

ISSN 2221-3198

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 4 / 2025



ISSN 2221-3198  
e-ISSN 2686-7486

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

# **ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ**

**GEOLOGY AND  
GEOPHYSICS  
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 15  
№ 4 / 2025**

**Владикавказ 2025**



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

**Главный редактор**

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

**Заместитель главного редактора**

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

**Члены редакционной коллегии**

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

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

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

Республиканский Центр сейсмологической службы при НАНА, Азербайджан

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Ответственный секретарь**

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

**Выпускающий редактор**

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

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

*Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus*

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

**Учредитель:**

**ВНЦ РАН**

Адрес учредителя:

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

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

**Издатель:**

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

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2025

*Фото на обложке – На Столовой горе (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, 2025

*Cover photo – On Table Mountain (K.S. Kharebov)*



## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <hr/> <hr/> ГИДРОГЕОЛОГИЯ <hr/> <hr/>                                                                                                                      |     |
| <b>Мохов А.В.</b>                                                                                                                                          |     |
| О распределении микроэлементов в водах действующих шахт Восточного Донбасса .....                                                                          | 8   |
| <hr/> <hr/> ГЕОФИЗИКА <hr/> <hr/>                                                                                                                          |     |
| <b>Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Разумов В.В., Кереева З.М.</b>                                                                                           |     |
| Анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши .....                                                                                                  | 17  |
| <b>Будник Д.А., Савич А.Д., Галкин С.В., Халилов Д.Г.</b>                                                                                                  |     |
| Геофизическая технология заканчивания нефтяных скважин и долговременного мониторинга их работы .....                                                       | 28  |
| <b>Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Ли Л., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Мкртчян Г.А., Карапетян Р.К., Мкртчян М.А.</b>                                     |     |
| О сейсмической активизации центральной части Эгейской вулканической дуги .....                                                                             | 42  |
| <b>Капустян Н.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Акбиев Р.Т., Мерзликин Т.И., Морозова Т.В.</b>                                                            |     |
| Инженерно-сейсмометрические сети, как геофизический метод контроля воздействий опасных природно-техногенных процессов на урбанизированные территории ..... | 60  |
| <b>Овсяченко А.Н., Едемский Е.Д., Корженков А.М., Заалишвили В.Б., Ларьков А.С., Аверин А.А., Бутанаев Ю.В., Кошевой Н.Г.</b>                              |     |
| Активная тектоника Даргавской и Фиагдонской котловин в Северной Осетии .....                                                                               | 78  |
| <b>Чернов Ю.К.</b>                                                                                                                                         |     |
| Спектры реакции колебаний грунта и макросейсмическая интенсивность землетрясений: некоторые статистические соотношения .....                               | 97  |
| <hr/> <hr/> ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ <hr/> <hr/>                                                               |     |
| <b>Парада С.Г., Давыденко Д.Б., Гамбург К.Ю.</b>                                                                                                           |     |
| Применение метода дистанционной флюидоиндексации для прогноза и поисков эндогенного оруденения .....                                                       | 112 |
| <hr/> <hr/> ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ <hr/> <hr/>                                                                       |     |
| <b>Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А.</b>                                                                                                                          |     |
| Механизм разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюида .....                                                                            | 122 |
| <b>Мударисова Р.А., Лукьянова Р.Г.</b>                                                                                                                     |     |
| Методика прогноза и поисков карбонатных резервуаров сверхвязкой нефти казанского яруса Мелекесской впадины .....                                           | 137 |
| <hr/> <hr/> ГЕОЭКОЛОГИЯ <hr/> <hr/>                                                                                                                        |     |
| <b>Атаев З.В.</b>                                                                                                                                          |     |
| Теоретико-методологические основы и региональные особенности выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных геосистем .....                           | 151 |
| <b>Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В.</b>                                                                                                    |     |
| Террасирование склонов Макажойской котловины: оценка влияния рельефа методами лазерного сканирования .....                                                 | 169 |

**Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В., Керимов И.А.**

- Оценка изменения селитебной нагрузки на ландшафты Чеченской Республики по материалам дистанционного зондирования Земли..... 184

**Кануков А.С., Бурдзиева О.Г., Корбесова К.В., Дадтеева Э.В.**

- Влияние микропластика на загрязнение почв тяжелыми металлами..... 197

**Лихачева Э.А., Чеснокова И.В., Широкова В.А.**

- Современные представления о предмете и задачах геоэкологии ..... 211

**Моисеева Ю.А., Поливанова Т.К., Пургина Д.В.**

- Микроэлементный состав устьевых зон малых и средних рек северо-восточной части Чёрного моря ..... 222

**Мухартова Ю.В., Ольчев А.В., Керимов И.А., Обаев Е.С.**

- Усовершенствованный инверсионный метод восстановления потоков  $\text{CO}_2$  над территориями со сложным рельефом на основе атмосферных измерений ..... 235

**Сазонов А.Д.**

- Влияние р. Северский Донец на ионный состав воды нижнего течения р. Дон..... 249

---

**ГЕОГРАФИЯ**

---

**Караваев В.А., Гуня А.Н., Харченко С.В., Семиноженко С.С.**

- Селевая активность в горах Центрального Кавказа в 2025 году ..... 259

---

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА**

---

**Phuc L.Q., Linh N.K., Babyr N.V., Thang N.V.**

- Stress environment and roof support needs for roadways ahead of the coal face:  
Case study from Ha Lam coal mine ..... 270

---

**ПАМЯТЬ**

---

- Мохов Александр Вадимович** ..... 285

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| HYDROGEOLOGY                                                                                                                                                   |     |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| <b>Mokhov A.V.</b>                                                                                                                                             |     |
| On the distribution of microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass.....                                                              | 8   |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| GEOPHYSICS                                                                                                                                                     |     |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| <b>Adzhiev A.Kh., Kondratieva N.V., Razumov V.V., Kerefova Z.M.</b>                                                                                            |     |
| Analysis of the long-term Dynamics of the Garabashi glacier boundaries .....                                                                                   | 17  |
| <b>Budnik D.A., Savich A.D., Galkin S.V., Khalilov D.G.</b>                                                                                                    |     |
| Geophysical technology for oil wells completion and long-term performance monitoring .....                                                                     | 28  |
| <b>Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Li L., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Mkrtchyan G.A.,<br/>Karapetyan R.K., Mkrtchyan M.A.</b>                            |     |
| On seismic activation of the central part of the Aegean volcanic arc .....                                                                                     | 42  |
| <b>Kapustyan N.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Akbiev R.T., Merzlikin T.I., Morozova T.V.</b>                                                               |     |
| Engineering seismometric networks as a geophysical method for monitoring the impact of hazardous natural and<br>technogenic processes on urbanized areas ..... | 60  |
| <b>Ovsyuchenko A.N., Edemsky E.D., Korzhenkov A.M., Zaalishvili V.B., Larkov A.S., Averin A.A.,<br/>Butanayev Yu.V., Koshevoy N.G.</b>                         |     |
| Active tectonics of the Dargavs and Fiagdon basins in North Ossetia .....                                                                                      | 78  |
| <b>Chernov Yu.K</b>                                                                                                                                            |     |
| Ground motion response spectra and macroseismic earthquake intensity: some statistical ratios.....                                                             | 97  |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY                                                                                            |     |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| <b>Parada S.G., Davydenko D.B., Hamburg K.Yu.</b>                                                                                                              |     |
| Application of the remote fluid indexing method for forecasting and prospecting for endogenous mineralization.....                                             | 112 |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS                                                                                                     |     |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| <b>Gasumov E.R., Gasumov R.A.</b>                                                                                                                              |     |
| The mechanism of productive reservoir destruction under fluid filtration conditions .....                                                                      | 122 |
| <b>Mudarisova R.A., Lukyanova R.G.</b>                                                                                                                         |     |
| Searching and exploration methodology for carbonate reservoirs of the Kazanian Stage ultraviscous<br>oil the Melekess Depression.....                          | 137 |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| GEOECOLOGY                                                                                                                                                     |     |
| <hr/> <hr/>                                                                                                                                                    |     |
| <b>Ataev Z.V.</b>                                                                                                                                              |     |
| Theoretical and methodological foundations and regional specifics of delineating foothill landscapes<br>as independent geosystems.....                         | 151 |
| <b>Bekmurzaeva R.Kh., Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V.</b>                                                                                                       |     |
| Terracing of the Makazhoy basin slopes: assessing the impact of relief using laser scanning methods .....                                                      | 169 |



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

Assessment of changes in the residential load on the landscapes of the Chechen Republic based  
on the remote sensing data .....184

**Kanukov A.S., Burdzieva O.G., Korbesova K.V., Dadteyeva E.V.**

The impact of microplastics on soil contamination by heavy metals .....197

**Likhacheva E.A., Chesnokova I.V., Shirokova V.A.**

Modern concepts on the subject and tasks of geoecology .....211

**Moiseeva Yu.A., Polivanova T.K., Purgina D.V.**

Trace element distribution in the estuaries of minor and intermediate rivers of the North-Eastern part  
of the Black Sea .....222

**Mukhartova I.V., Olchev A.V., Kerimov I.A., Obaev E.S.**

An improved inversion method for recovering CO<sub>2</sub> fluxes over complex terrain areas based  
on atmospheric measurements .....235

**Sazonov A.D.**

The influence of the Seversky Donets River on the ionic composition of the water in the lower reaches  
of the Don River .....249

---

**GEOGRAPHY**

---

**Karavaev V.A., Gunya A.N., Kharchenko S.V., Seminozhenko S.S.**

Debris flow activity in the Central Caucasus Mountains in 2025 .....259

---

**GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS**

---

**Phuc L.Q., Linh N.K., Babyr N.V., Thang N.V.**

Stress environment and roof support needs for roadways ahead of the coal face:  
Case study from Ha Lam coal mine .....270

---

**MEMORY**

---

**Mokhov Alexander Vadimovich** .....285

УДК 622.5:543.3

DOI: 10.46698/h2232-1234-7742-a

Оригинальная статья

## О распределении микроэлементов в водах действующих шахт Восточного Донбасса

А.В. Мохов 

Южный научный центр Российской академии наук,  
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41,  
e-mail: mochov@ssc-ras.ru, mokhov\_av@mail.ru

Статья поступила: 04.09.2025, доработана: 05.11.2025, принята к публикации: 07.11.2025

**Резюме:** Статья посвящена выявлению распределения в водах действующих угольных шахт Восточного Донбасса 9 микроэлементов. **Актуальность исследований** определяется необходимостью обобщения имеющихся данных для обоснования мер по ослаблению вредного влияния шахтных вод на экологическую обстановку, а также возможности использования полученной информации для поисков и разведки рудных объектов. **Цель исследований.** Совершенствование научных основ прогнозирования химического состава вод угольных шахт и методики поисковых и разведочных работ в регионе. **Методы исследований.** Условия накопления 9 микроэлементов и их распределения в шахтных водах Восточного Донбасса исследованы общенаучными и статистическими методами. **Результаты исследований.** Выявлено распределение *Pb, Cd, Ni, Co, Mo, V, Zn, Cu, Cr*, проведено их сравнение в регионе в целом и отдельных его геолого-промышленных районах. Содержание микроэлементов распределено мозаично на площади. Наиболее насыщены воды НГПР, ШГПР и ГЗГПР, минимально – КГГПР, БКГПР. Повсеместно распространены *Pb, Zn, Cu, Mo, Cr, Ni*. Ряд элементов (*Cd, V*) распространен весьма незначительно. Накоплению микроэлементов благоприятствует в общем случае кислотная реакция воды – результат окисления сульфидов массива. Обнаружена как прямая, так и обратная корреляция содержаний отдельных микроэлементов между собой, что отражает возможность совместного поступления их в воду и уход ряда из них отсюда. Имеется специализация ГЗГПР на *Zn, Cu, Ni, Co, V*; КГГПР на *Mo*; НГПР на *Ni, Cd, Co, Cr*. Повышенные содержания ряда микроэлементов тяготеют к участкам интрузий магматических пород и крупным разрывным нарушениям. Сопряженность указывает на вероятность присутствия полиметаллического оруденения. Эти выводы представляют интерес для геоэкологической реабилитации территории и поисков руд. Перспективы обнаружения рудных залежей связаны с участками концентрации магматических тел, а также повышенных содержаний в шахтных и подземных водах рассмотренного комплекса микроэлементов на юге региона.

**Ключевые слова:** действующие шахты, шахтные воды, химический состав, микроэлементы, распространение, закономерности, Восточный Донбасс.

