс пересечённости рельефа / Terrain ruggedness index	Глубина долин / Valley depth	Кластеры / Clusters
1	29,2	0,7	1,1	6,4	Слаборасчленённые предгорья / Weakly dissected foothills
2	2133,6	21,8	25,7	160,5	Высокогорья / Highlands
3	1265,7	13,9	16,0	81,0	Среднегорья / Mid-mountain areas
4	155,1	1,0	1,4	9,2	Слаборасчленённые предгорно- равнинные территории / Slightly dissected foothill-plains
5	481,7	5,5	6,1	37,1	Расчленённые предгорья / Dissected foothills
6	225,9	1,5	1,9	15,4	Предгорно-равнинные / Foothill-plains
7	443,4	2,6	2,9	27,3	Низкогорно-предгорные куэстовые / Low-mountain and piedmont cuesta-type
8	748,8	9,7	10,8	57,0	Низкогорья / Low mountains
9	103,8	3,2	3,8	25,3	Предгорно-низкогорные расчленённые / Dissected low-mountain and foothill terrain

Кластеризация по характеру землепользования

Районирование МО по характеру землепользования позволило выявить 15 достаточно чётко выделяющихся типов, совокупно отображающих как актуальную ситуацию, так и историю освоения и этноукоренённые традиции природопользования. Общая эффективность кластеризации – 0,70 (рис. 2, табл. 2).

Карта отражает интегральное воздействие сразу нескольких факторов: различия в «горности» с разным сочетанием форм высоких хребтов и предгорий, межгорных котловин и глубоких долин, зональные ландшафтные различия степной и лесной (в том числе горно-лесной) зон и историческую последовательность сельскохозяйственного освоения, как раннего (в рамках Российской империи), так и советской эпохи.

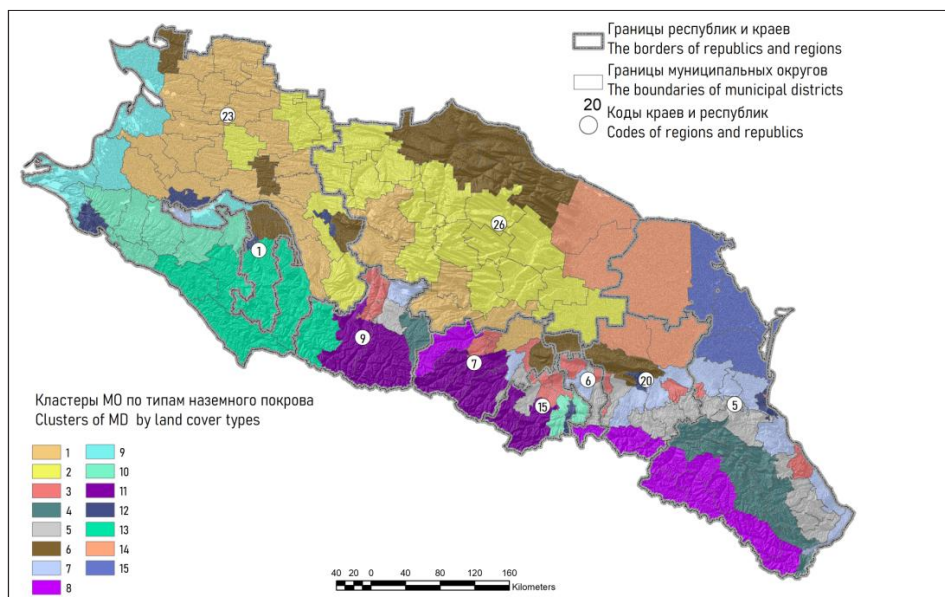


Рис. 2. Типизация МО Северного Кавказа по типам наземного покрова и землепользования (см. табл. 2) /

Fig. 2. Classification of the North Caucasus municipalities by categories of landscape cover and land use (see Table 2)

Таблица 2 / Table 2

Типы МО Северного Кавказа по категориям ландшафтного покрова и землепользования /
Types of the North Caucasus municipalities by categories of landscape cover and land use

Номер кластера (рис. 2) / number of cluster (fig. 2)	Кол-во МО / Number of municipalities	Характеристика / Characteristic
Высокогорные / High-altitude		
11	7	максимальные значения земель без растительности и нивальных ландшафтов, площади хвойных лесов, близкая к минимальной застроенность / maximum proportions of unvegetated land and nival landscapes, significant coniferous forest cover, and near-minimal built-up area
8	8	близкие к максимальной площади незадернованных территорий, нивальных комплексов и хвойных лесов, минимум сельхозугодий / extensive areas of bare soil (lacking turf cover), nival complexes, and coniferous forests, with minimal agricultural land

Горные лесопокрываемые / Forested mountainous areas		
13	7	макс. значения всех типов леса, минимум сельхозугодий / with maximum values for all forest types and minimum agricultural land
10	7	значительная площадь лиственных и смешанных лесов, среднезастроенные и с заметной долей сельхозугодий / a significant area of deciduous and mixed forests, with moderate levels of built-up areas, a notable proportion of agricultural land
Прибрежные (западные) / Coastal (western)		
9	6	значительная доля сельхозземель и увлажнённых участков, низкая доля лесопокрываемых земель / a significant proportion of agricultural land and wet areas, a low proportion of forest-covered land
Предгорные и низкорослые / Foothill and low-mountain		
7	12	преобладание средних показателей по большинству параметров / predominance of average values across the majority of parameters
4	16	значительный ареал хвойных лесов, минимум пашни и застроенности на фоне значительной площади пастбищ / a vast area of coniferous forests, minimal cropland and built-up areas, and a significant expanse of pastureland
5	14	средние показатели залесённости и площадей пастбищ / average indicators of forest cover and pasture areas
3	18	пригородные, со средними показателями застроенности и сельскохозяйственной освоенности / suburban areas with moderate level of built-up areas and agricultural use
Равнинные плоские, холмистые и грядово-холмистые эрозионно-расчленённые сельскохозяйственно-освоенные районы / Agriculturally developed areas characterized by flat plains, rolling terrain, and ridges and hills dissected by erosion		
2	20	максимальные показатели площади сельхозугодий, минимальные – по лесистости, с относительно невысокой степенью застроенности / maximum figures for agricultural land area, minimum for forest cover, and a relatively low degree of built-up area
1	24	высокие значения площади сельхозугодий, минимальные показатели площади лугов и пастбищ на фоне средней застроенности и низких значений лесистости / high values for agricultural land area, minimal figures for meadow and pasture area, against a backdrop of average built-up area and low forest cover
14	5	максимальные показатели площади пастбищ и минимальные – лесистости, высокие показатели распаханности / maximum indicators of pasture area and minimum indicators of forest cover, high indicators of plowing
6	14	значительная сельскохозяйственная освоенность и невысокая доля застройки / significant agricultural development and a low proportion of built-up area
Урбанизированные / Urbanized		
12	7	городские с максимальными значениями застроенности / Urban areas with maximum built-up density
15	3	сельские с высокой плотностью населения и индивидуальной застройкой / Rural areas with high population density and detached housing

Зависимость характера землепользования от рельефа

Для построения матрицы сопряжённости предварительно для территории Северного Кавказа кластерным анализом с привлечением параметров нормализованной высоты, уклона, пересеченности рельефа и глубины долин был построен растр мезоформ рельефа с выделением 10 типов (рис. 3).

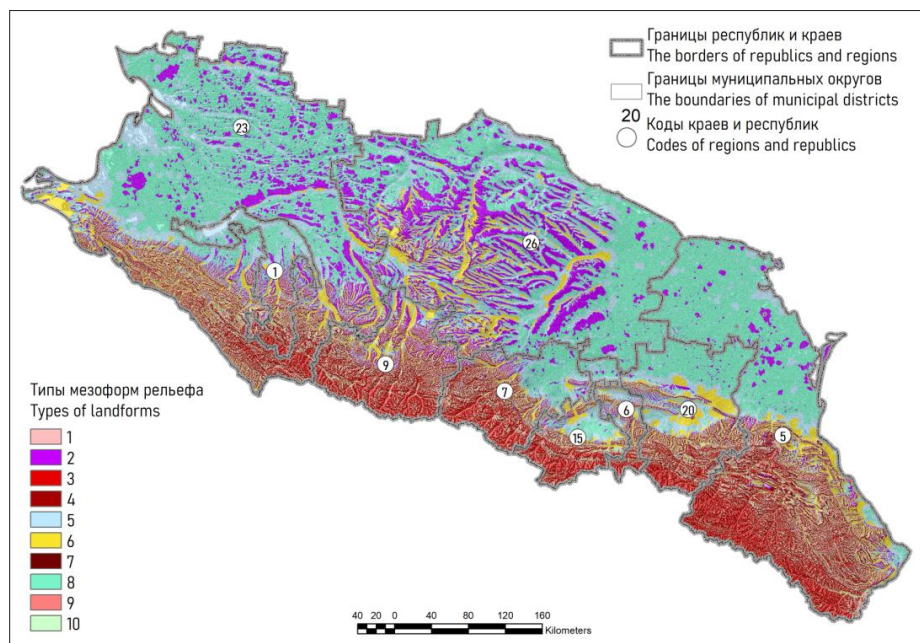


Рис. 3. Типы мезоформ рельефа Северного Кавказа:

1 – нижние части невысоких хребтов, умеренно крутые; 2 – пригребневые плоские невысоких хребтов и вытянутых куэст предгорий; 3 – средние части склонов хребтов с макс. крутизной; 4 – привершинные поверхности крупных массивов; 5 – протяжённые предгорные склоны и шлейфы, а также бортовые части и днища неглубоких долин; 6 – пологие и наклонные собирающие склоны, днища неглубоких долин и предгорных плато; 7 – пригребневые высоких хребтов альпийского типа; 8 – предгорные плоские равнины с мин. пересечённостью и мин. уклоном; 9 – нижние части склонов хребтов с макс. глубиной долин со склонами средней крутизны; 10 – горные распадки, вогнутые собирающие поверхности между контрфорсами и верховья горных долин /

Fig. 3. Types of mesoforms of the relief of the North Caucasus:

1 – lower parts of low ridges, moderately steep; 2 – flat flat ridges and elongated foothills; 3 – middle parts of the slopes of ridges with maximum steepness; 4 – the upper surfaces of large massifs; 5 – extended foothill slopes and plumes, as well as the sides and bottoms of shallow valleys; 6 – gentle and inclined collecting slopes, bottoms of shallow valleys and foothill plateaus; 7 – ridge high ridges of the Alpine type; 8 – foothill flat plains with min. by bias; 9 – the lower parts of the slopes of ridges with a maximum depth of valleys with slopes of medium steepness; 10 – mountain depressions, concave collecting surfaces between buttresses and mountain valleys

Матрица сопряжённости между мезоформами рельефа и категориями землепользования приведена в таблице 3. Высокие положительные значения обозначают приуроченность соответствующей категории ландшафтного покрова и землепользования к данной форме мезорельефа, высокие отрицательные свидетельствуют об обратном: данная категория не встречается на соответствующей форме рельефа. Так, хвойные леса обнаруживают связь со средними (в меньшей степени с нижними) частями крутых склонов хребтов и привершинными поверхностями крупных массивов, смешанные леса – с пригребневыми поверхностями высоких хребтов альпийского типа и вогнутыми склонами горных распадков, широколиственные леса чётко приурочены к нижним частям невысоких умеренно крутых хребтов. Непокрытые естественной растительностью поверхности и скальники приурочены к привершинным поверхностям крупных массивов, а также нижним частям склонов горных распадков (часто осыпных и оползневых). Довольно тесная связь проявляется между застроенными территориями и пологими и наклонными склонами, поверхностями предгорных плато, а также днищами неглубоких долин. Сельхозугодья ожидаемо «проецируются» на пригребневые

плоские поверхности невысоких хребтов и вытянутых куэст предгорий и предгорные плоские равнины. Современные пастбища оказались приуроченными к вогнутым склонам горных распадков между основными контрфорсами. На первый взгляд неожиданной выглядит связь вечных снегов и ледников с нижними частями склонов средней крутизны с максимальной глубиной долин, но надо понимать, что речь идёт о склонах наиболее поднятых и главных хребтов.

Общий коэффициент сопряжённости C между растрами типов рельефа и категориями наземного покрова составил 0,67, что считается весьма высоким показателем. Так, значения коэффициента сопряжённости, выявленные между характером рельефа и землепользованием в других горных регионах мира, показывают низкие значения для равнин (например, 0,3 для средней полосы России), а наиболее высокие – для террасированных полей в горах Азии (более 0,7).

Таблица 3 / Table 3

**Матрица сопряжённости мезоформ рельефа и категорий земельного покрова /
Contingency matrix of relief mesoforms and land cover categories**

Категория / № мезоформы Category / Mesoform No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Хвойный лес / Coniferous forest	0,72	−0,19	0,68	0,54	−0,19	−0,14	0,89	−0,32	0,48	0,19
Смешанный лес / Mixed forest	0,37	−0,18	0,29	0,38	−0,23	−0,12	0,42	−0,36	0,14	0,35
Лиственный лес / Deciduous forest	0,99	−0,25	0,15	0,21	−0,32	0,33	0,78	−0,79	0,38	0,41
Оголённые участки / bare land	0,43	−0,28	0,77	0,12	−0,30	−0,21	0,16	−0,46	0,44	0,31
Пастбища / pastures	0,16	−0,49	0,21	0,17	−0,29	0,12	0,20	0,033	0,18	0,28
Пахотные земли / arable land	−0,72	0,78	−0,60	−0,67	0,035	−0,20	−0,69	0,69	−0,39	−0,60
Застроенные территории / built-up areas	−0,65	−0,43	−0,46	−0,59	0,74	0,13	−0,69	0,14	−0,24	−0,27
Болота / wetlands	−0,20	−0,17	−0,16	−0,18	0,66	−0,91	−0,20	0,22	−0,99	−0,16
Вода / water	−0,11	−0,14	−0,86	−0,96	0,40	0,26	−0,11	−0,14	−0,14	−0,70
Снег и лёд / Snow and Ice	−0,18	−0,76	0,32	0,13	−0,80	−0,59	−0,31	−0,12	0,42	0,86

Заключение

В результате геоинформационного моделирования было охарактеризовано разнообразие МО Северного Кавказа по геоморфологическим признакам, сочетанию использования земель и подсчитана сопряжённость между рельефом и категориями земельного покрова. Объективные инструменты кластеризации позволили выявить высокие уровни эффективности кластеризации ($\text{Ratio} = 0,94$) при выделении 9–10 кластеров муниципальных образований Северного Кавказа. Такой порядок дифференциации территории вполне отвечает запросам практики, поскольку учитывает наиболее значимые различия. Разделение МО по данным критериям может быть положено в основу выравнивающих коэффициентов при поддержке развития. Разные полюса при этом занимают высокогорные МО (всего 15 МО) и высокоурбанизированные (10). Между ними располагается спектр МО, характеризующихся различным сочетанием рельефа и преобладающих типов использования.

Литература

1. Атаев З.В. Теоретико-методологические основы и региональные особенности выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных геосистем // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v.
2. Бабурин В.Л., Горячко М.Д., Кириллов П.Л. Методы оценки факторов удорожания проживания населения и ведения хозяйственной деятельности в горах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2010. – Т. 2. № 3. – С. 99–106.
3. Гуня А.Н., Колбовский Е.Ю., Петров Л.А., Дмитриев В.А. Горные районы Северного Кавказа: критерии выделения и кластеризация // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2025. – Т. 10. № 2(40). – С. 18–22. DOI: 10.25744/genb.2025.40.2.003.
4. Петров Л.А. Геологические и геоморфометрические факторы формирования ареалов земледельческих террас среднегорной Чечни // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 162–176. DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013
5. Anselin L. An introduction to spatial data science with GeoDa. Vol. 2: Clustering Spatial Data. 2024.
6. Bertram D., Lambracht M., Chilla T. Settlement systems in mountain regions: A research gap? // Mountain Research and Development. – 2024. – Vol. 44. No. 2. – pp. A1–A9. DOI: 10.1659/mrd.2023.00021.
7. Capello R., Cerisola S. Competitiveness through integration in the European Union Strategy for the Alpine Region: A “balanced development” approach // European Planning Studies. – 2019. – Vol. 27. No. 5. – pp. 1013–1034. DOI: 10.1080/09654313.2019.1588860.
8. Cede P., Deissl G., Löffler R., Steinicke E. The Eastern Austrian Alps: Their exceptional demographic status in the Alpine region // European Countryside. – 2018. – Vol. 10. No. 4. – pp. 634–651.
9. Chilla T., Lambracht M. Arge Alp: a strong region despite or because of the mountains? // FAU Regional Development Working Paper No. 7. – Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2025. – DOI: 10.13140/RG.2.2.32859.84007.
10. Chilla T., Bertram D., Lambracht M. Alpine Towns: Key to sustainable development in the Alpine Region // Part 1: Facts, Maps and Scientific Debates. In: 9th Report on the State of the Alps. – Innsbruck: Alpine Convention, 2022. – DOI: 10.13140/RG.2.2.36022.98880/1.
11. Dematteis G. The alpine metropolitan-mountain faced with global challenges. Reflections on the case of Turin // Journal of Alpine Research. – 2018. – Vol. 106. No. 2. – DOI: 10.4000/rga.4402.
12. Drouet Q.B.G., Barrioz A. “Altitudinal gentrification” and “social descent in the valley” through the lens of housing access in the French Alps // Journal of Alpine Research. – 2024. – Vol. 112. No. 3. – 18 p. DOI: 10.4000/139tt.
13. Elsen P.R., Monahan W.B., Merenlender A.M. Topography and human pressure in mountain ranges alter expected species responses to climate change // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11. – 10 p. DOI: 10.1038/s41467-020-15881-x.
14. Job H., Willi G., Mayer M., Putz M. Open spaces in Alpine countries: Analytical concepts and preservation strategies in spatial planning // Mountain Research and Development. – 2020. – Vol. 40. No. 3. – pp. D1–D11. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00016.1.
15. Membretti A., Lucchini F. Foreign immigration and housing issues in small alpine villages: Housing as a pull factor for new highlanders // In: Processes of Immigration in Rural Europe: The Status Quo, Implications and Development Strategies / Eds. S. Kordel, T. Weidinger, I. Jelen. – Newcastle: Cambridge Scholars, 2018. – pp. 203–219.
16. Meyer C., Job H., Laner P., Omizzolo A., Kollmann N., Clare J., Vesely P., Riedler W., Plassmann G., Coronado O. Open Space Alps Planning Handbook: Perspectives for Consistent Safeguarding of Open Spaces in the Alpine Region. – Salzburg: OpenSpaceAlps, 2022. – 114 p. DOI: 10.25972/OPUS-27040.
17. Modica M. Industrial brownfield sites in the Alps. A first quantitative overview and potential implications for regional development // Journal of Alpine Research. – 2019. – Vol. 107. No. 1. – DOI: 10.4000/rga.5274.
18. Perlik M. The spatial and economic transformation of mountain regions. – London: Routledge, 2019. – 302 p. DOI: 10.4324/9781315768366.
19. Potapov P., Hansen M.C., Kommareddy I., Kommareddy A., Turubanova S., Pickens A., Adusei B., Tyukavina A., Ying Q. Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – Art. No. 426. DOI: 10.3390/rs12030426.