**Благодарности:** Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125011700412-6.

**Для цитирования:** Мохов А.В. О распределении микроэлементов в водах действующих шахт Восточного Донбасса. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4). С. 8–16. DOI: 10.46698/h2232-1234-7742-a

DOI: 10.46698/h2232-1234-7742-a

Original paper

## On the distribution of microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass

A.V. Mokhov 

Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Cekhov Ave.,  
Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: mochov@ssc-ras.ru, mokhov\_av@mail.ru

Received: 04.09.2025, revised: 05.11.2025, accepted: 07.11.2025

**Abstract:** The article investigates the distribution of 9 microelements in the mine waters of operating coal mines in the Eastern Donbass. **Relevance of the research** is determined by the need to summarize the available data to substantiate measures to mitigate the harmful effects of mine waters on the environment, as well as the possibility of using the obtained information for prospecting and exploration of ore deposits. **Aim.** Improving the scientific basis for predicting the chemical composition of coal mine waters and the methodology for prospecting and exploration in the region. **Methods.** The conditions governing the accumulation and distribution of the nine trace elements in the mine waters of the Eastern Donbass were studied using general scientific and statistical methods. **Results.** The distribution of *Pb, Cd, Ni, Co, Mo, V, Zn, Cu, Cr* was identified and compared across the region as a whole and within its individual geological and industrial regions. The content of microelements is distributed mosaically over the area. The most saturated waters are NGIR, SHGIR and GZGIR, the least – KGGIR, BKGIR. *Pb, Zn, Cu, Mo, Cr, Ni* are widespread. A number of elements (*Cd, V*) are very insignificantly distributed. Accumulation of trace elements is generally favored by the acid reaction of water, which is the result of oxidation of sulfides in the massif. Both direct and inverse correlations between the contents of individual trace elements have been found, which reflects the possibility of their co-migration into the water and the removal of some of them from it. There is a specialization of GZGIR for *Zn, Cu, Ni, Co, V*; KGGIR for *Mo*; NGIR for *Ni, Cd, Co, Cr*. Elevated contents of a number of trace elements tend to be found in areas of igneous rock intrusions and large faults. This spatial correlation suggests the potential presence of polymetallic mineralization. These findings are of interest for the geocological rehabilitation of the territory and for ore prospecting. The prospects for discovering ore deposits are associated with areas of concentration of magmatic bodies, as well as elevated contents of the considered complex of microelements in mine and underground waters in the south of the region.

**Keywords:** active mines, mine waters, chemical composition, microelements, distribution, patterns, Eastern Donbass.

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of realization of the state assignment of SSC RAS, state registration No. 125011700412-6.

**For citation:** Mokhov A.V. On the distribution of microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 8–16. DOI: 10.46698/h2232-1234-7742-a

### Введение

Выявление закономерностей формирования химического состава шахтных вод расширяет возможности для его прогнозирования и регулирования, решения других задач. Эти вопросы являются предметом обширных исследований [Назарова, 1968; Кравцов, 1968; Гавришин, 2020; Rybnikova, Rybnikov, 2020; Металлогенический..., 2022; Мохов, 2024].

Формирование химического типа подземных, включая шахтные, вод традиционно связывается с составом водовмещающих породных массивов, различными физико-химическими процессами и проч. [Посохов, 1975]. В Донецком бассейне, помимо повышенного содержания в угле сульфидной серы (свыше 2,5 %), необходим свободный сток воды из горных выработок [Докукин, Докукина, 1950]. Все большее значение придается углубленным исследованиям взаимодействия подземных вод с минеральными компонентами массива [Кизильштейн, 2002]. Развиваются теоретические основы формирования состава с использованием полученных результатов для оценки экологических последствий эксплуатации [Kursun, Terzi, 2018; Finkelman et al., 2018; Han et al., 2019; Dai et al., 2019; Хорошевская, 2022; Cao et al., 2020; 2023; Sun et al., 2020; Zhu et al., 2024; Куликова и др., 2020].

Вместе с тем рассматриваемая тема остается недостаточно исследованной в отношении макрокомпонентов и, тем более, микроэлементов, что в полной мере относится к условиям Восточного Донбасса. К началу 1980-х гг. в шахтных водах Донбасса обнаружено присутствие не менее 30 микроэлементов [Горшков, 1981].

Настоящая публикация посвящена изучению микроэлементного состава вод шахт региона в начале–середине 1980-х гг., когда количество действующих шахт исчислялось многими десятками. Привлечение большего объема фактических данных способствует решению вопроса.

Интерес к микроэлементному составу усиливается возможностью использования сделанных выводов для поиска здесь залежей других полезных ископаемых, прежде всего, руд гидрогеохимическим методом.

Настоящая публикация направлена на выявление общих особенностей распределения в регионе *Pb, Cd, Ni, Co, Mo, V, Zn, Cu, Cr* как геоэкологически опасных и потенциально связанных с рудными залежами.

### Материал и методы исследований

Использованы результаты анализа микроэлементного состава шахтных вод 40 угольных шахт Восточного Донбасса из отчетов и публикаций института ВНИИОСуголь и других специализированных организаций, а также материалы автора. Применены корреляционный анализ данных и другие способы обработки информации.

### Результаты исследований и их обсуждение

Исследование проведено для геолого-промышленных районов: Каменско-Гундоровского (КГГПР), Гуково-Зверевского (ГЗГПР), Белокалитвинского (БКГПР), Шахтинско-Несветаевского с выделением его Шахтинской (ШГПР) и Новошахтинской (НГПР) частей. Это деление имеет основания, связанные с естественными факторами [Мохов, 2024].

Шахтные воды образуются главным образом из подземных вод минерализацией 2 г/дм<sup>3</sup>. Формирование химического состава протекает в условиях контакта воды с углепородной массой, проветривания горных выработок, регулярного отведения воды отсюда. Анализы шахтных вод на 17 микроэлементов, включая рассматриваемый набор, показали регулярное присутствие большинства из них в водах шахт [Мохов, 2024].

Углевмещающая толща среднего карбона сложена алевролитами, аргиллитами, песчаниками, известняками, содержит интрузии магматических пород. Угольные



пласты разрабатываются в широких синклиналях, разделенных узкими антиклиналями, в сводах которых концентрируются продольные разрывы-разломы надвигового типа. Ведущее значение для перехода в воду минеральных веществ имеет высокое содержание сульфидной серы в массиве. Он содержит распространенные и акцессорные минералы с рассматриваемыми микроэлементами. Наличие карбонатов в рассеянном виде и слоев известняков влияет на переход минеральных компонентов массива в шахтный водный объект и уход из него.

КГГПР и часть БКГПР находятся в пределах северной зоны мелкой складчатости, слабо нарушены разрывами. ГЗГПР расположен в пределах Сулино-Садкинской синклинали и Главной антиклинали с разломами, включая Сулино-Константиновский, НГПР и ШГПР – в Шахтинско-Несветаевской синклинали между ним и Персияновским разломом.

На рисунке 1 показаны области распространения водных объектов действующих шахт и элементы геологической обстановки региона.

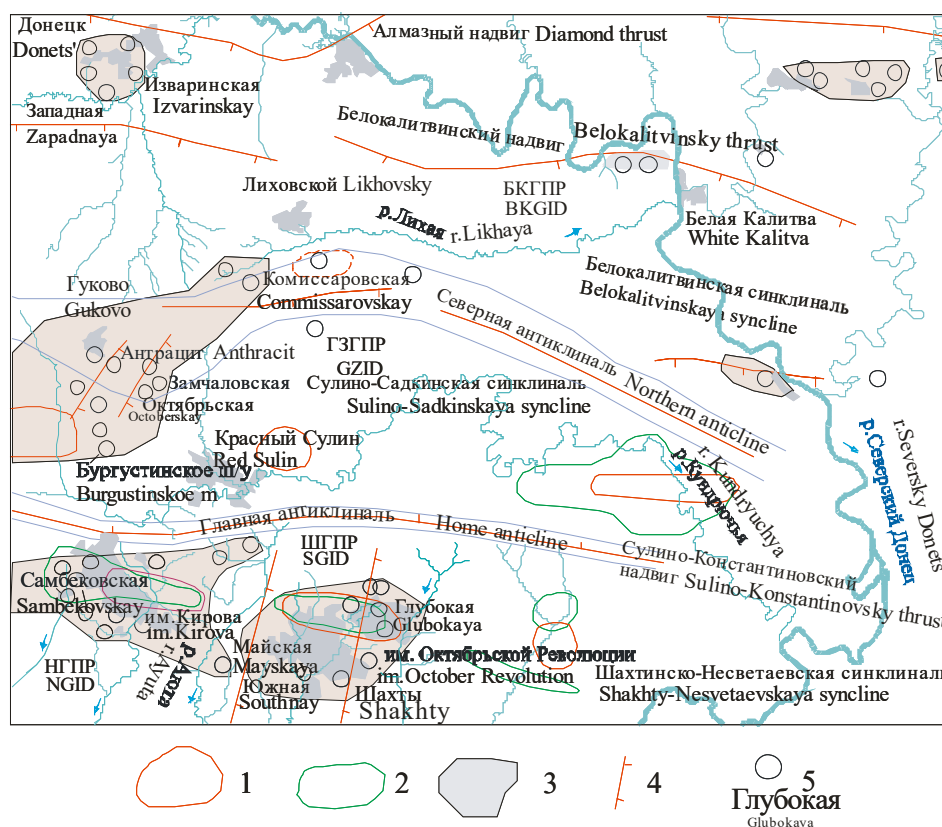


Рис. 1. Схема распространения исследуемых микроэлементов в шахтных водах и элементы геологического строения Восточного Донбасса.

- 1 – Площадь распространения магматических пород Миусско-керчикского лампрофирового комплекса (Парада и др., 2022); 2 – Площадь распространения магматических пород Несветаевского андезит-дацитового комплекса (Парада и др., 2022); 3 – Площадь распространения исследуемых микроэлементов в шахтных водах (1980-е гг.); 4 – Крупные разрывные нарушения; 5 – Угольная шахта и ее название /

*Fig. 1. Scheme of distribution of the studied microelements in mine waters and elements of the geological structure of the Eastern Donbass.*

- 1 – The area of distribution of igneous rocks of the Mius-Kerchik lamprophyre complex (Parada et al., 2022); 2 – The area of distribution of igneous rocks of the Nesvetaevsky andesite-dacite complex (Parada et al., 2022); 3 – Distribution area of the studied microelements in mine waters (1980s); 4 – Large rupture faults; 5 – Coal mine and its name

Характерна в разной степени повсеместная зараженность вод *Pb*, *Zn*, *Cu*, *Mo*, *Cr*, *Ni*. Концентрации *Pb* и *Co* низки во всех районах. Распространен незначительно (и) или в малых концентрациях на шахтах НГПР *Cd*, минимально *V* (практически отсутствует в НГПР, ШГПР, БКГПР).

Повышенными содержаниями микроэлементов (в скобках – максимум содержания, мг/дм<sup>3</sup>) выделяются воды шахт (ш.) и шахтоуправлений (ш/у): *Pb* в ГЗГПР ш. Ростовская (0,03), КГГПР – ш. Западная (0,021); ШГПР – ш. им. Октябрьской Революции (0,08); НГПР – ш. им. Кирова (0,017); *Cd* в ГЗГПР – шш. Антрацит, Октябрьская (до 0,02); КГГПР – ш. Центральная (до 0,02), НГПР – ш. Майская (0,045), ШГПР – ш. им. Октябрьской Революции (0,016); *Ni* в ГЗГПР – ш. Октябрьская (0,227), КГГПР – ш. Донецкая (0,031), ШГПР – ш. им. Октябрьской Революции (0,06), НГПР – ш. Самбековская (свыше 0,274); *Zn* в ГЗГПР – ш. Комиссаровская (8,10), КГГПР – ш. Западная (0,23), ШГПР – ш. Глубокая (0,48), НГПР – ш. им. Кирова (свыше 0,50); *Cu* в ГЗГПР – ш. Бургустинская (свыше 0,2), КГГПР – ш. Изваринская (0,017), ШГПР – шш. им. Октябрьской Революции и Глубокая (по 0,017), НГПР – ш. им. Кирова (0,102); *Mo* в ГЗГПР – ш/у Бургустинское (0,032), КГГПР – Гундоровская (0,028), ШГПР – ш. Глубокая (0,032), НГПР – ш. Майская (0,035); *Co* в ГЗГПР шш. Бургустинская (0,2), Комиссаровская (0,178), НГПР – ш. им. Кирова (0,118), ШГПР – ш. Наклонная (0,022); *Cr* в ГЗГПР – ш/у Бургустинское (0,073), КГГПР – Западная (0,031), НГПР – ш. Самбековская (0,182), ШГПР – ш. Южная (0,053); *V* в ГЗГПР – ш/у Бургустинское (0,018), НГПР – ш. Майская (0,004).

Максимальные содержания микроэлементов составляют: *Pb* 0,08 (ШГПР); *Zn* 8,10, *Cu* свыше 0,2, *V* 0,018 (ГЗГПР); *Ni* 0,274, *Cd* 0,045, *Co* 0,118, *Cr* 0,182 (НГПР); *Mo* 0,028 (КГГПР) мг/дм<sup>3</sup>. Таким образом, ведущие позиции занимают НГПР (4), ГЗГПР (3), минимум – у ШГПР и КГГПР (по 1) и БКГПР (0).

Характерно пятнистое распределение содержаний внутри районов с коэффициентом концентрации до 405 относительно локального минимума.

Выделяются относительно высоким (мг/дм<sup>3</sup>) для конкретного района, одновременным присутствием нескольких микроэлементов отдельные шахты: *Cd* (0,016), *Pb* (0,08), *Ni* (0,006), *Cu* (0,017) – им. Октябрьской Революции в ШГПР; *Cr* (0,073), *Cu* (свыше 0,2), *Mo* (0,032), *V* (0,018) – Бургустинская и ш/у Бургустинское в ГЗГПР; *Pb* (0,017), *Zn* (свыше 0,50), *Cu* (0,102), *Co* (0,118) – им. Кирова в НГПР; *Cr* (0,031), *Pb* (0,021), *Zn* (0,23) – Западная в КГГПР; *Cd* (0,045), *Mo* (0,035), *V* (0,004) – Майская в НГПР; *Zn* (0,48), *Cu* (0,017), *Mo* (0,032) – Глубокая в ШГПР; *Zn* (8,10) и *Co* (0,178) – Комиссаровская и ш/у Комиссаровское в ГЗГПР; *Cd* (до 0,02), *Ni* (0,227) – Октябрьская в ГЗГПР; *Ni* (свыше 0,274), *Cr* (0,182) – Самбековская в НГПР.