20. Potapov P., Tyukavina A., Hansen M.C. GLAD Tools V2.0. Quick Start Guide. Global Land Analysis and Discovery Team, University of Maryland, 2023. – 49 p.
21. Price M.F., Kohler T. Sustainable mountain development // *Mountain Geography: Physical and Human Dimensions* / Eds. M.F. Price, A.C. Byers, D.A. Friend, T. Kohler, L.W. Price. – Berkeley: University of California Press, 2013. – pp. 345–387.
22. Thornton J.M., Snethlage M.A., Sayre R., Urbach D.R., Viviroli D., Ehrlich D., Muccione V., Wester P., Insarov G., Adler C. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls // *PLoS ONE*. – 2022. – Vol. 17. No. 7. – 27 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0271466.
23. Xuan C., Xudong L. The imbalanced pattern of population and economy and its influencing factors in the Wumeng mountain area // *Journal of Resources and Ecology*. – 2024. – Vol. 15. No. 4. – pp. 937–950. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2024.04.015.

References

1. Ataev Z.V. Theoretical and methodological foundations and regional specifics of delineating foothill landscapes as independent geosystems. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. pp. 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v. (In Russ.)
2. Baburin V.L., Goryachko M.D., Kirillov P.L. Methods for assessing the factors of increasing the cost of living and economic activity in the mountains. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2010. Vol. 2. No. 3. pp. 99–106. (In Russ.)
3. Gunya A.N., Kolbovsky E.Yu., Petrov L.A., Dmitriev V.A. Mountain areas of the North Caucasus: criteria for allocation and clustering. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2025. Vol. 10. No. 2(40). pp. 18–22. DOI: 10.25744/genb.2025.40.2.003. (In Russ.)
4. Petrov L.A. Geological and geomorphometric factors in the formation of agricultural terraced areas in mid-mountain Chechnya. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 162–176. DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013. (In Russ.)
5. Anselin L. An introduction to spatial data science with GeoDa. Vol. 2. *Clustering Spatial Data*. 2024.
6. Bertram D., Lambracht M., Chilla T. Settlement systems in mountain regions: A research gap? *Mountain Research and Development*. 2024. Vol. 44. No. 2. pp. A1–A9. DOI: 10.1659/mrd.2023.00021.
7. Capello R., Cerisola S. Competitiveness through integration in the European Union Strategy for the Alpine Region: A “balanced development” approach. *European Planning Studies*. 2019. Vol. 27. No. 5. pp. 1013–1034. DOI: 10.1080/09654313.2019.1588860.
8. Cede P., Deissl G., Löffler R., Steinicke E. The Eastern Austrian Alps: Their exceptional demographic status in the Alpine region. *European Countryside*. 2018. Vol. 10. No. 4. pp. 634–651.
9. Chilla T., Lambracht M. Arge Alp: a strong region despite or because of the mountains? FAU Regional Development Working Paper No. 7. Erlangen. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.32859.84007.
10. Chilla T., Bertram D., Lambracht M. Alpine Towns: Key to sustainable development in the Alpine Region. Part 1: Facts, Maps and Scientific Debates. In: 9th Report on the State of the Alps. Innsbruck. Alpine Convention. 2022. DOI: 10.13140/RG.2.2.36022.98880/1.
11. Dematteis G. The alpine metropolitan-mountain faced with global challenges. Reflections on the case of Turin. *Journal of Alpine Research*. 2018. Vol. 106. No. 2. DOI: 10.4000/rga.4402.
12. Drouet Q.B.G., Barrioz A. “Altitudinal gentrification” and “social descent in the valley” through the lens of housing access in the French Alps. *Journal of Alpine Research*. 2024. Vol. 112. No. 3. 18 p. DOI: 10.4000/139tt.
13. Elsen P.R., Monahan W.B., Merenlender A.M. Topography and human pressure in mountain ranges alter expected species responses to climate change. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. 10 p. DOI: 10.1038/s41467-020-15881-x.
14. Job H., Willi G., Mayer M., Putz M. Open spaces in Alpine countries: Analytical concepts and preservation strategies in spatial planning. *Mountain Research and Development*. 2020. Vol. 40. No. 3. pp. D1–D11. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00016.1.
15. Membretti A., Lucchini F. Foreign immigration and housing issues in small alpine villages: Housing as a pull factor for new highlanders. In: *Processes of Immigration in Rural Europe: The Status Quo, Implications and Development Strategies*. Eds. S. Kordel, T. Weidinger, I. Jelen. Newcastle. Cambridge Scholars. 2018. pp. 203–219.

16. Meyer C., Job H., Laner P., Omizzolo A., Kollmann N., Clare J., Vesely P., Riedler W., Plassmann G., Coronado O. Open Space Alps Planning Handbook: Perspectives for Consistent Safeguarding of Open Spaces in the Alpine Region. Salzburg. OpenSpaceAlps. 2022. 114 p. DOI: 10.25972/OPUS-27040.
17. Modica M. Industrial brownfield sites in the Alps. A first quantitative overview and potential implications for regional development. *Journal of Alpine Research*. 2019. Vol. 107. No. 1. DOI: 10.4000/rga.5274.
18. Perlik M. The spatial and economic transformation of mountain regions. London. Routledge. 2019. 302 p. DOI: 10.4324/9781315768366.
19. Potapov P., Hansen M.C., Kommareddy I., Kommareddy A., Turubanova S., Pickens A., Adusei B., Tyukavina A., Ying Q. Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Art. No. 426. DOI: 10.3390/rs12030426.
20. Potapov P., Tyukavina A., Hansen M.C. GLAD Tools V2.0. Quick Start Guide. Global Land Analysis and Discovery Team, University of Maryland. 2023. 49 p.
21. Price M.F., Kohler T. Sustainable mountain development. *Mountain Geography: Physical and Human Dimensions*. Eds. M.F. Price, A.C. Byers, D.A. Friend, T. Kohler, L.W. Price. Berkeley. University of California Press. 2013. pp. 345–387.
22. Thornton J.M., Snethlage M.A., Sayre R., Urbach D.R., Viviroli D., Ehrlich D., Muccione V., Wester P., Insarov G., Adler C. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17. No. 7. 27 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0271466.
23. Xuan C., Xudong L. The imbalanced pattern of population and economy and its influencing factors in the Wumeng mountain area. *Journal of Resources and Ecology*. 2024. Vol. 15. No. 4. pp. 937–950. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2024.04.015.

УДК 550.2

DOI: 10.46698/VNC.2026.14.65.001

Оригинальная статья

Использование космической информации в комплексе с наземными геологическими исследованиями на территории Восточного Кавказа

О.А. Маммаев^{1,2}, А.С. Мамаев¹, Р.А. Магомедов¹

¹ Институт геологии ДФИЦ РАН, Россия, 367030,
г. Махачкала, ул. Ярагского, 75,
e-mail: ramag@yandex.ru;

² Институт проблем геотермии ВЭ ИВТ РАН, Россия,
367030, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, 39а,
e-mail: o_mammaev@rambler.ru

Статья поступила: 24.04.2026, доработана: 07.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Использование космической информации в разведочной геологии значительно повышает эффективность наземных геологических методов поиска месторождений различных полезных ископаемых. Особую роль и значимость приобретает использование космической информации на труднодоступных участках земной поверхности, таких как восточно-кавказский сегмент сооружения Большого Кавказа. **Цель исследования.** Анализ использования космической информации в выявлении и прослеживании дизъюнктивных нарушений и шовных зон в фундаменте и осадочном чехле региона, кольцевых структур, линеаментов и тектонических блоков различного уровня. **Методы исследования.** Основными методами исследования являются дешифрирование космических снимков, морфотектонический анализ, структурно-геоморфологический анализ, использование результатов тепловой съемки, а также анализ материалов геофизических исследований и бурения. **Результаты исследования.** В результате проведенных исследований дешифрированы крупные кольцевые структуры, такие как Терско-Кумская, Сулакская, морфоструктуры центрального типа (Верхнеандийская, Цурибская и Аргунская), которые в современный период являются активными, а также Хадумский купол, Талгинский свод и малые кольцевые структуры – Акушинская, Мекегинская. Применение космической информации совместно с наземными геологическими методами позволило выявить сеть дизъюнктивных нарушений, детализировать представления о тектоническом строении региона. Выделены крупные тектонические структуры, в том числе кольцевые структуры центрального типа, сдвиги и линеаменты.

Ключевые слова: космическая съемка, геологические структуры, тектонические нарушения, кольцевые структуры, структурно-геоморфологический анализ, тепловой поток.

Для цитирования: Маммаев О.А., Мамаев А.С., Магомедов Р.А. Использование космической информации в комплексе с наземными геологическими исследованиями на территории Восточного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.14.65.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.14.65.001

Original paper

The use of space-based information in conjunction with ground-based geological surveys in the Eastern Caucasus

O.A. Mammaev^{1,2}, A.S. Mamaev¹, R.A. Magomedov¹

¹ Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, 75 Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, Russian Federation, e-mail: ra-mag@yandex.ru;

² Institute of Problems of Geothermal Renewable Energy at the Institute of High temperatures, Russian Academy of Sciences, 39a I. Shamil Str., Makhachkala 367030, Russian Federation, e-mail: o_mammaev@rambler.ru

Received: 24.04.2026, revised: 07.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. The use of space-based information in exploration geology significantly increases the efficiency of ground-based geological methods for searching for deposits of various minerals. The use of space-based information in hard-to-reach areas of the Earth's surface, such as the Eastern Caucasus segment of the Greater Caucasus structure, plays a particularly important role. **Aim.** Analysis of the use of space-based information in identifying and tracing disjunctive faults and suture zones in the basement and sedimentary cover of the region, circular structures, lineaments, and tectonic blocks of various levels. **Methods.** The main research methods include interpretation of satellite images, morphotectonic analysis, structural-geomorphological analysis, the use of thermal survey data, and the analysis of geophysical and drilling data. **Results.** As a result of the conducted research, large ring structures such as the Tersko-Kumskaya, Sulakskaya, and central-type morph structures such as the Verkhneandiyaskaya, Tsuribskaya, and Argunskaya, which are active in the modern period, as well as the Khadumsky dome, the Talginsky vault, and small ring structures such as the Akushinskaya and Mekeginskaya, have been identified. The use of space-based information in conjunction with ground-based geological methods has made it possible to identify a network of disjunctive faults and to detail the tectonic structure of the region. Major tectonic structures have been identified, including central-type ring structures, strike-slip faults, and lineaments.

Keywords: space imagery, geological structures, tectonic disturbances, ring structures, structural-geomorphological analysis, and heat flow.

For citation: Mammaev O.A., Mamaev A.S., Magomedov R.A. The use of space-based information in conjunction with ground-based geological surveys in the Eastern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.14.65.001

Введение

В настоящее время в практику геолого-разведочных исследований прочно вошло использование космической информации в комплексе с наземными геологическими методами. Особую роль и значимость приобретает использование космической информации на труднодоступных участках земной поверхности, таких как Восточно-Кавказский сегмент сооружения Большого Кавказа и др. Глубинное строение докембрийского фундамента Восточного Кавказа под осадочным мезо-кайнозойским чехлом пока еще остается слабоизученным. Использование космической информации в комплексе с наземными геологическими методами способствует решению практических задач по освоению минерально-сырьевой базы региона.

Материал и методы исследования

Основой для проведения исследований послужили геологические фонды Института геологии и Территориальные геологические фонды Республики Дагестан (РД), материалы ранее проведенных нами исследований и др. Методы исследования включали дешифрирование космоснимков разного уровня генерализации, структурно-геоморфологический и морфотектонический анализы, анализ материалов тепловой съемки, а также материалов геофизических исследований и бурения. Результаты анализа проведенных исследований показывают, что на территории Восточного Кавказа обнаружено множество локальных структур, отражающих строение доюрского фундамента с блоковой структурой и сложно дислоцированным осадочным чехлом. Северный склон Сулакского выступа Нараттюбинской зоны изучен бурением [Буторин, Галин, 1972], которое подтвердило наличие разломной зоны, уходящей в палеозойский фундамент (рис. 1).

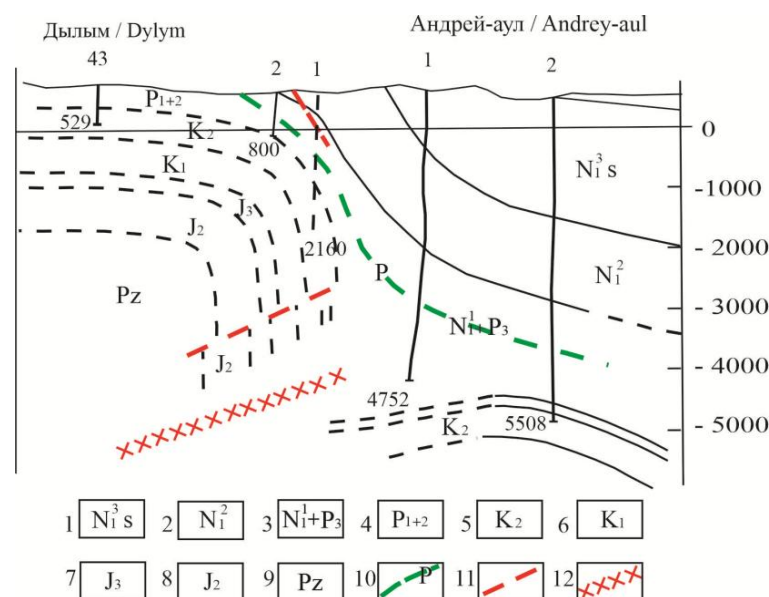


Рис. 1. Геологический разрез «Дылым – Андрей-аул».

- 1 – сарматский ярус; 2 – средний миоцен; 3 – майкопская серия; 4 – фораминиферовая серия;
5 – верхний мел; 6 – нижний мел; 7 – верхняя юра; 8 – средняя юра; 9 – палеозой;
10 – реперный пласт в кровле миатлинского горизонта; 11 – разломы;
12 – зона главного надвига /

Fig. 1. Geological profile "Dylym-Andrey-aul".

- 1 – Sarmatian stage; 2 – Middle Miocene; 3 – Maikopian series; 4 – Foraminiferal series;
5 – Upper Cretaceous; 6 – Lower Cretaceous; 7 – Upper Jurassic; 8 – Middle Jurassic;
9 – Paleozoic; 10 – reference layer in the roof of the Miattinsky horizon; 11 – faults;
12 – main thrust zone

В регионе выделяется несколько меридиональных и субмеридиональных глубинных сейсмогенных разломов, которые пересекаются с разломами субширотного простирания и дробят фундамент на линеаментные зоны и блоки [Рогожин и др., 2015; Магомедов, 2021; Магомедов, 2024 и др.]. Их наличие и размещение в геосфере региона определяются в основном особенностями напряженного состояния литосферы, литологическими и физико-механическими свойствами горных пород, тектоническим режимом и зависят, в первую очередь, от планетарных причин — ротационно-пульсационного режима.

Основным материалом для выяснения особенностей разломно-блоковой тектоники, кольцевых структур и линеаментов, скрытых под осадочным чехлом, являлись результаты гравиразведки, дешифрирования космоснимков разного уровня генерализации,

структурно-геоморфологического анализа, тепловой съемки, а также материалы геофизических исследований и бурения.

Особенности строения фундамента проявляются через линеamentные зоны и блоки, развивающиеся унаследованно в новейшее время. Кавказские геологи указывали на тесную связь рельефа, новейших структур и глубинной тектоники (И.О. Брод, А.Ф. Якушева, А.А. Чистяков, О.К. Леонтьев, Д.А. Мирзоев, Г.Г. Бунин, В.Д. Скарятин, М.Ю. Никитин, Д.В. Несмеянов, К.О. Соборнов и др.).

Решению принципиальных вопросов глубинного геологического строения способствовало применение космической информации и структурно-геоморфологического анализа с использованием геофизических методов разведки, преимущественно сейсморазведки [Геология и нефтегазоносность ..., 1958; Скарятин, 1973, 1976; Мирзоев, Шарафутдинов, 1986; Соборнов, 1996; Gorbatiykov et al., 2015; Рогожин и др., 2015; Заалишвили, Чотчаев, 2016; Zabelina et al., 2016; Ismail-Zadeh et al., 2020; Yakovlev, 2012; Горбатиков и др., 2023; Kuznetsov, Romanyuk, 2025; Стогний и др., 2026 и др.]. Выявлены тектонические элементы, которые находят отражение как на космических снимках (КС), так и в строении (фации, мощности) четвертичных отложений [Мирзоев, Шарафутдинов, 1986; Скарятин, 1973, 1976 и др.].

Использование космической информации с анализом фондового материала позволило выделить участки вероятного расположения погребенных поднятий (Русский Хутор, Южно-Сухокумск, Равнинное, Адильотарское, Бабаюртовское, Кизлярское и др.), т.е. участки целесообразного размещения разведочных сейсмометрических работ. Впоследствии выделенные участки расположения погребенных поднятий были подтверждены геофизическими и буровыми работами, на многих из которых были открыты месторождения нефти и газа [Геология и нефтегазоносность..., 1958; Мирзоев, Шарафутдинов, 1986 и др.].

При дешифрировании как кольцевые структуры (рис. 2, 3) выделены крупные неотектонические структуры — Хадумский и Кукуртауский (Талгинский) своды.