Выделяются шахты-концентраторы нескольких микроэлементов: им. Октябрьской Революции и соседняя с ней Глубокая в ШГПР; близкорасположенные Майская и им. Кирова в НГПР, находящиеся друг от друга по простиранию слоев; в ГЗГПР извлекающие один и тот же пласт соседние ш/у Бургустинское и Бургустинская; в КГГПР Западная.

Выражена специализация районов на микроэлементы: ГЗГПР: на *Zn* 8,10; *Cu* свыше 0,2; *Ni* 0,227; *Co* 0,087; *V* 0,018; КГГПР: на *Mo* 0,028; НГПР: на *Ni* 0,274; *Cd* 0,045; *Co* 0,118; *Cr* 0,182 мг/дм<sup>3</sup>.

Коэффициенты парной корреляции содержаний микроэлементов сильно варьируют. Корреляция с содержанием *Pb* имеет абсолютную величину коэффициентов от 0,036 до 0,907. Они составляли максимум и показывали вполне значимую

связь в ГЗГПР – с *Cu* 0,509, *Mo* минус 0,682; в КГГПР *Zn* минус 0,700, *Cd* минус 0,882, *Co* 0,907, *Mo* минус 0,862; в ШГПР *Cd* 0,612, *Ni* 0,832; в НГПР *Zn* 0,619, *Cu* 0,754. Коэффициенты корреляции *Zn* составляли: в ГЗГПР – с *Cu* 0,509; в КГГПР с *Cu* минус 0,653; в ШГПР с *Cu* минус 0,744, с *Cd* 0,849. Коэффициенты корреляции: *Cu* с *Cd*; в КГГПР минус 0,708; в ШГПР минус 0,608; в БКГПР минус 0,615; *Ni* с *Co*; в ГЗГПР 0,532; в БКГПР 0,477; *Co* с *Mo* минус 0,859 в КГГПР; *Mo* с *V* в ГЗГПР 0,599; КГГПР 0,602; НГПР 0,622.

Анализ свидетельствует об ограниченности количества значимых связей содержаний, наличии как прямой, так и обратной корреляции микроэлементов. Прямая связь указывает, как правило, на сопоставимость интенсивности перехода микроэлементов в водную среду и сохранности здесь и вполне пропорциональном нарастании их концентраций. Обратная связь отражает развитие вторичного минералообразования с дифференцированным в пространстве уходом из воды элементов.

В целом кислая реакция воды порождает активное выщелачивание горного массива и устойчивость многих микроэлементов в таком растворе. Кислотная обстановка характерна для региона, преобладая, в частности, на юге и западе (в НГПР, ШГПР, ГЗГПР).

Так, в КГГПР преобладают пониженные значения связи содержаний *Zn*, *Cd*, *Co*, *Mo* с *Pb*, имеется отрицательная корреляция с ним, отсутствие либо низкие концентрации последних. Низкие содержания микроэлементов в условиях высокого содержания серы общей (1,6–6,0, при преобладании 5,0 %) порождены взаимодействием продуктов окисления с горными породами.

Указанием на историю компонентов является вывод о существенной обратной зависимости содержаний сульфат- и гидрокарбонат-ионов во всех районах, особенно, ШГПР (минус 0,76), НГПР (минус 0,61), КГГПР (минус 0,60). Важнейшими являются замена сульфат-ионов гидрокарбонат-ионами (реакция Гильгардта), превращение кислых вод в нейтральные и щелочные с уходом ряда макро- и микрокомпонентов из них.

В КГГПР этому способствует повышенная карбонатность массива, относительно слабый метаморфизм горных пород. Вследствие неблагоприятности местных условий только в выработках некоторых шахт ГЗГПР и ШГПР создается возможность накопления как отдельных, так и нескольких микроэлементов, хотя сернистость угля здесь превосходит 2,5 %.

Разнообразие состава и содержаний отражает в целом автономность формирования отдельных шахтных объектов (их групп), отсутствие заметного водообмена между ними. Расположение районов в основном вкрест простиранию слоев в условиях подчиненного развития поперечных разрывных нарушений является препятствием для него. Фактором формирования состава служит влияние магматических горных пород.

Такие тела встречались на шахтах, скважинах, в обнажениях НГПР, ШГПР и, напротив, отсутствовали (не распознавались?) в выработках шахт КГГПР, ГЗГПР и БКГПР. Их проявления в НГПР и ШГПР объединены специалистами ПГО «Южгеология» в Несветаевский андезит-трахиандезитовый (андезит-дацитовая ассоциация), в ГЗГПР Миусско-керчикский лампрофировый кислого и среднего состава (базальт-риолитовая и базальт-лампрофировая ассоциации) частично наложенные друг на друга комплексы юрского возраста с рудной минерализацией [Парада и др., 2022].

Магматические тела тяготеют к осям крупнейших антиклиналей и протягивающимся вдоль них разломам: Персияновскому в Южной антиклинали, к Главной антиклинали и Сулино-Константиновскому разлому и содержат свинцовую, цинковую, медную, золотосеребряную рудную минерализацию. Отметим, что к западу от региона в своде Главной антиклинали вдоль сместителей разрывных нарушений известно полиметаллическое оруденение (Нагольный кряж, Никитовка).

Указанная минерализация выявлена ПГО «Южгеология» в НГПР, ШГПР, ГЗГПР. Размещение крупных разрывных нарушений и рудно-магматических систем, проявлений интрузивных пород приведено на рисунке 1 с учетом [Парада и др., 2022]. Сопоставление площадей развития интрузий, крупных разрывов, рудно-магматических систем и распространения тех или иных микроэлементов в шахтных водах показывает их частичное наложение.

Повышенное содержание микроэлементов в водах пшш. Майская и Глубокая коррелируется с наличием интрузий. Набор компонентов высокой распространенности типичен для проявлений ценных рудных тел полиметаллов, что позволяет рассчитывать на их обнаружение.

### Выводы

Химические анализы шахтных вод действовавших в 1980-х гг. шахт Восточного Донбасса показали содержание *Pb, Cd, Ni, Co, Mo, V, Zn, Cu, Cr* от долей до нескольких миллиграммов в литре воды, их мозаичное распределение на площади региона. Наиболее насыщены воды НГПР, ШГПР и ГЗГПР, минимально – КГГПР, БКГПР. Повсеместно распространены *Pb, Zn, Cu, Mo, Cr, Ni*. Концентрации *Pb* и *Co* в целом низки. Распространен весьма незначительно в НГПР *Cd*, практически отсутствует в НГПР, ШГПР, БКГПР *V*. Обнаружена как прямая, так и обратная связь содержаний элементов между собой. Имеется специализация ГЗГПР на *Zn, Cu, Ni, Co, V*; КГГПР на *Mo*; НГПР на *Ni, Cd, Co, Cr*.

Повышенные содержания тяготеют к участкам сочетаний интрузий магматических пород и крупных разрывных нарушений в сводах антиклиналей и связаны с присутствием полиметаллического оруденения.

Перспективы обнаружения руд связаны с этими участками, прежде всего, в пределах Южной антиклинали. Динамизм содержания не исключает изучения площадей с невыясненным присутствием магматических пород.

Выводы публикации представляют интерес для геоэкологической реабилитации территории и поисков различных руд в регионе.

### Литература

1. Гавришин А.И. Шахтные воды и управление качеством грунтовых вод в Восточном Донбассе. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 3. – С. 127–138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008.
2. Горшков В.А. Очистка и использование сточных вод предприятий угольной промышленности. М.: Недра, 1981. – 269 с.
3. Докукин А.В., Докукина Л.С. Возникновение кислотных рудничных вод и борьба с ними. М.-Л.: Углетехиздат, 1950. – 332 с.
4. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2002. – 296 с.
5. Кравцов А.И. Геологические условия газонасности угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1968. – 330 с.



6. Парада С.Г., Давыденко Д.Б., Мохов А.В., Рыбин И.В., Трощенко В.В., Гамбург К.Ю. Металлогенический анализ Донбасса на основе современных геофизических данных. // Труды Южного научного центра РАН. Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, – 2022. – С. 78–93.
7. Мохов А.В. Микроэлементы в водах действующих шахт Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 6–15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002.
8. Назарова Л.Н. Шахтные воды восточной части Донбасса и некоторые вопросы происхождения их химического состава. // Гидрохимические материалы. – 1968. – Т. 47. – С. 99–109.
9. Посохов Е.В. Общая гидрохимия. Л.: Недра, 1975. – 208 с.
10. Куликова А.А., Сергеева Ю.А., Овчинникова Т.И., Хабарова Е.И. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6 – С. 135–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.
11. Хорошевская В.О. Сравнительная характеристика микроэлементного состава речных вод, дренирующих Донецкий и Кузбасский угольные бассейны. // Международный научно-исследовательский журнал – 2022. – № 5(119). Часть 1. – С. 124–134. DOI: 10.23670/IRJ.2022.119.5.062.
12. Cao Q., Yang L., Ren W. et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coalfields: an application of WebGIS technology. // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 755. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.
13. Cao Q., Yang L., Qian Ya., Chen S. Dissolution of harmful trace elements from coal and the environmental risk to mine water utilization. // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Vol. 30. No. 3. – pp. 7786–7800. DOI: 10.1007/s11356-022-22530-x.
14. Dai S., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R. et al. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review. // International Journal of Coal Geology. – 2019. – Vol. 185. No. 1. DOI: 10.1016/j.coal.2019.
15. Finkelman R.B., Plamer C.A., Wang P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. // International Journal of Coal Geology. – 2018. – Vol. 185. – pp. 138–160. DOI: 10.1016/j.coal.2017.09.005.
16. Han Z., Zhang F., Yao H. et al. Change of regional water chemistry driven by group coal mining in Changzhi basin, Shanxi, China. // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199809001.
17. Kursun I., Terzi M. Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review. // Journal of Mining & Environment. – 2018. – Vol. 9. No. 3. – pp. 641–655. DOI: 10.22044/jme.2018.6855.1518.
18. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia). // Mine Water and the Environment. – 2020. – Vol. 39. – pp. 464–472. DOI: 10.1007/s10230-020-00691-w.
19. Sun Y., Xiao K., Wang X. et al. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue. // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 28. No. 15. – pp. 18604–18615. DOI: 10.1007/s11356-020-11055-w.
20. Zhu Y., Zheng L., Chen X., Chen Y. Speciation Characteristics and Contamination Degree of Trace Elements in Coal Gangue Hill of a Mining Area in Huainan Coalfield, China. // Polish Journal of Environmental Studies. – 2024. – Vol. 33. No. 2. – pp. 1981–1989. DOI: 10.15244/pjoes/174397.

## References

1. Gavrishin A.I. The mine waters and the management of groundwater pollution in the Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 127–138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008. (In Russ.)
2. Gorshkov V.A. Treatment and use of wastewater from coal industry enterprises. Moscow. Nedra. 1981. 269 p. (In Russ.)



3. Dokukin A.V., Dokukina L.S. The emergence of acidic mine waters and the fight against them. Moscow-Leningrad. Ugletekhizdat. 1950. 332 p. (In Russ.)
4. Kizilshtein L.Ya. Ecogeochemistry of impurity elements in coals. Rostov-on-Don. SKNC VSh. 2002. 296 p. (In Russ.)
5. Kravtsov A.I. Geological conditions of gas content of coal, ore and non-metallic mineral deposits. Moscow. Nedra. 1968. 330 p. (In Russ.)
6. Parada S.G., Davydenko D.B., Mokhov A.V., Rybin I.V., Troshchenko V.V., Hamburg K.Yu. Metallogenic analysis of Donbass based on modern geophysical data. Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Rostov-on-Don Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2022. pp. 78–93. (In Russ.)
7. Mokhov A.V. Microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 6–15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002. (In Russ.)
8. Nazarova L.N. Mine waters of the eastern part of Donbass and some issues of the origin of their chemical composition. *Hydrochemical materials*. 1968. Vol. 47. pp. 99–109. (In Russ.)
9. Posokhov E.V. General hydrochemistry. Leningrad. Nedra. 1975. 208 p. (In Russ.)
10. Kulikova A.A., Sergeeva Yu.A., Ovchinnikova T.I., Khabarova E.I. Formation of mine waters and analysis of their purification methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020. No. 7. pp. 135–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145. (In Russ.)
11. Khoroshevskaya V.O. Comparative characteristics of the microelement composition of river waters draining the Donetsk and Kuzbass coal basins. *International Research Journal* 2022. No. 5(119). Part 1. pp. 124–134. DOI: 10.23670/IRJ.2022.119.5.062. (In Russ.)
12. Cao Q., Yang L., Ren W. et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coalfields: an application of WebGIS technology. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 755. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.
13. Cao Q., Yang L., Qian Ya., Chen S. Dissolution of harmful trace elements from coal and the environmental risk to mine water utilization. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. No. 3. pp. 7786–7800. DOI: 10.1007/s11356-022-22530-x.
14. Dai S., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R. et al. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review. *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 185. No. 1. DOI: 10.1016/j.coal.2019.
15. Finkelman R.B., Plamer C.A., Wang P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. *International Journal of Coal Geology*. 2018. Vol. 185. pp. 138–160. DOI: 10.1016/j.coal.2017.09.005.
16. Han Z., Zhang F., Yao H. et al. Change of regional water chemistry driven by group coal mining in Changzhi basin, Shanxi, China. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199809001.
17. Kursun I., Terzi M. Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review. *Journal of Mining & Environment*. 2018. Vol. 9. No. 3. pp. 641–655. DOI: 10.22044/jme.2018.6855.1518.
18. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia). *Mine Water and the Environment*. 2020. Vol. 39. pp. 464–472. DOI: 10.1007/s10230-020-00691-w.
19. Sun Y., Xiao K., Wang X. et al. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 28. No. 15. pp. 18604–18615. DOI: 10.1007/s11356-020-11055-w.
20. Zhu Y., Zheng L., Chen X., Chen Y. Speciation Characteristics and Contamination Degree of Trace Elements in Coal Gangue Hill of a Mining Area in Huainan Coalfield, China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 33. No. 2. pp. 1981–1989. DOI: 10.15244/pjoes/174397.