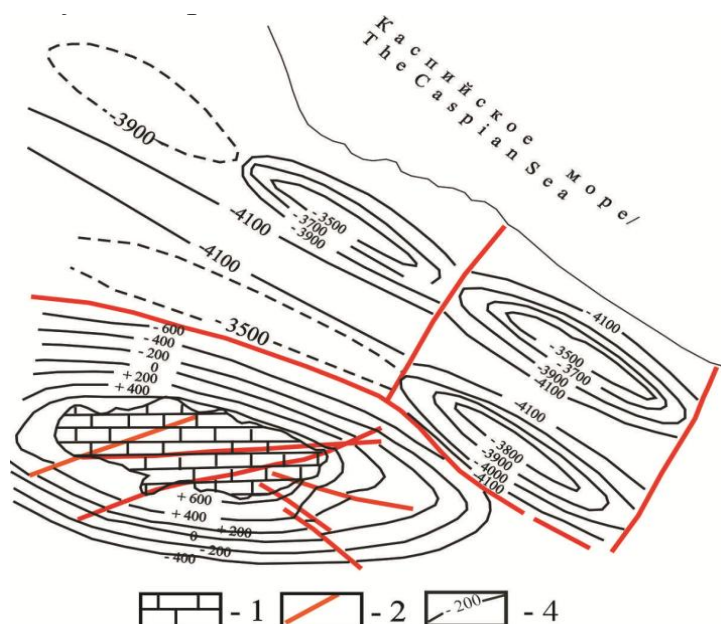


Рис. 2. Талгинский свод на структурной карте по кровле верхнего мела.

1 – выходы отложений верхнего мела на дневную поверхность; 2 – разрывные нарушения;
3 – изогипсы по кровле верхнемеловых отложений /

Fig. 2. Talginsky Arch on the structural map of the Upper Cretaceous roof.

1 – upper Cretaceous deposits exposed on the surface; 2 – faults;
3 – isohypses of the Upper Cretaceous deposits

Дешифрирование космоснимка (рис. 3) подтверждает и наше предположение о наличии активной глубинной структуры (Сулакского штока). В настоящее время в его купол активно врезаются долины рек Аварское и Андийское Койсу и река Сулак, которые отделяют друг от друга Гимринский и Салатауский хребты.

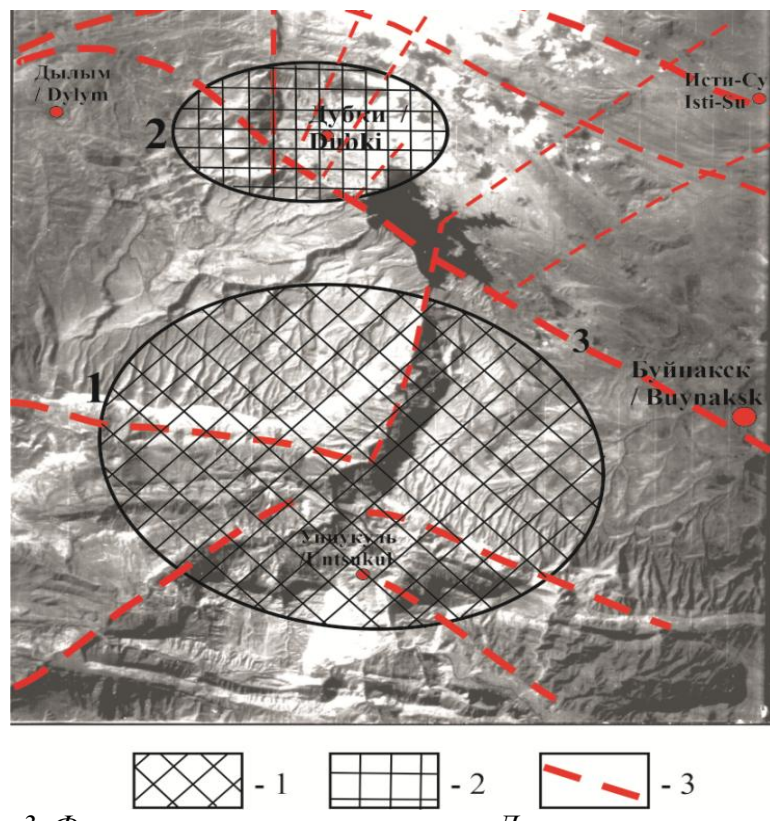


Рис. 3. Фрагмент космического снимка Дагестанского выступа.
1 – Сулакский шток; 2 – Хадумский купол; 3 – дешифрованные зоны разломов /

Fig. 3. Fragment of a space image of the Dagestan Upland.

1 – Sulak stock; 2 – Khadum dome; 3 – deciphered fault zones

Эта структура приурочена к высококомобильной зоне тектоносферы и является одним из косвенных индикаторов активных глубинных деформаций земной коры. Разная степень подъема и скорость Сулакского штока и Хадумского купола послужили причиной того, что разница уровней одновозрастных, литологически однородных геологических образований структур достигает от первых сотен метров до 1,5 км.

Под куполом Хадум предполагается криптолакколит, подтвержденный работами МОВ. Материалы докладов научно-практической конференции «Мониторинг и прогнозирование природных катастроф», посвященной юбилею Дагестанского землетрясения 1970 г., представленные ведущими специалистами ДО ЕГС РАН в 2010 году (Р.А. Левкович, З.А. Адилов и др.), также подтверждают наличие криптолакколита (рис. 4 а,б,в).

Кольцевой облик имеет также Эльдама-Иргартбашский выступ. С активизацией новейших тектонических движений связано образование структур региона. С предполагаемым центром верхнепалеозойского и мезокайнозойского вулканизма многие кавказские геологи связывают упомянутые кольцевые структуры. Область, контролируемая двумя кольцевыми структурами (Талгинским и Хадумским сводами), является наиболее сейсмоактивной. В исследование кольцевых структур и морфоструктур централь-

ного типа (МЦТ) внесли определенный вклад В.В. Соловьев (1973, 1975, 1978, 1983), Б.В. Ежов (1980, 1984, 1986), А.П. Кулаков (1986), Г.И. Худяков (1974, 1982), Г.Г. Бунин (1980, 1982, 1985, 1991) и др.

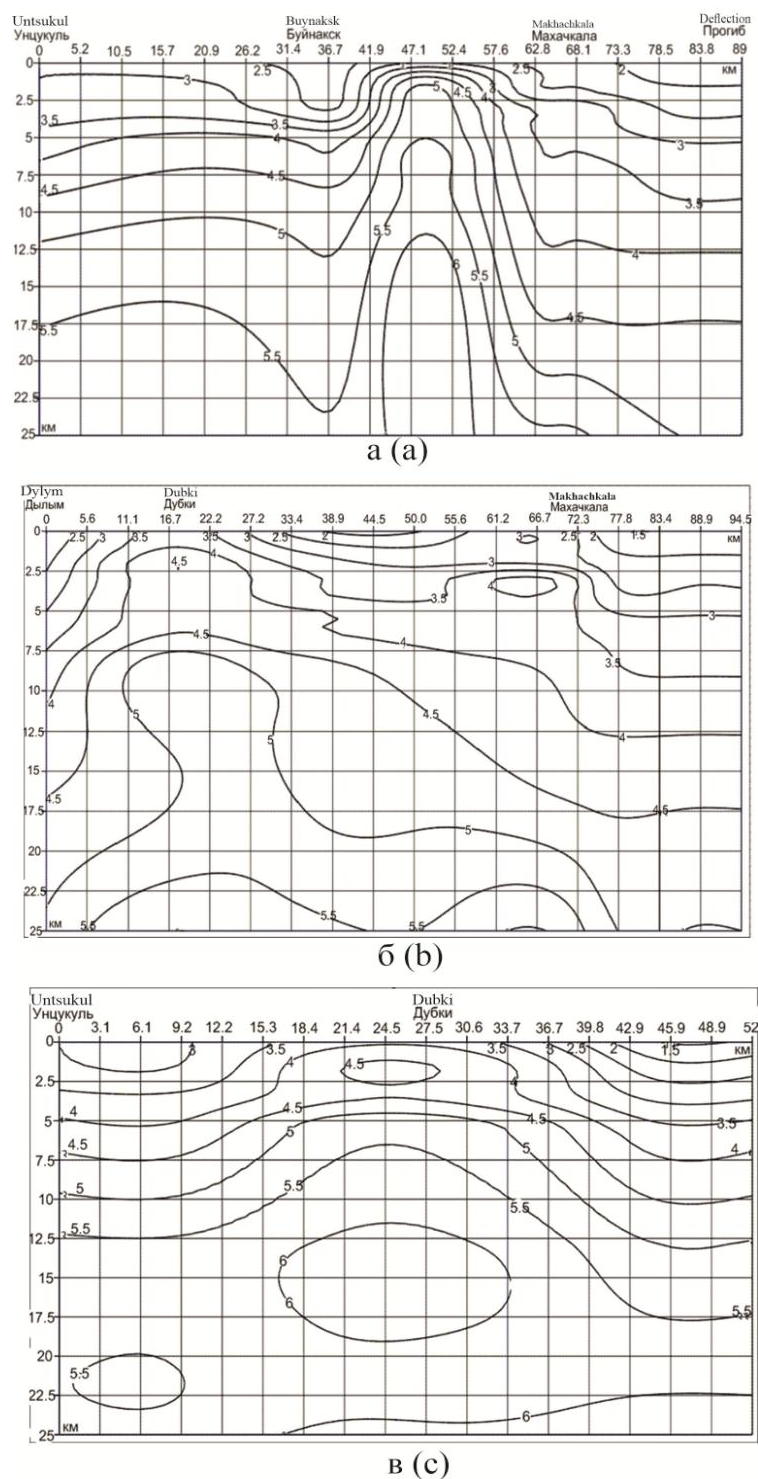


Рис. 4. Скоростные разрезы V_p по профилям:
a – Унцукуль-Буйнакск-Махачкала-прогиб; **б** – Дылым-Дубки-Махачкала-прогиб;
в – Унцукуль-Дубки-прогиб /

Fig. 4. VP velocity cuts along profiles:
a – Untsukul-Buynaksk-Makhachkala-deflection; **b** – Dyl'm-Dubki-Makhachkala-deflection;
c – Untsukul-Dubki-deflection

Результаты и обсуждение

В пределах северо-восточного сегмента Восточного Кавказа и Предкавказья выделяются активные в настоящее время кольцевые структуры МЦТ – Цурибская и Верхнеандийская (рис. 5). На рисунке представлены выделенные кольцевые структуры СВ сегмента и Предкавказья, в том числе самые крупные кольцевые структуры размером от 100 до 160 км (Терско-Кумская и др.). Обнаружено также много мелких кольцевых структур размером от 10 до 60 км.

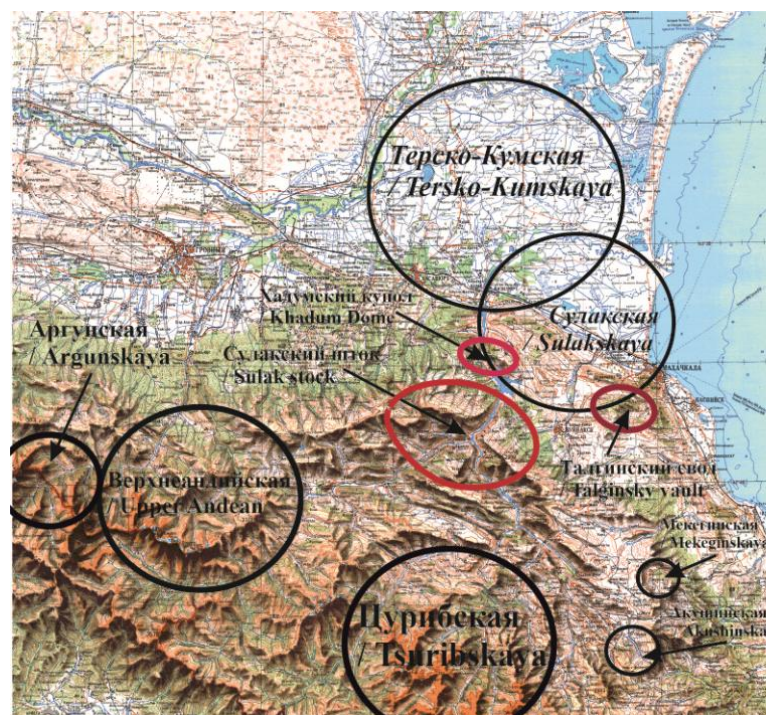


Рис. 5. Кольцевые структуры северо-восточного сегмента Восточного Кавказа и Предкавказья /

Fig. 5. Ring structures of the northeastern segment of the Eastern Caucasus and the Ciscaucasia

Качественные изменения информативности происходят при изменении масштаба снимков в 3–5 раз [Скарятин, 1973]. Речные долины являются благоприятным геоморфологическим объектом для выявления новейших и современных тектонических движений. Они особенно чувствительны к тектоническим перемещениям. Реки быстро меняют свое русло в зонах дезинтегрированных пород и по активным разломам. Проведенный анализ космических снимков с использованием структурно-геоморфологического метода позволил выделить крупные дизъюнктивные нарушения и тектонические структуры: кольцевые структуры, надвиги, линеаменты и др.

В регионе Восточного Кавказа широко развиты геотермальные ресурсы, связанные с палеовулканической деятельностью и повышенной прогреваемостью недр (тепловой поток – до $2,1 \cdot 10^{-6}$ кал/см²·с). Проведенные многолетние геотермические исследования и анализ процессов радиотеплогенерации в земной коре Восточного Предкавказья подтверждают относительно повышенные значения теплового потока в регионе [Амирханов и др., 1972; Маммаев и др., 2016]. Так, по данным В.В. Суетнова («Схематическая карта тепловых потоков Дагестана». Министерство геологии СССР, Институт геологии Даг. ФАН СССР. Составитель: Суетнов В.В. Махачкала, 1967 г.), тепловые поля в соот-

ветствии с пространственным положением дизъюнктивных нарушений, определенных геолого-геофизическими методами, образуют аномальные линейно вытянутые структуры (рис. 6).

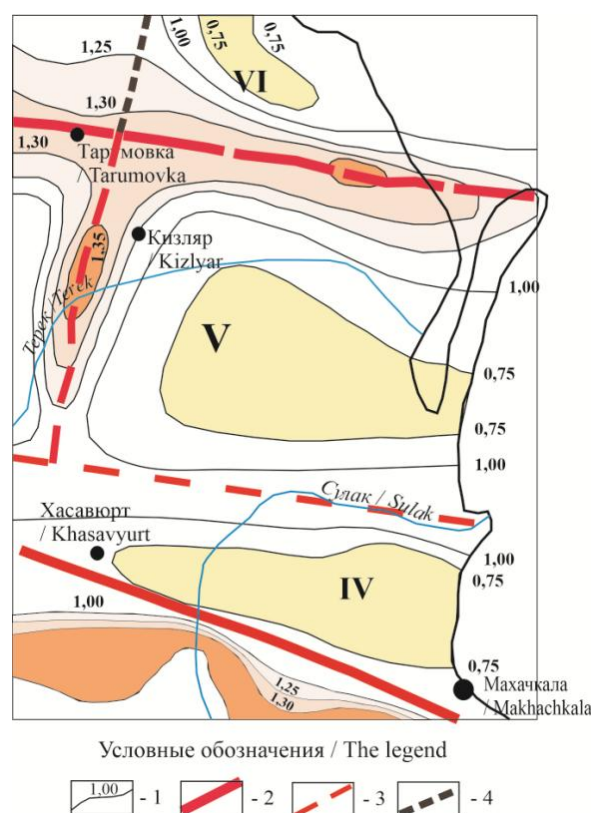


Рис. 6. Фрагмент карты тепловых потоков Дагестана (по В.В. Суетнову, 1967 г.).

1 – изолинии тепловых потоков, $\mu\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{сек}$;

2 – глубокий разлом; 3 – предполагаемый глубокий разлом;

4 – условная граница геотермических районов.

Геотермические районы: IV – Предгорный, V – Терско-Сулакский,

VI – Северо-Восточный /

Fig. 6. Fragment of the map of Dagestan's heat flows (according to V.V. Suetnov, 1967).

1 – isotherms of heat fluxes, $\mu\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$; 2 – deep fault; 3 – assumed deep fault;

4 – conditional boundary of geothermal areas.

Geothermal regions: IV – Foothill, V – Terek-Sulak,

VI – North-Eastern

Многочисленные аномалии в геофизических, геохимических, ландшафтных и других полях являются косвенными признаками (индикаторами) активности дизъюнктивных нарушений в регионе: цепочки эпицентров землетрясений, нефтегазопроявления, грязевые вулканы, а также термальные источники – Ахтынские (или Ахтынские бани), Берикейские, Белиджинские, Избербашские, Бежтинские источники, Зурамакентские (Кизилюртовский район, село Гельбах), Заузанбашские, источники колхоза Кардоновка (Кизлярский район), Талгинские, Махачкалинские, Каякентские, Манаскентские, Исти-Су и многие другие с температурой воды от 33 до 70 °C и более (рис. 7).

Все выявленные индикаторы тяготеют к дизъюнктивным нарушениям и их пересечениям. Аномальные проявления в геологических полях позволяют обнаружить скрытые под осадочным чехлом разломы.