УДК 551.324.63

DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

Оригинальная статья

## Анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши

А.Х. Аджиев<sup>ORCID</sup>, Н.В. Кондратьева<sup>ORCID</sup>, В.В. Разумов<sup>ORCID</sup>,  
З.М. Керефова<sup>ORCID</sup>

Высокогорный геофизический институт, Россия, 360001, г. Нальчик,  
пр. Ленина, 2, e-mail: zknyaz-kbsu@mail.ru

Статья поступила: 03.10.2025, доработана: 10.12.2025, принята к публикации: 15.12.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Данная работа является результатом исследования модели поведения ледяных массивов ледника «Гарабаши» для использования в рекреационных целях. Изыскания проводились в 2025 году сотрудниками ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», в том числе авторами. Одним из участков использования для всесезонного катания на лыжах является ледник Гарабаши. С начала 1980-х гг. данный ледник является репрезентативным объектом ежегодных масс-балансовых измерений для мониторинга динамики массы ледникового покрова Эльбруса. За последние 19 лет наблюдений ледник постоянно находится в области отрицательных значений баланса массы, а это значит, что ледник ежегодно сокращается как по площади, так и в объёме. **Цель исследования:** Анализ многолетней динамики (1957–2025 гг.) границ ледника Гарабаши. **Методы исследования:** Динамика площадей ледника Гарабаши за разные годы определялась в результате мониторинга космоснимков с сайта Sentinel-2. Также проводились облеты БПЛА (Геоскан 401) территории обследования, в результате привязки аэрофотоснимка к космоснимку в программе ArcMap были построены границы ледника 2025 г. Для анализа привлекались также данные из научной литературы. **Результаты:** Уменьшение площади ледника, с 1957 г. по настоящее время, составило 1013497 м<sup>2</sup>, периметр сократился на 11963 м. Помимо антропогенного воздействия и эндогенных процессов, одной из причин деградации ледника Гарабаши являются значительные положительные аномалии летних температур.

**Ключевые слова:** ледник, космоснимок, беспилотник, туристско-рекреационный комплекс, потепление климата.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (Соглашение № 23-17-20001).

**Для цитирования:** Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Разумов В.В., Керефова З.М. Анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 17–27. DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

Original paper

## Analysis of the long-term Dynamics of the Garabashi glacier boundaries

A.Kh. Adzhiev<sup>ORCID</sup>, N.V. Kondratieva<sup>ORCID</sup>, V.V. Razumov<sup>ORCID</sup>,  
Z.M. Kerefova<sup>ORCID</sup>

High Mountain Geophysical Institute, 2 Lenin Ave., Nalchik 360001,  
Russian Federation, e-mail: zknyaz-kbsu@mail.ru

Received: 03.10.2025, revised: 10.12.2025, accepted: 15.12.2025

**Abstract: Relevance.** This work presents the results of investigating the behavioral model of the Garabashi Glacier ice mass for recreational use. The research was conducted in 2025 by specialists of the High Mountain Geophysical Institute, including the authors. The Garabashi Glacier is an area for all-season skiing. Since the early 1980s, this glacier has been a representative object of annual mass-balance measurements for the mass dynamics of the Elbrus glacial cover. Over the past 19 years of observation, the glacier has consistently remained in a negative mass balance region, meaning that the glacier is expanding annually in both area and volume. **Aim.** Analysis of the long-term dynamics (1957–2025) of the Garabashi Glacier boundaries. **Methods.** The area dynamics of the Garabashi Glacier over time were calculated using satellite images from the Sentinel-2 website. UAV (Geoscan 401) overflights of the observation area were also used. By georeferencing the aerial photographs with the satellite image in ArcMap, the glacier boundaries were constructed for 2025. Scientific literature data were also used for the analysis. **Results.** The glacier area has decreased by 1,013,497 m<sup>2</sup> since 1957, with its perimeter decreasing by 11,963 m. In addition to anthropogenic impact and endogenous processes, significant positive summer temperature anomalies are one of the causes of the Garabashi Glacier's degradation.

**Keywords:** glacier, satellite image, drone, tourist and recreational complex, global warming.

**Acknowledgments:** The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Agreement No. 23-17-2001).

**For citation:** Adzhiev A.Kh., Kondratieva N.V., Razumov V.V., Kerefova Z.M. Analysis of the long-term Dynamics of the Garabashi glacier boundaries. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 17–27. DOI: 10.46698/e6858-2115-8370-e

### Введение

В соответствии с Федеральной целевой программой по развитию курортов Северного Кавказа Правительство РФ заявило о намерении в течение ближайших лет построить и развить до уровня современного европейского класса на территории региона пять горнолыжных курортов. Строительство и развитие горнолыжных комплексов ведется в Матласе (Дагестан), Мамисоне (Северная Осетия), Архызе (Карачаево-Черкесия), Лаго-Наки (Адыгея) и на Эльбрусе (Кабардино-Балкария).

В Кабардино-Балкарии развивается всесезонный туристско-рекреационный комплекс (ВТРК) «Эльбрус», на территории которого находится ледник Гарабаша [Аджиев и др., 2020; Беккиев и др., 2021]. Поверхность ледника активно используется для катания на лыжах (рис. 1).



Рис. 1. Ледник Гарабаши. Архивное фото ФГБУ «ВГИ», 2023 год /

Fig. 1. Garabashi Glacier. Archive photo by the All-Russian State Geological Institute, 2023

Ледник Гарабаши – часть южного склона ледникового массива Эльбруса. На конусе Эльбруса он граничит с ледниками Терскол и Малый Азау.

### Материалы и методы

С начала 1980-х гг. ледник Гарабаши является репрезентативным объектом ежегодных масс-балансовых измерений для мониторинга динамики площади и массы ледникового покрова Эльбруса [Долгова и др., 2013; Коновалов, 2014; Чотчаев и др., 2021; Бурдзиева и др., 2024]. За последние 19 лет прямых наблюдений ледник постоянно находится в области отрицательных значений баланса массы, а это значит, что ледник ежегодно сокращается в объеме. Значения баланса массы составляют от -500 до -1500 мм в.э./год (рис. 2), что в среднем эквивалентно ежегодному понижению поверхности льда на 1–1,2 м [Kutuzov et al., 2019].

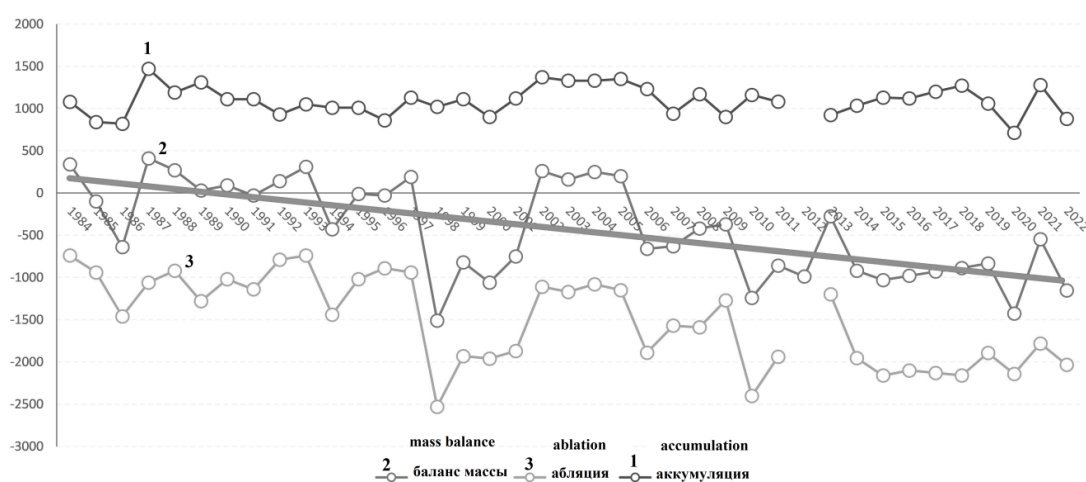


Рис. 2. График значений баланса массы ледника Гарабаши в мм водного эквивалента (мм в.э.) с 1984 года (начало инструментальных наблюдений) по 2022 год.

Красным цветом показана линия отрицательного тренда /

Fig. 2. Graph of the mass balance values of the Garabashi glacier in mm water equivalent (mm w.e.) from 1984 (the beginning of instrumental observations) to 2022. The negative trend line is shown in red



Отрицательный балансовый тренд отражается также в отступании фронта ледника, увеличении количества нунатаков (скальных выходов коренного ложа) и общем сокращении площади. Кроме того, из-за постоянного движения льда, и в том числе благодаря рельефу подстилающего ложа образуются новые трещины. Темпы сокращения площади ледника Гарабаши и в общем ледников Эльбруса постоянно возрастают, что в будущем может привести к существенным изменениям ледникового ландшафта, и необходимости проведения дополнительных работ по обеспечению безопасности.

Также отрицательный баланс массы означает объёмное сокращение ледника Гарабаши. Особенности морфологического строения его ложа (подлёдного рельефа) таковы, что изменения в плане (площадные) выглядят менее значительными, чем вертикальные [Рототаева и др., 2019]. При дешифрировании космических снимков можно фиксировать не только изменение положения фронта (языка) ледника и его боковых границ, но также, при достаточном разрешении изображений (более 1 м/пикс) положения трещин, а главное их размеров на поверхности.

В исследовании [Kutuzov et al., 2019] установлено, что, за период 1997–2017 гг. при сокращении площади оледенения всего на 10,8 %, Эльбрус потерял 22,8 % массы всего льда, то есть практически четверть. При этом абсолютная убыль объёма ледника Гарабаши за этот период составила  $\sim 0,05 \text{ км}^3$  или 25,7 %, что соответствует среднему понижению поверхности на  $14,21 \pm 0,15 \text{ м}$  (рис. 3), при отрицательном балансе массы, равном  $0,60 \pm 0,04 \text{ м}$  в эквиваленте/год. К 2022 году ледник потерял ещё примерно  $0,05 \text{ км}^3$  льда из-за ускоряющегося таяния, заметно сократившись по площади, главным образом из-за отступания языка и увеличения площади нунатаков (см. рис. 4).



Рис. 3. Изменение высоты поверхности ледников южного макросклона Эльбруса, в т.ч. ледника Гарабаши, за период 1997–2017 гг. по данным [Kutuzov et al., 2019] /

Fig. 3. Change in the surface height of glaciers on the southern macroslope of Elbrus, including the Garabashi glacier, for the period 1997–2017 according to data [Kutuzov et al., 2019]

Площадь ледникового покрова Эльбруса сокращается в течение всего периода наблюдений, что подтверждается работами [Лаврентьев и др., 2023; Татаренко, 2022; Tielidze et al., 2022]. Также анализируя данные космоснимков за период с 1957 по 1997 гг. с сайта Sentinel-2 (<https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-2>)



уменьшение площади оледенения Эльбруса составило 7,7 км<sup>2</sup> (-6 %) и примерно 15,5 км<sup>2</sup> с 1997 г. по настоящее время (-12 % площади за 25 лет). По контуру оледенения Эльбруса 2017 года его площадь составляет около 110 км<sup>2</sup>. Эпизоды наступания за этот период наблюдались только у ледника Кюкюртлю на западном склоне вулкана [Дроздов и др., 2024; Керимов, Курашева, 2023; Abakimov et al., 2022]. Современные климатические прогнозы и ежегодные данные балансового мониторинга позволяют сделать вывод о том, что темпы деградации ледников на Эльбрусе с каждым десятилетием возрастают.

Изменение площади ледника Гарабаши и положения его фронта соответствует общему тренду дегляциации Эльбруса. Совместный анализ полученных данных с сайта Sentinel-2 (<https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-2>) и данных съёмки с БПЛА (Геоскан 401), показал динамику фронта ледника за последние почти 30 лет (рис. 4). При этом темпы сокращения площади увеличиваются, что характерно как для соседних ледников, так и для всего ледового комплекса Эльбруса [Клюев и др., 2025; Kushnov et al., 2024].

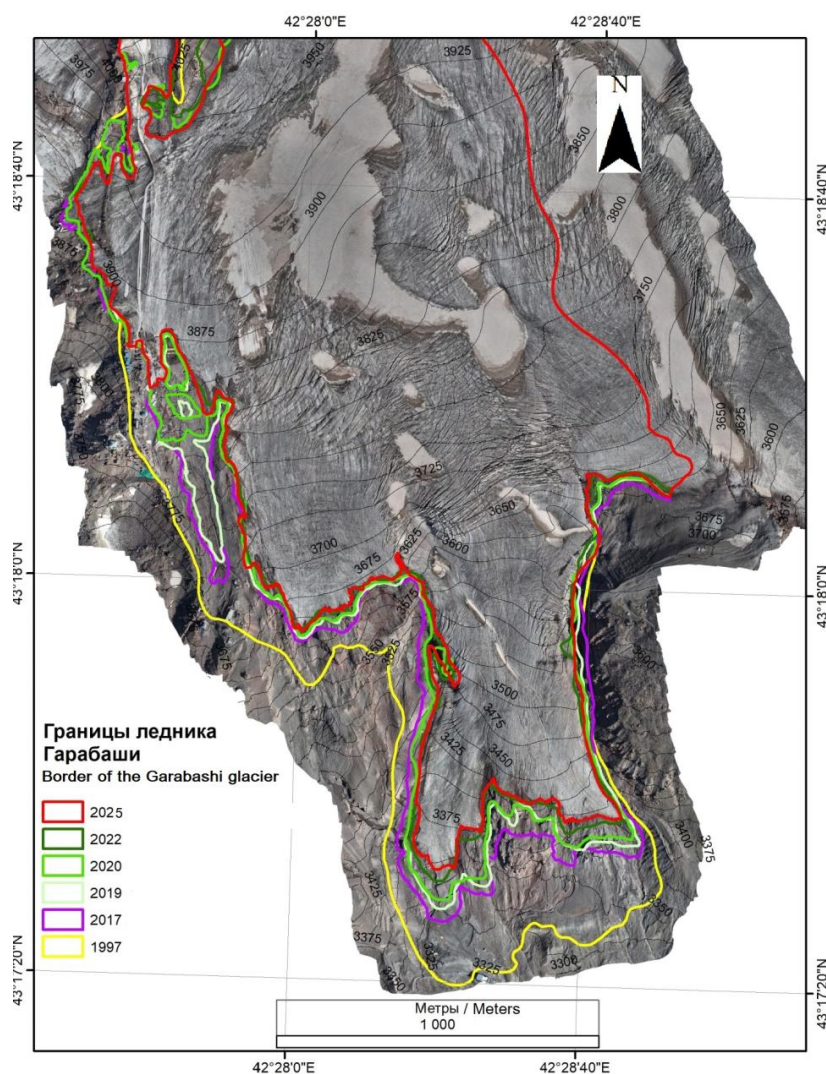


Рис. 4. Сокращение площади ледника Гарабаши в 1997–2025 гг. Подложка: АФС с БПЛА, 25.08.2025 г. /

Fig. 4. Shrinkage of the Garabashi Glacier in 1997–2025. Image: aerial survey from a UAV, 25.08.2025

Уменьшение площади ледника Гарабаши за 1957–2025 гг. авторами настоящей работы определено в результате привязки аэрофотоснимка к космоснимку в программе ArcMap и построения ГИС-слоя границ ледника. Оно составило 1013497 м<sup>2</sup> (рис. 5), периметр ледника сократился на 11963 м.

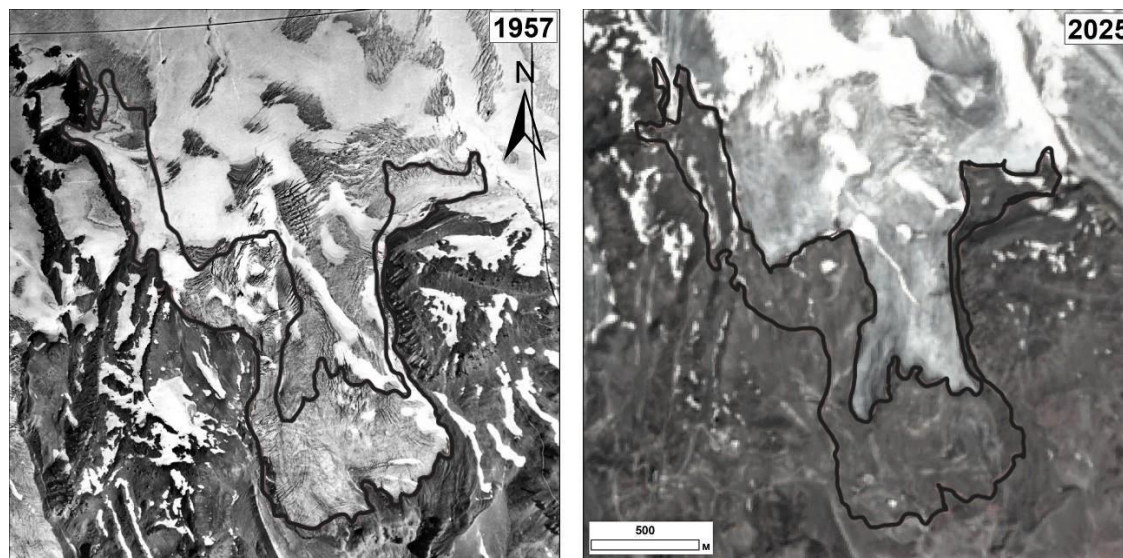


Рис. 5. Уменьшение площади ледника Гарабаши на Эльбрусе за 1957–2025 гг. /

Fig. 5. Decrease in area of the Garabashi glacier on Elbrus for 1957–2025

При пространственном разрешении изображения Sentinel-2 10 м, точность измерения площади составит  $5 \text{ м} \times 11963 \text{ м} = 59815 \text{ м}^2$ , что составляет около 6 %.

Среднее сокращение площади за 68 лет составляет 14904 м<sup>2</sup>/год.

В XX веке за период 1957–1999 гг. сокращение площади составило 252790 м<sup>2</sup>, в среднем за 42 года – 6019 м<sup>2</sup>/год [Керимов, Курашева, 2023; Gladkov et al., 2024].

### Обсуждение результатов

Термический режим играет важную роль в процессе отступления ледников Центрального Кавказа [Носенко и др., 2013; Frolov et al., 2023].

В работе [Беккиев и др., 2020] проведен анализ изменения температурного режима и режима осадков на высокогорной станции Терскол (склон горы Чегет и Терскольского ущелья) за последние 60 лет.

Среднегодовая температура в Терсколе за период 1957–2019 гг. составила 2,6°C при норме 2,54°C, что является наименьшей из среднегодовых температур всех других м/станций и соответствует зональному распределению температур. Как было сказано выше, за весь период исследования годовые (0,08°C/10 лет), зимние (-0,06°C/10 лет) весенние (0,02°C/10 лет) и осенние (-0,01°C/10 лет) температуры оставались практически постоянными, скорость роста средних летних температур составила 0,32°C/10лет ( $D=35\%$ ). Всемирной метеорологической организацией 1976 г. определен как год начала глобального потепления. С 1976 года по 2019 год скорость роста средних летних температур на высокогорной станции Терскол значительно увеличилась до 0,44°C/10 лет с высоким вкладом тренда в суммарную дисперсию  $D=42\%$  (максимальный из всех сезонных трендов), что видно на рисунке 6.

June - August/ июнь-август:  $a=0,44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$   $D=42\%$

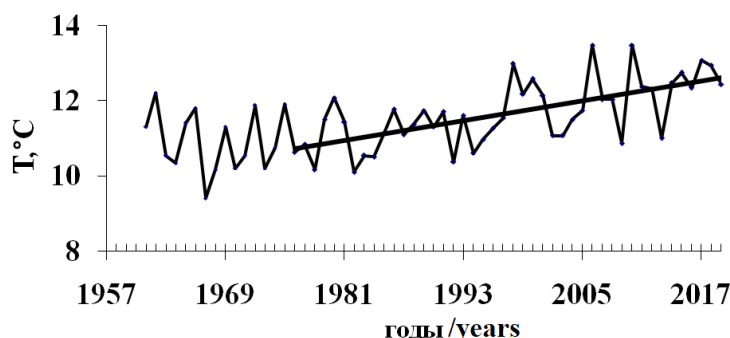


Рис. 6. Ход средней летней температуры воздуха с трендом за 1976–2019 гг. на м/станции Терскол

$a$  – угловой коэффициент линейного тренда,  $^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ;  $D$  – вклад тренда в суммарную дисперсию, %.

Fig. 6. Average summer air temperature with trend for 1976–2019 at Terskol meteorological station  
 $a$  – slope of the linear trend,  $^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$ ;  $D$  – contribution of the trend to the total variance, %.

Таким образом, с середины 70-х годов прошлого столетия изменение термического режима исследуемого района по данным м/станции Терскол происходило за счет значительного роста средних летних температур при относительной стабильности других сезонных (годовой) средних температур [Solomina et al., 2023].

Из анализа динамики абсолютных максимумов температур за 2006–2024 гг. следует, что в этот период происходит значительное увеличение максимальных зимних на  $0,96^{\circ}\text{C}/\text{год}$  ( $D=71\%$ ) и максимальных летних на  $0,65^{\circ}\text{C}/\text{год}$  ( $D=37\%$ ).

Десятилетие 2006–2015 гг. характеризуется также ростом средних зимних и весенних температур, с наиболее значимым вкладом за счет увеличения абсолютных максимумов температур. Темпы роста летних температур увеличились с  $0,32^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  до  $0,44^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  в период 1976–2019 гг., что привело к росту темпов отступления исследуемого ледника в XXI веке. По нашему мнению, деградация (отступление) ледника Гарабаши связана с такой динамикой летних температур [Беккиев и др., 2020].

Анализ режима осадков в Терсколе показал, что величина среднегодовой суммы осадков достаточно высока и составляет 970 мм при климатической норме 935,9 мм (1961–1990 гг.). Максимум суммы осадков приходится на летний сезон – 300,6 мм, затем по убыванию идут осенний, весенний и зимний сезоны. Несмотря на то, что с 1961 года на станции Терскол наблюдался рост суммы годовых осадков со скоростью  $22,8\text{ мм}/10\text{ лет}$ , а с 1976 года скорость роста годовых сумм выросла до  $28,1\text{ мм}/10\text{ лет}$ , количество зимних осадков в Терсколе имело устойчивую тенденцию к их уменьшению. На м/станции Терскол с 1976 года происходило уменьшение зимних сумм осадков со скоростью  $4,9\text{ мм}/10\text{ лет}$ . При этом суточные максимумы осадков имели отрицательную тенденцию для всех сезонов (с наибольшей зимой и осенью). Следовательно, аккумуляция также не вносила положительную составляющую в баланс деградации ледников [Беккиев и др., 2020].

Таким образом, термический режим играет важную роль в процессе отступления ледника Гарабаши. Причинами его деградации являются значительные положительные аномалии летних температур. Показано, что в XXI веке произошло увеличение темпов деградации ледников под действием роста среднесуточных



летних температур. Это вызвано усилением скорости роста летних температур до  $0,4^{\circ}\text{C}/10$  лет в период глобального потепления с 1976 года по настоящее время.

Скорости отступания ледников значительно увеличились в последние 5–6 лет и достигали максимальных значений – 25–27 тыс. м<sup>2</sup> в год (ледники Малый Азау и Терскол) и 23 тыс. м<sup>2</sup> в год (ледник Гарабаши).

При сохранении таких темпов деградации в будущем (как это происходило за последние 5–15 лет), за последующие 5 лет ледник Гарабаши уменьшится на 50–75 тыс. м<sup>2</sup> и отступит примерно на 70–100 м. За 10 лет ледник Гарабаши уменьшится на 100–150 тыс. м<sup>2</sup> по площади и на 140–200 м по длине.

Вследствие слабой заморенности (площадь участков ледников, покрытых поверхностной мореной, составляет для ледника Гарабаши – 6–7 тыс. м<sup>2</sup>) для процесса деградации ледников южного склона Эльбруса не характерно формирование длительно существующих массивов мёртвых льдов [Dokukin et al., 2022]. Встречаются только редкие отдельные длительно существующие участки мёртвых льдов, как, например, гряда срединной морены перед ледником Малый Азау, которая существует более 20 лет. Остальные участки заморенных льдов сокращаются с такой же скоростью, как и сами ледники.

### Заключение

В данной работе рассматривалась одна из причин деградации ледника Гарабаши – температурный режим. Хотя антропогенные и эндогенные процессы, конечно, влияют также на трансформацию ледника Гарабаши. Но эти факторы авторы рассматривают в следующих исследованиях.

Авторами выполнен анализ многолетней динамики границ ледника Гарабаши – части южного склона ледникового массива Эльбруса.

Отмечено уменьшение площади ледника Гарабаши на 1013497 м<sup>2</sup> за период с 1957 по 2025 гг., периметр сократился на 11963 м.

Одной из причин деградации ледника Гарабаши являются значительные положительные аномалии летних температур. Показано, что в XXI веке произошло увеличение темпов деградации ледников под действием роста среднесуточных летних температур. Это вызвано усилением скорости роста летних температур до  $0,4^{\circ}\text{C}/10$  лет в период глобального потепления с 1976 года по настоящее время.

Скорости отступания ледников значительно увеличились в последние 5–6 лет и достигали максимальных значений – 25–27 тыс. м<sup>2</sup> в год (ледники Малый Азау и Терскол) и 23 тыс. м<sup>2</sup> в год (ледник Гарабаши).

При сохранении таких темпов деградации в будущем, за последующие 5 лет ледник Гарабаши уменьшится на 50–75 тыс. м<sup>2</sup> и отступит примерно на 70–100 м. За 10 лет ледник Гарабаши уменьшится на 100–150 тыс. м<sup>2</sup> по площади и на 140–200 м по длине.

### Литература

1. Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Кондратьева Н.В., Юрченко Н.В. Современное состояние ледников Большого Кавказа. Нальчик: ВГИ, изд-во ООО «Фрегат», 2020. – 132 с.
2. Беккиев М.Ю., Аджиев А.Х., Докукин М.Д., Залиханов М.Ч., Ташилова А.А., Юрченко Н.В. Мониторинг деградации горных ледников Приэльбрусья в условиях изменения климата. // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Экология и космос» им. акад. К.Я. Кондратьева. СПб., 2020. – С. 6–24.



3. Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Ташилова А.А. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2021. – Т. 7. № 3. – С. 113–141. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141.
4. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.
5. Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800–2005 гг.) по дендрохронологическим данным. // *Лёд и снег*. – 2013. – Т. 53. № 1. – С. 34–42.
6. Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Авилов В.К., Артамонов А.Ю., Полюхов А.А., Железнова И.В., Ярынич Ю.И. Метеорологический режим высокогорной зоны Эльбруса в период аккумуляции. // *Лёд и снег*. – 2024. – Т. 64. № 1. – С. 25–40. DOI: 10.31857/S2076673424010022.
7. Керимов А.М., Корчагина Е.А. Температурный режим, осадки и снежность ледника Гарабаши (южный сектор Эльбруса) за последние 60 лет. // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2015. – № 1(63). – С. 97–104.
8. Керимов А.М., Курашева О.А. особенности формирования химического состава рек ледникового питания Кавказа при интенсивной деградации оледенения. // *Метеорология и гидрология*. – 2023. – № 2. – С. 80–89. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-1-2-80-89.
9. Ключев Р.В., Бригада В.С. Совершенствование мониторинга оползневых процессов горных склонов при наличии транспортной инфраструктуры. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 66–78. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001.
10. Коновалов В.Г. Моделирование и реконструкция параметров речного стока и баланса массы ледников на Северном Кавказе. // *Лёд и снег*. – 2014. – Т. 54. № 3. – С. 16–30.
11. Лаврентьев И.И., Смирнов А.М., Торопов П.А., Елагина Н.Э., Киселёва Т.Д., Дроздов Е.Д., Дегтярёв А.И. Гляциологические исследования института географии РАН на Эльбрусе в 2023 г. // *Лёд и снег*. – 2023. – Т. 63. № 4. – С. 553–557. DOI: 10.31857/S2076673423040099.
12. Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Рототаева О.В., Шахгеданова М.В. Реакция ледников центрального Кавказа в 2001–2010 гг. на изменения температуры и количества осадков. // *Лёд и снег*. – 2013. – Т. 53. № 1. – С. 26–33.
13. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Никитин С.А., Керимов А.А., Тарасова Л.Н. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. // *Лёд и снег*. – 2019. – Т. 59. № 1. – С. 5–22. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22.
14. Татаренко Н.В. Концентрации тяжелых металлов в сезонных слоях ледника Гарабаши на южном склоне Эльбруса. // *Успехи современного естествознания*. – 2022. – № 1. – С. 49–55. DOI: 10.17513/use.37769.
15. 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.
16. Abakumov E., Kushnov I., Polyakov V., Tembotov R. Micromorphology of cryoconite on Garabashi and Skhelda glaciers and soils of Baksan gorge, mt. Elbrus, Central Caucasus. // *Polish Polar Research*. – 2022. – Vol. 43. No. 1. – pp. 1–20. DOI: 10.24425/ppr.2021.138590.
17. Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V. Evolution of lakes at Dzhikiugankez glacier (Northern Elbrus region) in 1957–2020, taking into account subsurface flow channels. // *Water Resources*. – 2022. – Vol. 49. No. S1. – pp. S23–S36.
18. Frolov D.M., Rzhantsyn G.A., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E. Thermal geophysical investigation of the snow cover, ice and frozen ground in the lite of climate variation. // In: *Processes in GeoMedia*. Singapore, 2023. – pp. 247–252.
19. Gladkov G.V., Kimeklis A.K., Tembotov R.Kh., Ivanov M.N., Andronov E.E., Abakumov E.V. Linking the composition of cryoconite prokaryotic communities in the arctic, Antarctic, and

Central Caucasus with their chemical characteristics. // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. No. 1. – pp. 15838. DOI: 10.1038/s41598-024-64452-3.

20. Kushnov I., Tembotov R., Nizamutdinov T., Abakumov E. Role of cryoconite translocation on the biogeochemical features of alpine soils at the Central Caucasus region, mount Elbrus. // *Environmental Processes*. – 2024. – Vol. 11. No. 2. – pp. 23. DOI: 10.1007/s40710-024-00706-6.

21. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. // *Frontiers in Earth Science*. – 2019. – No. 7(153). – pp. 1–16. DOI: 10.3389/feart.2019.00153.

22. Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S. First10be dates of late holocene moraines of the Kashkatash and Irik glaciers, Northern Caucasus. // *Ice and Snow*. – 2023. – Vol. 63. No. 3. – pp. 410–425. DOI: 10.31857/S2076673423030110.

23. 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. No. 2. – pp. 489–504. DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.

## References

1. Adzhiev A.Kh., Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kondratieva N.V., Yurchenko N.V. Current state of glaciers of the Great Caucasus. Nalchik: VGI, Publishing House “Fregat”. 2020. 132 p. (In Russ.)

24. Bekkiev M.Yu., Adzhiev A.Kh., Dokukin M.D., Zalikhanov M.Ch., Tashilova A.A., Yurchenko N.V. Monitoring the degradation of mountain glaciers in the Elbrus region under climate change. In: *Proc. of the IV All-Russ. Sc. Conf. “Ecology and Space” named after Academician K.Ya. Kondratiev*. Saint. Petersburg. 2020. pp. 6–24. (In Russ.)

25. Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Tashilova A.A. Current degradation of glacier valleys of the Central Caucasus. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021. Vol. 7. No. 3. pp. 113–141. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141. (In Russ.)

26. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. The impact of geodynamic processes on the geocological load of a mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)

27. Dolgova E.A., Matskovsky V.V., Solomina O.N., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Khmelevskoy I.F. Reconstruction of the mass balance of the Garabashi glacier (1800–2005) based on dendrochronological data. *Ice and Snow*. 2013. Vol. 53. No. 1. pp. 34–42. (In Russ.)

28. Drozdov E.D., Toropov P.A., Avilov V.K., Artamonov A.Yu., Polyukhov A.A., Zheleznova I.V., Yarynich Yu.I. Meteorological regime of the high zone of Elbrus during the accumulation period. *Ice and Snow*. 2024. Vol. 64. No. 1. pp. 25–40. DOI: 10.31857/S2076673424010022. (In Russ.)

29. Kerimov A.M., Korchagina E.A. Temperature regime, precipitation, and snow content of the Garabashi glacier (southern sector of Elbrus) over the past 60 years. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center RAS*. 2015. No. 1 (63). pp. 97–104. (In Russ.)

30. Kerimov A.M., Kurasheva O.A. Features of the chemical composition of glacial-fed rivers in the Caucasus during intensive degradation of glaciation formation. *Meteorology and Hydrology*. 2023. No. 2. pp. 80–89. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-1-2-80-89. (In Russ.)

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

32. Kononov V.G. Modeling and analysis of river runoff parameters and glacier mass balance in the North Caucasus. *Ice and Snow*. 2014. Vol. 54. No. 3. pp. 16–30. (In Russ.)

33. Lavrentyev I.I., Smirnov A.M., Toropov P.A., Elagina N.E., Kiseleva T.D., Drozdov E.D., Degtyarev A.I. Glaciological studies of the Institute of Geography of the Russian Academy of

Sciences on Elbrus in 2023. *Ice and Snow*. 2023. Vol. 63. No. 4. pp. 553–557. DOI: 10.31857/S2076673423040099. (In Russ.)

34. Nosenko G.A., Khromova T.E., Rototaeva O.V., Shakhgedanova M.V. Response of glaciers of the Central Caucasus in 2001–2010 to changes in temperature and precipitation. *Ice and Snow*. 2013. Vol. 53. No. 1. pp. 26–33. (In Russ.)

35. Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Kerimov A.M., Kutuzov S.S., Lavrentyev I.I., Nikitin S.A., Kerimov A.A., Tarasova L.N. Changes in the mass balance of the Garabashi (Elbrus) glacier at the turn of the 20th–21st centuries. *Ice and Snow*. 2019. Vol. 59. No. 1. pp. 5–22. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22. (In Russ.)

36. Tatarenko N.V. Metal concentrations in seasonal layers of the Garabashi glacier on the southern slope of Elbrus. *Advances in Modern Natural Science*. 2022. No. 1. pp. 49–55. DOI: 10.17513/use.37769. (In Russ.)

37. Chotchaev H.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high-mountain territories by geoeological 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.)

38. Abakumov E., Kushnov I., Polyakov V., Tembotov R. Micromorphology of cryoconite on Garabashi and Skhelda glaciers and soils of Baksan gorge, mt. Elbrus, Central Caucasus. *Polish Polar Research*. 2022. Vol. 43. No. 1. pp. 1–20. DOI: 10.24425/ppr.2021.138590.

39. Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V. Evolution of lakes at Dzhikiugankez glacier (Northern Elbrus region) in 1957–2020, taking into account subsurface flow channels. *Water Resources*. 2022. Vol. 49. No. S1. pp. S23–S36.

40. Frolov D.M., Rzhantsyn G.A., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E. Thermal geophysical investigation of the snow cover, ice and frozen ground in the lite of climate variation. In: *Processes in GeoMedia*. Singapore. 2023. pp. 247–252.

41. Gladkov G.V., Kimeklis A.K., Tembotov R.Kh., Ivanov M.N., Andronov E.E., Abakumov E.V. Linking the composition of cryoconite prokaryotic communities in the arctic, Antarctic, and Central Caucasus with their chemical characteristics. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 15838. DOI: 10.1038/s41598-024-64452-3.

42. Kushnov I., Tembotov R., Nizamutdinov T., Abakumov E. Role of cryoconite translocation on the biogeochemical features of alpine soils at the Central Caucasus region, mount Elbrus. *Environmental Processes*. 2024. Vol. 11. No. 2. pp. 23. DOI: 10.1007/s40710-024-00706-6.

43. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*. 2019. No. 7(153). pp. 1–16. DOI: 10.3389/feart.2019.00153.

44. Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S. First10be dates of late holocene moraines of the Kashkatash and Irik glaciers, Northern Caucasus. *Ice and Snow*. 2023. Vol. 63. No. 3. pp. 410–425. DOI: 10.31857/S2076673423030110.

45. 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. No. 2. pp. 489–504. DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.

УДК 550.832

DOI: 10.46698/v5462-5849-8970-s

Оригинальная статья

## Геофизическая технология заканчивания нефтяных скважин и долговременного мониторинга их работы

Д.А. Будник<sup>1</sup>, А.Д. Савич<sup>2</sup>, С.В. Галкин<sup>3</sup>, Д.Г. Халилов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», Россия, 614000, г. Пермь, ул. Ленина, 62,  
e-mail: Denis.Budnik@lukoil.com;

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия,  
614990, г. Пермь, ул. Генкеля, 8, e-mail: savich194@mail.ru;

<sup>3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия,  
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29,  
e-mail: doc\_galkin@mail.ru;

<sup>4</sup> ПАО «Пермнефтегеофизика», Россия, 614090, г. Пермь, ул. Лодыгина, 34,  
e-mail: HalilovDG@rusgeology.ru

Статья поступила: 11.07.2025, доработана: 27.10.2025, принята к публикации: 30.10.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Разработка технологии рационального заканчивания скважин, включающей технологические операции по вскрытию продуктивных пластов бурением, цементированию законного пространства, вторичному вскрытию и вызову притока из пластов, является одной из наиболее актуальных задач, обеспечивающих длительную эксплуатацию нефтяных скважин с высокими дебитами. Объединение этапов вторичного вскрытия и вызова притока в единый технологический комплекс с реализацией высокоэффективных способов перфорации скважин позволяет значительно повысить качество освоения продуктивных интервалов при кратном уменьшении времени и затрат геолого-технических мероприятий. **Цель исследований.** Целью работы является оптимизация процесса заканчивания нефтяных скважин путем разработки специальных взрывозащищенных глубинных приборов и геофизических грузонесущих кабелей, в состав которых помимо токоведущих жил включены оптоволоконные модули и капилляр (трубка). **Методы работы.** Технология предусматривает после снижения уровня бурового раствора в стволе скважины производить закачку в интервал продуктивного пласта по капиллярной трубке геофизического кабеля специальной перфорационной жидкости. Последующая перфорация на депрессии под глубинным насосом обеспечивает очистку прискважинной зоны коллектора. Разработанная технология позволяет осуществлять долговременный мониторинг параметров эксплуатации скважин на основе оптоволоконной термометрии с использованием глубинных приборов, расположенных выше прострелочно-взрывной аппаратуры. Необходимость использования глубинных приборов вызвана отсутствием в настоящее время датчиков давления и состава флюида в оптоволоконном исполнении. **Результаты работ.** Разработанная технология позволяет в процессе эксплуатации скважин выполнять текущие гидродинамические исследования пластов. Наличие капиллярной трубки дает возможность производить в интервал вторичного вскрытия дозированную подачу перфорационных жидкостей, приготовленных на основе поверхностно-активных веществ, что позволяет дополнительно очистить прискважинную зону пласта и повысить дебит.

**Ключевые слова:** скважина, вторичное вскрытие на депрессии, геофизический кабель, капиллярная трубка, долговременный мониторинг, оптоволоконный распределенный датчик температуры, перфорационная жидкость.