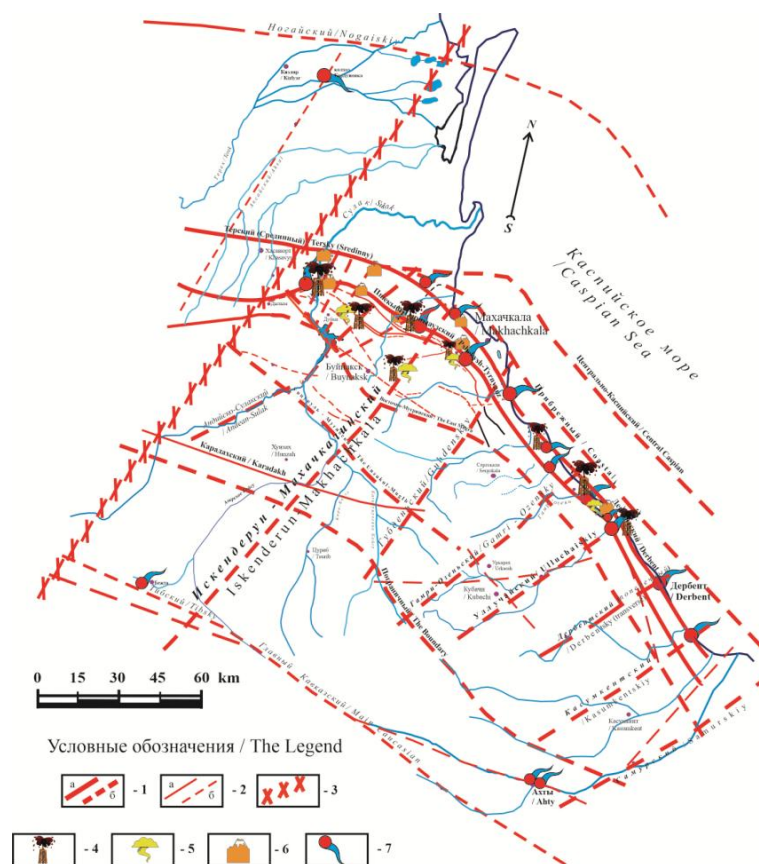


Рис. 7. Разломно-блоковая структура северо-восточного сектора Восточного Кавказа с нанесением поверхностных нефтегазопоявлений, грязевых вулканов и термальных источников.

- 1 – глубинные разломы (а – достоверные, б – предполагаемые);
 2 – разрывные нарушения в осадочном чехле (а – достоверные, б – предполагаемые);
 3 – фрагмент Аграхано-Тбилиско-Левантийской левосдвиговой зоны первого порядка;
 4 – поверхностные нефтепроявления; 5 – приповерхностные газовые аномалии;
 6 – проявления грязевого вулканизма; 7 – термальные источники /

Fig. 7. Fault-block structure of the northeastern sector of the Eastern Caucasus with surface oil and gas manifestations, mud volcanoes, and thermal springs.

- 1 – deep faults (a – reliable, b – suspected); 2 – discontinuous faults in the sedimentary cover (a – reliable, b – suspected); 3 – fragment of the Agrachan-Tbilisi-Levantine left-thrust zone of the first order; 4 – surface oil manifestations; 5 – near-surface gas anomalies; 6 – manifestations of mud volcanism; 7 – thermal springs

Выводы

Результаты проведенных исследований с использованием космической информации, морфотектонического и структурно-геоморфологического анализа, тепловой съемки, а также анализа материалов геофизических исследований и бурения позволили установить, что земная кора СВ сегмента Восточного Кавказа благодаря тектонической раздробленности и выраженной разломно-блоковой структуре служит хорошей основой для поисково-разведочных работ и металлогенических построений.

Применение космической информации совместно с наземными геологическими методами позволило выявить сеть дизъюнктивных нарушений и детализировать представления о тектоническом строении региона.

Проведенные исследования позволили дешифровать крупные кольцевые структуры, такие как Терско-Кумская, Сулакская, морфоструктуры центрального типа (Верхнеандийская, Цурибская и Аргунская) – структуры, активные в современный период развития региона, – а также Хадумский купол, Талгинский свод и малые кольцевые структуры: Акушинская, Мекегинская и др.

Использование космической информации в комплексе с наземными геологическими методами может значительно повысить эффективность дорогостоящих геофизических исследований и способствовать открытию новых месторождений полезных ископаемых.

Литература

1. Амирханов Х.И., Суетнов В.В., Левкович Р.А., Гаирбеков Х.А. Тепловой режим осадочных толщ. Махачкала: Дагестанское книжное издательство, 1972. – 230 с.
2. Буторин Г.Д., Галин В.Л. Тектоника передовой складчатой зоны Дагестанского выступа в связи с поисками залежей нефти и газа // Современная геология. – 1972. – № 9. – С. 127–133.
3. Геология и нефтегазоносность Восточного Предкавказья. Труды КЮГЭ / под ред. И.О. Брода. – Вып. 1. Л.: Гостоптехиздат, 1958. – 622 с.
4. Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Милуков В.К., Миронов А.П., Хубаев Х.М., Мельков Д.А., Кануков А.С., Абаева З.В., Шманатов Г.В., Габараев А.Ф., Ревазов М.О. Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003.
5. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Комплексный анализ геологических данных и скоростной модели ММЗ на разрезах Центрального Кавказа // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 4. – С. 52–67. DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20899.
6. Магомедов Р.А. Особенности связи между пространственно-временным распределением сейсмичности, уровнем геодинамического потенциала блоков земной коры и разломно-блоковой тектоникой Восточного Кавказа // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 69–80. DOI: 10.46698/VNC.2021.72.56.006.
7. Магомедов Р.А. Оценка геосейсмической опасности северо-восточного сегмента Восточного Кавказа // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 49–63. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.44.004.
8. Маммаев О.А., Маммаев Б.О., Магомедов Р.А. Оценка теплоэнергетического потенциала геотермальных ресурсов месторождения термальных вод // Труды Института Геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2016. – № 66. – С. 287–290.
9. Мирзоев Д.А., Шарафутдинов Ф.Г. Геология месторождений нефти и газа Дагестана. Махачкала: Дагестанское книжное издательство, 1986. – 311 с.
10. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсюченко 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. DOI: 10.7868/S0016853X15020058.
11. Скарятин В.Д. Об изучении разрывной тектоники по комплексу разномасштабных космоснимков Земли (метод многоступенчатой генерализации) // Известия вузов. Геология и разведка. – 1973. – № 7. – С. 62–67.
12. Скарятин В.Д. Применение метода многоступенчатой генерализации при изучении геологических структур разного масштаба (на примере Северного Кавказа) // Исследование природной среды космическими средствами. Т. 5: Геология и геоморфология. – 1976. – С. 123–141.
13. Соборнов К.О. Структурная сегментация Восточно-Кавказского пояса надвигов // Геотектоника. – 1996. – № 5. – С. 76–88.
14. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Реологическая стратификация земной коры Восточного сегмента Большого Кавказа по профилю ГСЗ Волгоград-Нахичевань // Геология и геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. № 2. – С. 8–19. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001.
15. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The pattern of

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

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

17. Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V. On the onset time and mechanism of the Greater Caucasus uplift as well as genetic type and filling of the Ciscaucasia troughs – traditional and modern interpretations // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2025. – Vol. 16. Issue 3. DOI: 10.5800/GT-2025-16-3-0825.

18. Yakovlev F. Identification of geodynamic setting and of folding formation mechanisms using of strain ellipsoid concept for multi-scale structures of greater Caucasus // *Tectonophysics*. – 2012. – No. 581. – pp. 93–113.

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

References

1. Amirkhanov Kh.I., Suetnov V.V., Levkovich R.A., Gairbekov Kh.A. Thermal regime of sedimentary strata. Makhachkala. Dagestan Book Publishing House. 1972. 230 p.

2. Butorin G.D., Galin V.L. Tectonics of the Advanced Folded Zone of the Dagestan Upland in Connection with the Search for Oil and Gas Deposits. *Modern Geology*. 1972. No. 9. pp. 127–133.

3. Geology and Oil and Gas Potential of the Eastern Ciscaucasia. Proceedings of the Integrated Southern Geological Expedition. Ed. I.O. Brod. Issue 1. Leningrad. Gostoptekhizdat. 1958. 622 p.

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

5. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O. Complex analysis of geological data and of high-speed model MMS in the Central Caucasus sections. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 4. pp. 52–67. DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20899.

6. Magomedov R.A. Features of the relationship between spatiotemporal distribution of seismicity, the level of geodynamic potential of the Earth's crust blocks and fault-block tectonics of the Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 69–80. DOI: 10.46698/VNC.2021.72.56.006.

7. Magomedov R.A. Assessment of geoseismic hazard of the north-eastern segment of the Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 49–63. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.44.004. (In Russ.).

8. Mammaev O.A., Mammaev B.O., Magomedov R.A. Assessment of the thermal energy potential of geothermal resources of the thermal water deposit. *Geology, geodynamics and geo-ecology of the Caucasus*. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. No. 66. pp. 287–290.

9. Mirzoev D.A., Sharafutdinov F.G. Geology of Oil and Gas Deposits in Dagestan. Makhachkala. Dagestan Book Publishing House. 1986. 311 p.

10. Rogozhin E.A., Gorbaticov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. The structural framework and recent geodynamics of the Greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on its deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. DOI: 10.7868/S0016853X15020058.

11. Skaryatin V.D. On the study of discontinuous tectonics by a complex of multiscale space images of the Earth (the method of multi-stage generalization). Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 1973. No. 7. pp. 62–67.

12. Skaryatin V.D. Application of the Multistage Generalization Method in the Study of Geological Structures of Various Scales (Using the North Caucasus as an Example). Study of the

Natural Environment Using Space-Based Instruments. Vol. 5. Geology and Geomorphology. 1976. pp. 123–141.

13. Sobornov K.O. Structural segmentation of the East Caucasus thrust belt. *Geotectonics*. 1996. No. 5. pp. 76–88.

14. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Rheological stratification of the Earth's crust of the Eastern segment of the Greater Caucasus along the Volgograd Nakhichevan DSS profile. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 2. pp. 8–19. DOI: 10.46698/VNC.2026.94.56.001. (In Russ.)

15. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073.