**Благодарности:** Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

**Для цитирования:** Будник Д.А., Савич А.Д., Галкин С.В., Халилов Д.Г. Геофизическая технология заканчивания нефтяных скважин и долговременного мониторинга их работы. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 28–41. DOI: 10.46698/v5462-5849-8970-s



DOI: 10.46698/v5462-5849-8970-s

Original paper

# Geophysical technology for oil wells completion and long-term performance monitoring

D.A. Budnik<sup>1</sup>, A.D. Savich<sup>2</sup>, S.V. Galkin<sup>3</sup>, D.G. Khalilov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> LUKOIL-PERM, LLC, 62 Lenina Str., Perm 514000, Russian Federation,  
e-mail: Denis.Budnik@lukoil.com;

<sup>2</sup> Perm State National Research University, 8 Genkel Str., Perm 614990, Russian Federation,  
e-mail: savich194@mail.ru;

<sup>3</sup> Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Pr.,  
Perm 614990, Russian Federation, e-mail: doc\_galkin@mail.ru;

<sup>4</sup> Permneftegeofizika PJSC, 34 Lodygina Str., Perm 614090, Russian Federation,  
e-mail: HalilovDG@rusgeology.ru

Received: 11.07.2025, revised: 27.10.2025, accepted: 30.10.2025

**Abstract: Relevance.** The development of a rational well completion technology, including the technological operations of drilling through productive formations, cementing of the casing string annulus, secondary drilling-in and stimulation jobs is one of the crucial tasks for ensuring long-term operation of high-output oil wells. Integrating the stages of secondary opening and stimulation stages into a unified technological complex with the implementation of high-performance well perforation techniques allows to significantly improve the quality of productive formations development alongside manifold reduction of the time and costs of geological and engineering operations. **Aim.** The aim of this study is the optimization of oil wells completion by developing specialized explosion-proof bottomhole instrument and geophysical load-bearing cables, which include, in addition to conducting core, fibre-optic modules and a capillary tube. **Methods.** The technology suggests that after the reduction of the drilling mud level in the wellbore, special perforating fluid is injected into the productive formation to clean the near-wellbore area. Subsequent perforation under depression using a deep-well pump ensures the cleaning of the near-wellbore zone of the reservoir. The developed technology allows for long-term monitoring of well operation parameters using fiber-optic thermometry and deep-well instruments located above the blasting equipment. The need to use downhole instruments is due to the current lack of fiber-optic pressure and fluid composition sensors. **Results.** The developed technology allows for ongoing hydrodynamic reservoir testing during the operation of wells. The presence of a capillary tube enables the controlled delivery of perforation fluids based on surfactants to the secondary perforation interval. This helps to further clean the near-wellbore zone and increase the flow rate.

**Keywords:** well, secondary drilling-in, geophysical cable, capillary tube, long-term monitoring, fibre-optic distributed temperature gauge, perforating fluid.

**Acknowledgements:** The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0005).

**For citation:** Budnik D.A., Savich A.D., Galkin S.V., Khalilov D.G. Geophysical technology for oil wells completion and long-term performance monitoring. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 28–41. DOI: 10.46698/v5462-5849-8970-s

## Введение

Вторичное вскрытие продуктивных пластов является одним из завершающих этапов при заканчивании скважин, выполняется, в основном, при помощи кумулятивных перфораторов и предшествует вызову притока флюида из пласта. В совре-

менных скважинах перфорация, как правило, выполняется в условиях репрессии на пласт, что способствует увеличению радиуса ранее образовавшейся на этапах бурения и цементирования зоны ухудшенной проницаемости и в конечном итоге к дальнейшему снижению продуктивности коллектора [Рябokonь и др., 2000]. В частности, в работе [Гайворонский и др., 2006] отмечается, что при радиальном притоке жидкости к совершенной скважине, дренирующей пласт диаметром 300 м, половина энергетических затрат на продвижение флюида к забою приходится на зону пласта вокруг скважины радиусом 5,5 м, что предъявляет особые требования к сохранению ее фильтрационных свойств. В работе [Гасумов, Гасумов, 2023] качество строительства скважин предложено определять посредством оценки каждого из трех этапов ее строительства – бурения, крепления и освоения. Оценка последнего этапа зависит от степени сохранения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) продуктивного пласта.

Анализ эффективности применения современных методов интенсификации притока, например гидроразрыва пласта (ГРП), показывает, что зачастую продуктивность скважин сопровождается значительным ростом их обводненности. Как показано в публикации [Шумилов, 2019], одной из причин является нарушение целостности цементного камня за обсадной колонной в результате воздействия на крепь скважины высоких гидравлических давлений. Это приводит к образованию каналов и зазоров в заколонном пространстве, которые способствуют поступлению флюида из водонасыщенных пластов. Следует также отметить, что предшествующие ГРП прострелочно-взрывные работы (ПВР) также могут приводить к нарушению герметичности крепи в результате воздействия знакопеременных давлений высоких значений в условиях различия упругих свойств эксплуатационной колонны и цементного камня [Deng et al., 2023]. Величины этих давлений зависят от многих факторов, таких как выбор типа перфорационных зарядов и систем, плотности перфорации, глубины интервалов вторичного вскрытия и связанное с ней гидростатическое давление в стволе скважины и другие. Важную роль играют геометрические параметры ствола скважины и в частности диаметры обсадных колонн.

### Методы исследований

В настоящее время в Пермском регионе в подавляющем большинстве ведется бурение скважин малого диаметра (СМД), крепление которых производится обсадными трубами с условным диаметром 114 мм. Для примера, на рисунке 1 приведено сравнение результатов измерений максимальных, гидростатических и избыточных давлений по скважинам с диаметрами обсадных колонн 114 и 146 мм. Уточним, что избыточные давления ( $P_{изб}$ ) определялись как разность между максимальным измеренным его значением и гидростатическим давлением, создаваемым столбом жидкости в стволе скважины. При этом возникающие в скважинах малого диаметра  $P_{изб}$  имеют значения значительно более высокие чем для колонн 146 мм (рис. 1). В пересчете на 100 грамм взрывчатого материала (ВМ), который использовался при перфорации скважин, минимальный рост значений  $P_{изб}$  равняется 7,0 МПа в скважине 1334 Ш. В остальных скважинах малого диаметра, каждые дополнительные 100 граммов ВМ увеличивали его значения от 7,7 до 8,3 МПа/100г ВМ. В результате показатели  $P_{изб}$  находились в диапазоне 27,8 – 61,5 МПа. В колоннах 146 мм даже при использовании существенно большей массы ВМ, избыточные давления ниже и находятся в диапазоне от 18,7 до 45,4 МПа.

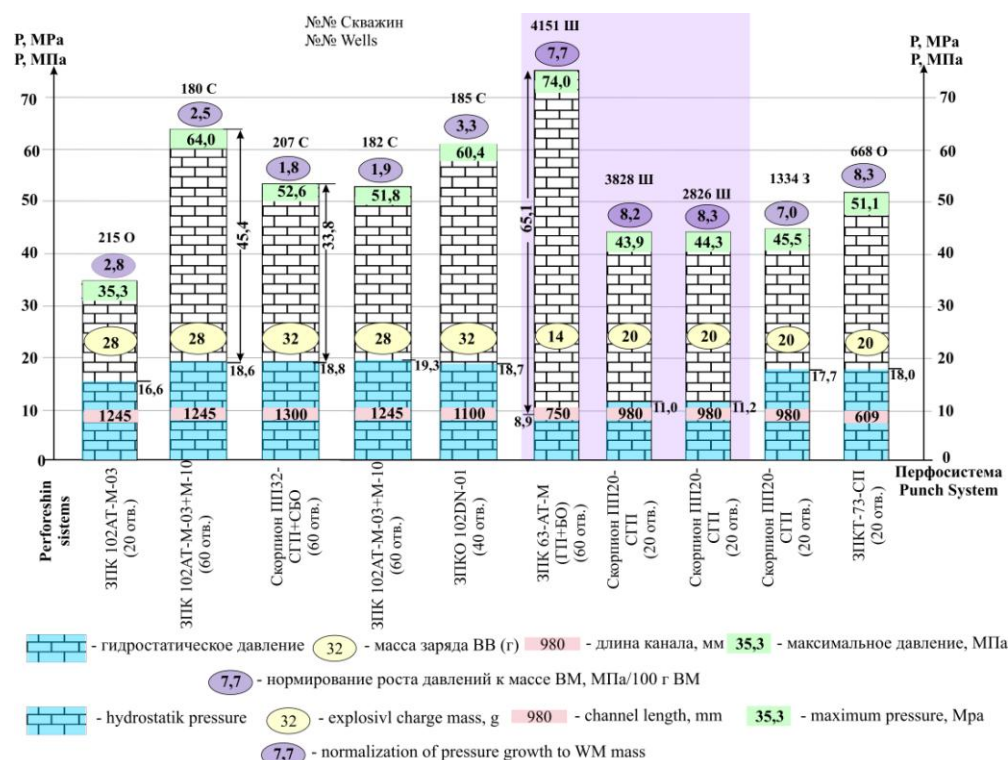


Рис. 1. Значения измеренных и расчетных давлений в скважинах /

Fig. 1. Values of measured and calculated pressures in wells

Таким образом, определяющее влияние на величину избыточных давлений оказывает внутренний объем перфорируемой колонны. Воздействие оказывают также конструктивные особенности кумулятивных зарядов и фильтрационно-емкостные свойства продуктивных пластов. Использование технологий и прострелочно-взрывной аппаратуры, применение которых сопровождается возникновением больших значений  $P_{изб}$ , зачастую приводит к нарушению крепи скважин в виде образования каналов и зазоров. Даже их незначительные размеры будут служить потенциальными триггерами для дальнейшего разрушения цементного камня при реализации мероприятий по интенсификации притока и, в частности, выполнении ГРП. С учетом этого, целью исследований поставлена задача разработки комплексной технологии и технических средств реализации наиболее эффективных способов вторичного вскрытия пластов.

В идеальном случае выполнение операций по заканчиванию скважин должно быть технологически увязано между собой и объединять этапы вторичного вскрытия и освоения (вызова притока) продуктивных пластов в непрерывный процесс, выполняемый за один спуск оборудования в скважину, которое будет извлечено только по истечении межремонтного периода. Критерием качества выполненного комплекса работ следует считать высокий показатель гидродинамического совершенства вскрытия, отражающий улучшение или сохранение параметров естественной проницаемости коллектора в прискважинной зоне пласта, что также отмечается в работе [Гасумов, Гасумов, 2023].

В последние годы на нефтяных месторождениях Пермского края реализуется комплексная технология вторичного вскрытия пластов, основой которой является предварительный спуск на кабеле перфоратора под глубинно-насосное оборудо-

вание (ГНО). После создания проектной депрессии понижением уровня насосом, выполняется отстрел перфоратора, и скважина запускается в работу. Такой подход позволяет не только сохранить коллекторские свойства пластов за счет исключения операций по дополнительному глушению скважин, но и улучшить их посредством депрессионной очистки, в результате которой происходит извлечение из перфорационных каналов разрушенной породы, образующей зону повреждения и уплотнения [Xu et al., 2022]. Все это приводит к увеличению дебитов, а также кратному сокращению сроков освоения скважин. После завершения перфорации прострелочно-взрывную аппаратуру (ПВА) опускают ниже вскрытого интервала и оставляют в скважине вплоть до первого ремонта насоса. Схема расположения оборудования в скважинах, эксплуатируемых электроцентробежными и штанговыми насосами, показана на рисунке 2. Опыт применения технологии показал, что в среднем фактические дебиты нефти после ввода объектов в эксплуатацию превышают плановые значения более чем на 50 %.

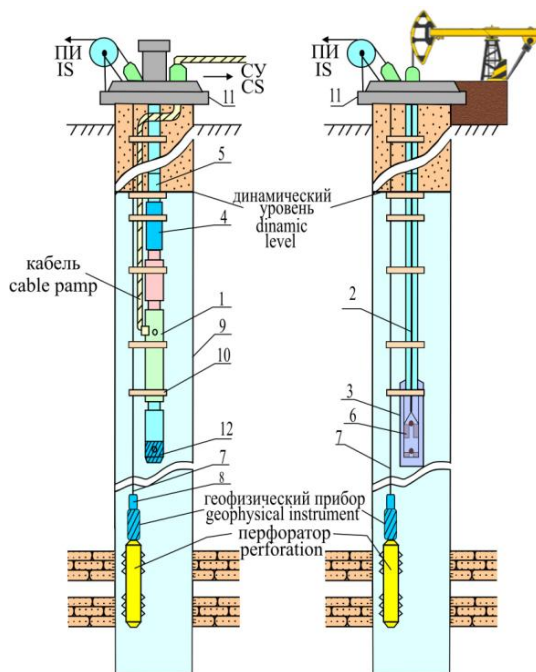


Рис. 2. Схема расположения оборудования при вторичном вскрытии пластов под насосами  
1 – погружной электродвигатель;  
2 – насосные штанги; 3 – насос (ШГН);  
4 – насос (ЭЦН); 5 – колонна НКТ; 6 – плунжер;  
7 – кабель геофизический; 8 – кабельный наконечник; 9 – эксплуатационная колонна;  
10 – децентрактор; 11 – планшайбы с кабельными вводами; 12 – погружной блок телеметрии;  
СУ – станция управления ЭЦН; ПИ – пульт инициирования перфоратора /

Fig. 2. The layout of the equipment during the secondary opening of the layers under the pumps  
1 – submersible electric motor; 2 – pumping rods;  
3 – electric pump; 4 – rod pump; 5 – column of pumping pipes; 6 – plunger; 7 – geophysical cable;  
8 – cable tip; 9 – operational column;  
10 – decentralizers; 11 – face plate with cable entzies; 12 – immersion telemetry unit;  
CS – control stat cont;  
IS – the initiation console

В то же время, вторичное вскрытие карбонатных коллекторов, как правило, не позволяет обеспечить потенциально возможные притоки флюидов, в том числе и из пластов с хорошими ФЕС, без дополнительной их обработки кислотными составами. Объясняется это тем, что в карбонатных породах перфорационные каналы имеют зону уплотнения толщиной до 1 сантиметра, в которой наблюдается оплавление мелких кристаллов кальцита и смыкание пор [Гайворонский и др., 2000]. Восстановление гидравлической связи, по нашему мнению, следует производить разрушением названной зоны посредством создания депрессии на пласт при перфорации или посредством кислотного воздействия предварительно закаченных перед выполнением ПВР в интервал продуктивного пласта специальных жидкостей. Проведенные исследования в Китае показали, что при разработке карбонатных залежей комплексное применение перфорации и кислотной обработки позволило значительно увеличить добычу нефти за счет улучшения условий дренирования вблизи скважины [Xu, 2025].