16. Ismail-Zadeh A., Muller B., Schilling F., Gorshkov A., Soloviev A. et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 207. Art. No. 103222.

17. Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V. On the onset time and mechanism of the Greater Caucasus uplift as well as genetic type and filling of the Ciscaucasia troughs – traditional and modern interpretations. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2025. Vol. 16. Issue 3. DOI: 10.5800/GT-2025-16-3-0825.

18. Yakovlev F. Identification of geodynamic setting and of folding formation mechanisms using of strain ellipsoid concept for multi-scale structures of Greater Caucasus. *Tectonophysics*. 2012. No. 581. pp. 93–113.

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

Василия Ивановича Черкашина



28 января 2026 года исполнилось 75 лет со дня рождения известного российского ученого, доктора геолого-минералогических наук, Заслуженного деятеля наук Республики Дагестан, действительного члена Академии горных наук РФ, заведующего лабораторией «Региональной геологии и минерального сырья» Института геологии ДФИЦ РАН Василия Ивановича Черкашина, видного ученого, специализирующегося в области минерагении Кавказа, охватывающей широкий круг вопросов, связанных с рудной геологией и минералогией. В круг его научных интересов также входят геодинамика, тектоника и опасные геологические процессы.

Родился Черкашин В.И. 28 января 1951 года в г. Махачкала, в Республике Дагестан (РД). Далее – служба в рядах Советской армии (группа войск в Германии). В связи с юношеским увлечением радиотехникой поступил в радиотехническое училище (г. Ростов-на-Дону), которое успешно окончил. В 1974–1976 гг. – работа в органах ВВ МВД РД. В 1976 году, после завершения службы, начал работу в Институте геологии Дагестанского филиала АН СССР на должности инженера лаборатории физических методов исследований и поступил в Дагестанский государственный университет (ДГУ) на физический факультет (вечернее отделение), который закончил в 1982 году по специальности «физика». В конце пятого курса он подготовил дипломную работу, связанную с получением полупроводниковых пленок, основой которых являлось соединение A_2B_6 , у которого изменялась стехиометрия в период напыления, что изучалось с помощью рентгеновской дифракции. Это стало первой ступенькой в область понимания удивительного и загадочного пространства – кристаллохимических особенностей вещества.

После окончания ДГУ был направлен в Геологический институт АН СССР в лабораторию физико-химических исследований, которой руководил всемирно известный минералог и кристаллограф В.А. Дриц. Здесь Черкашин В.И. подготовил кандидатскую диссертацию «Определение структурных и кристаллохимических особенностей тонкодисперсных слоистых минералов с разным составом межслоевых промежутков» и в 1990 г. успешно защитил её в Казанском государственном университете.

В 1992 г. возглавил группу физических методов анализа Института геологии. Знания и опыт позволили ему решать весьма сложные задачи в области изучения вещественного состава осадочных пород с использованием новых на тот период компьютерных технологий в области нефтяной и рудной геологии. Учитывая значимость исследований, Черкашин В.И. стал помощником директора, что, очевидно, обусловило его участие в выборах на должность директора Института геологии.

В 2000 году на альтернативной основе Черкашин В.И. был избран директором Института геологии Дагестанского научного центра РАН, проработав в данной должности 18 лет. К сожалению, начало работы оказалось для молодого директора весьма сложным, так как после пожара в Институте геологии практически была уничтожена вся материально-техническая база и Геологический музей. Несмотря на сложности с финансированием, ему удалось восстановить лабораторную базу и, оснастив ее новейшим оборудованием, возобновить полевые работы, что позволило заметно поднять уровень изучения геологического строения и вещественного состава горных пород. Под его руководством были оценены минерагенический потенциал Северного Кавказа и Восточного Предкавказья.

Василием Ивановичем разработаны новые минералого-геохимические методологические подходы к изучению колчеданных руд с использованием геохимии элементов-примесей, изотопного состава ряда химических элементов, входящих в состав рудной минерализации, и рентгеноструктурного анализа особенностей минералов. В результате многолетних исследований им впервые были сделаны выводы о широком распространении минералов титаново-циркониевых россыпей среднеиоценовых прибрежно-морских отложений, что позволило выделить Восточно-Кавказскую подпровинцию россыпей этого типа. Кроме того, в кварцевых песчаных толщах Карагана, Чокрака, помимо основных компонентов титаново-циркониевых россыпей, установлены повышенные концентрации золота, серебра и платины. На основе установленных закономерностей разработаны рекомендации для проведения поисково-оценочных работ на россыпях титаново-циркониевого сырья и драгоценных металлы морской низменности Предгорного Дагестана.

В настоящее время лаборатория «Региональной геологии и минерального сырья» под руководством В.И. Черкашина направляет свои усилия на выявление минерально-сырьевой и топливно-энергетической базы Южного региона России с учетом экологической и экономической ситуации в различных горно-геологических районах Восточного Кавказа.

С 2025 года при его непосредственном участии выполняется глобальный проект **«Формирование геологических и физико-химических характеристик осадочных бассейнов Северного Кавказа и приуроченных к ним полезных ископаемых разного генезиса: влияние региональных и глобальных факторов»**.

Проводящиеся широкомасштабные полевые работы, включающие в себя детальное литолого-стратиграфическое расчленение потенциально рудоносных осадочных толщ в сочетании с генетическими (фациальными) данными формирования отложений, позволяют провести переоценку металлогенического потенциала Большого Кавказа (рудного и нерудного).

В.И. Черкашин – автор более 300 научных публикаций, 9 монографий, в том числе, «Тектонической карты Дагестана» (1:500 000) и «Благородные металлы (Au, Pt, Pd) Северного Кавказа» («Наука», 2025 г.).



В.И. Черкашин является организатором ряда крупнейших научно-практических конференций, посвященных различным направлениям наук о Земле. Он является членом Совета при Главе РД, а также членом Экономического Совета при Председателе Правительства РД, входит в состав общественного Совета при Министерстве строительства и архитектуры РД. С 2003 года – член Горного совета РФ, занимается вопросами рационального использования минерально-сырьевых ресурсов РФ, ЮФО и др. В 2004 г. избран академиком Академии горных наук.

В.И. Черкашин – главный редактор научного журнала «Труды Института геологии (Геология и ресурсы Кавказа)», член редколлегии научных журналов «Аридные экосистемы» и «Геология и геофизика Юга России».

По его инициативе в Институте организован геологический музей, выполняющий функции научно-просветительского характера, где оказывается помощь населению и организациям Республики Дагестан по вопросам геологии, сейсмологии, полезных ископаемых, туризма.

В.И. Черкашин пользуется заслуженным авторитетом среди научного сообщества и использует это в полной мере для поддержки интересов Института геологии на всех необходимых уровнях. Это, очевидно, положительно сказывается на результатах работы коллектива.

За многолетнюю плодотворную работу и в связи с 275-летием награжден Грамотой Российской академии наук (1999), Почетным знаком «300-летие горно-геологической службы России», является лауреатом премии РосГео-Роснедра МПР РФ (2003), в 2010 году ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РД», в 2016 г. – «Почетная грамота Республики Дагестан», в 2017 г. награжден памятными часами Главы Республики Дагестан, в 2021 г. награжден Орденом «За заслуги перед Республикой Дагестан», «Благодарность Совета Федерации РФ» (2021), «Почетная грамота Народного собрания РД» (2021), «Почетный строитель РД» (2022), «Почетная грамота Правительства РД» (2023), Орден «За вклад в развитие науки и техники» I степени (2024), «Почетная грамота Правительства РД» (2026), «Орден Почета III степени Республики Дагестан» (2026), Межотраслевой знак «Горняцкая слава» – первой степени (2026).

Редакция журнала «Геология и Геофизика Юга России» от имени коллег горячо поздравляет Василия Ивановича со знаменательным юбилеем 75-летием и желает крепкого здоровья, новых научных достижений и долгих лет жизни !

Главный редактор

В.Б. Заалишвили

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 1.6.1 Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика; 1.6.4 Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых; 1.6.6 Гидрогеология; 1.6.9 Геофизика; 1.6.10 Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 1.6.11 Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1.6.12 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 1.6.20 Геоинформатика, картография; 1.6.21 Геоэкология; 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика; 2.8.8 Геотехнология, горные машины, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3–5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20–25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, резюме (аннотации) на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи.

Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <https://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Резюме (аннотация) с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов (кегль 14 полужирный, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки и ответственного автора.

Резюме (аннотация) должна быть объемом 250–300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то резюме (аннотация) должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если рукопись подается на английском языке, необходимо привести также резюме (аннотацию) на русском. Резюме (аннотация) печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце резюме (аннотации) обязательно указываются ключевые слова (5–8), которые отражают тематику статьи.

Благодарности/Acknowledgements. В этом разделе следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$ и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических эле-

ментах (H_2O) и единицах измерений (МВт/см²) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Все надписи на русском языке на рисунках и в таблицах дублируются на английский. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутоновых. 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 u, e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the

formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova Str., Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76 40 56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 3. 2026 г. Том 16)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать _____.2026 г. Дата фактического выхода _____.2026 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 34,0.

Тираж 100 экз. Заказ №89.

Свободная цена.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.

Издатель:

**Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра
"Владикавказский научный центр Российской академии наук"**

Адрес издателя и редакции:

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

тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

<http://geosouth.ru>

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.

362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3