Дальнейшее совершенствование инновационной технологии реализуется посредством применения геофизического кабеля содержащего, помимо тоководущих жил, капиллярную трубку и оптоволоконный модуль, а также кабельных наконечников с обратным клапаном и взрывозащищенных глубинных приборов. В результате появляется возможность существенно повышать коэффициент гидродинамического совершенства вторичного вскрытия, оперативного управления величинами забойного давления и оценки энергетических параметров пласта, как непосредственно после перфорации, так и в процессе его эксплуатации.

Многолетняя работа в направлении борьбы с асфальтосмолистыми и парафиновыми отложениями (АСПО) компонентов нефти позволила наработать целый комплекс технологий, а также реагентов для очистки глубинно-насосного оборудования от АСПО. Это направление активно развивается и в настоящее время, а для их экономного использования на первый план выдвигается разработка наиболее эффективных способов доставки реагентов в ствол скважины [Акрамов, Яркеева, 2017]. Наличие капиллярной трубки, на наш взгляд, позволит реализовать их подачу на заданную глубину в процессе эксплуатации скважин. Также отметим, что большое внимание к разработке методов борьбы с АСПО, вызвано значительными объемами ремонтов скважин по этой причине. Так, на месторождениях Пермского региона такие ремонты проводились в 76 % случаев от общего их количества [Сюзев и др., 2018].

В то же время, несмотря на то, что в настоящее время имеется большое количество разнообразных составов поверхностно-активных веществ (ПАВ), предназначенных для интенсификации нефтедобычи, вопросу их применения для повышения качества вторичного вскрытия пластов уделяется мало внимания, а рекомендации по их использованию при вторичном вскрытии пластов отсутствуют. По нашему мнению, это вызвано трудоемкостью операций и дополнительными затратами времени на замену промывочной или технологической жидкости на ПАВ в интервале продуктивного пласта. Использование же названных жидкостей в условиях малоэффективной перфорации на репрессии или при депрессии с последующим глушением скважин перед спуском ГНО нивелирует эффективность предлагаемых инноваций.

В работах [Деркач и др., 2010; Кязимов, Сулейманов, 2013] был сформирован ряд требований, предъявляемых к поверхностно активным веществам. Основными из них являются растворение в пластовой и технической воде, снижение межфазного натяжения на границе «фильтрат раствора – нефть» до 3 мН/м, как минимум, незначительное абсорбирование на поверхности пород и предотвращение набухания глинистых пород. ПАВ также не должны оказывать отрицательного влияния на свойства технологических жидкостей, вступать в химическое взаимодействие с пластовыми флюидами и минералами коллектора с выпадением нерастворимых осадков. Технологические особенности метода перфорации на депрессии под ГНО позволяют исключить операции по дополнительному глушению скважин и дальнейшее проникновение в пласт фильтратов. Наличие же в геофизическом кабеле капиллярного канала снимает проблему доставки в интервал продуктивного пласта любых химических соединений, повышающих коэффициент гидродинамического совершенства вторичного вскрытия, в том числе и кислотных составов при вскрытии карбонатных коллекторов.

В то же время необходимо отметить, что при капитальных ремонтах скважин и, в частности, приобщении к разработке дополнительных объектов требуется глушение скважин, что, как правило, приводит к ухудшению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) прискважинной зоны пласта (ПЗП), особенно в условиях аномально низких пластовых давлений. Названного негативного фактора можно избежать посредством применения блокирующих жидкостей для временной изоляции продуктивного горизонта, которые разработаны и рекомендуются к применению [Гасумов, Гасумов, 2025].

Анализ зарубежного опыта показал, что специалистами компании Schlumberger также проводились исследования по изучению влияния специальных перфорационных жидкостей на результаты вторичного вскрытия пластов на динамической депрессии, которая создается за счет включения в состав перфорационных систем имплозивных камер [Берманн и др., 2007]. Сравнительные испытания, проведенные в контрольных скважинах, подтверждают эффективность применения специальных жидкостей. Получено отрицательное значение скин-фактора (-1,38), в то время как по соседней скважине его значение оказалось равным 0,97, т.е. проницаемость прискважинной зоны пласта не достигла значений его удаленной области, несмотря на создание динамической депрессии при вторичном вскрытии. Судя по публикациям [Patermina, 2022; Ahmed et al., 2023], зарубежные специалисты рассматривают закачку ПАВ как важный способ повышения нефтеотдачи пластов благодаря его способности снижать межфазные силы в пористой среде.

Из работ, опубликованных российскими исследователями, вызывают интерес результаты, полученные при кумулятивной перфорации на моделях крепи скважины и продуктивного пласта [Василенко и др., 2015]. Испытания проводились в несколько этапов в сосудах высокого давления (СВД) на цилиндрических бетонных образцах (мишенях) диаметром 100 и длиной 1000 мм при давлениях 15 МПа. Помимо водопроводной воды, использовались следующие составы ПАВ: вода с 2,5 % и 5 % концентрацией ПО-3НСВМ25 (ПАВ1), и две смеси ПО-6А3ФМ25 с такими же концентрациями (ПАВ2).

К сожалению, в публикации не приводятся сведения о назначении упомянутых выше химических компонентов, их состав и технические характеристики. По данным интернет-источников состав ПО-6А3Ф представляет собой фторсинтетический пленкообразующий пенообразователь, а ПО-3НСВ является синтетическим углеводородным пенообразователем общего и целевого назначения и не содержит в своем составе фторированные поверхностно-активные вещества (<https://egida-ptv.ru>).

Средние глубины каналов, зафиксированные при отстреле кумулятивных зарядов в различных составах ПАВ, на 57–85 % больше, в сравнении с длинами, полученными на образцах, находящихся в воде (190 мм). Самый длинный канал (352 мм) получен при заполнении сосуда высокого давления составом ПАВ2 (ПО-6А3ФМ25) с концентрацией 2,5 % (рис. 3). Таким образом, можно заключить, что использование специальных жидкостей для вторичного вскрытия позволяет увеличивать длину перфорационных каналов, а также степень их очистки.

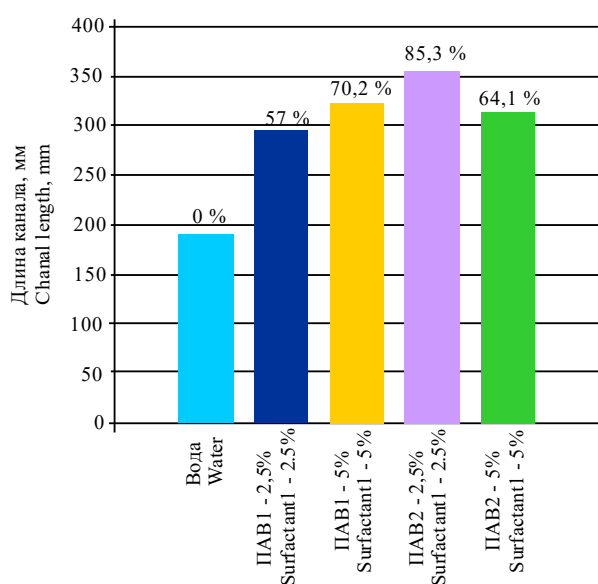


Рис. 3. Усредненные глубины пробития каналов в бетонных образцах при их нахождении в различных составах поверхностно-активного вещества /

Fig. 3. The average depth of penetration of channels in concrete samples when they are in various compositions of surfactant

### Результаты исследований и их обсуждение

Для практической реализации рассмотренной технологии необходимым условием является разработка оптимальной конструкции грузонесущего геофизического кабеля. В современном воплощении комплексная технология заканчивания скважин с возможностью закачки перфорационных жидкостей (ПАВ) в интервал продуктивного пласта может осуществляться при помощи специализированного геофизического кабеля, содержащего дополнительные конструктивные элементы – капиллярную трубку и металлический модуль с оптическими волокнами. По внешнему виду они не отличаются от модификаций с токоведущими жилами, однако учитывая условия их длительной эксплуатации в агрессивной среде, в том числе при закачке по капилляру кислотных составов, такие кабели должны подвергаться армированию, то есть покрытию (пропитке) специальными полимерными материалами. Образцы кабеля с капиллярной трубкой с наружным диаметром 4,1 мм и толщиной стенки 2,0 мм были разработаны и размещены в скважинах для выполнения опытно-промышленных исследований (рис. 4).

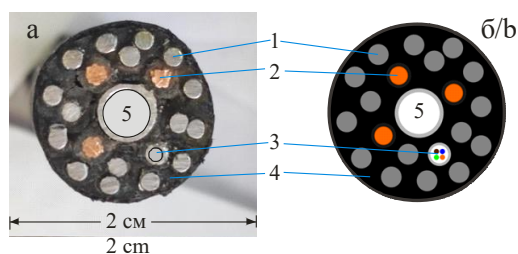


Рис. 4. Практическая реализация (а) и теоретическая конструктивная разработка (б) исполнения кабеля грузонесущего с капиллярной трубкой и оптоволоконной линией связи. Цифрами обозначены: 1 – проволоки брони; 2 – токопроводящие жилы; 3 – канал с оптическим волокном; 4 – полимерная изоляция; 5 – капиллярная трубка /

Fig. 4. Practical implementation (a) and theoretical design (b) of a load-carrying cable with a capillary tube and a fiber-optic communication line. The numbers indicate: 1 – armor wires; 2 – conductive cores; 3 – optical fiber channel; 4 – polymer insulation; 5 – capillary tube

Отметим, что планируемый объем прокачки технологических жидкостей (ПАВ, ингибиторы) в заданные интервалы ствола скважины предпочтительно обеспечивать за минимально возможное время, для расчета которого нами использовалось

приведенное ниже уравнение зависимости расхода от давления в капиллярной трубке и его радиуса [Робин и др., 2008].

$$Q = \frac{\pi r^4 P}{8 \mu l},$$

где,  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $r$  – радиус капилляра,  $\text{м}$ ;  $P$  – давление прокачки,  $\text{Па}$ ;  $\mu$  – вязкость флюида,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $l$  – длина капилляра,  $\text{м}$ .

В реальных скважинных условиях применялась перфорационная жидкость с аббревиатурой КСК-МПС, динамическая вязкость которой при температуре  $20^\circ\text{C}$  составляет  $0,0061 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , плотность –  $1,275 \text{ г}/\text{см}^3$ . Фактические затраты времени на прокачку ПАВ  $0,15 \text{ м}^3$  на глубину  $1700 \text{ м}$  при температуре воды  $30^\circ\text{C}$  в стволе скважины 210 составили порядка 14 часов. В следующей скважине №4068 при такой же скважинной и наружной температуре закачка  $0,13 \text{ м}^3$  перфорационной жидкости на глубину  $1620 \text{ м}$  длилась всего 7 часов. Расход закачиваемых реагентов, необходимых для предотвращения асфальтосмолопарафиновых отложений в процессе извлечения нефти, по результатам лабораторных экспериментов, составляет в пределах от 0,1 до 2 % от массы, добываемой из скважины нефти [Хайбуллина, 2019]. Такие объемы позволяют обеспечить профилактические мероприятия по предупреждению АСПО посредством периодической прокачки специальных химических составов через капилляр на протяжении межремонтного периода работы скважины.

Вторая металлическая трубка в составе кабеля предназначена для механической защиты размещаемых в ней многомодовых и одномодовых оптических волокон, что соответственно позволяет их использовать в качестве распределенных температурных датчиков на основе эффекта Рамана и распределенных акустических датчиков на основе эффекта Рэлея [Ashry et al., 2022]. Наличие двух разновидностей названных датчиков предполагает выполнение опытных работ по отработке методики определения забойного давления [Ekechukwu, Sharma, 2021].

Оптоволоконный распределенный датчик температуры (ОРДТ) позволяет измерять температурное поле по всей длине ствола, как до перфорации, так и на всем протяжении межремонтного периода, включая измерение местоположения динамического уровня [Zhang et al., 2017]. Учитывая, что результаты практического применения оптоволоконных технологий уже освещались во многих публикациях, в том числе по скважинам нефтяных месторождений Пермского края [Ширяев, 2023; Kostitsyn et al., 2023; Болдырева, 2016], обратим внимание только на особенности практической реализации измерений методом ОРДТ в плане повышения их достоверности. И в частности отметим, что на основании экспериментальных исследований с большим количеством разнообразных конструкций образцов оптоволоконных геофизических кабелей разработан новый критерий определения пространственного разрешения датчиков, зависящий от конструктивных особенностей кабельных изделий, в составе которых они находятся [Халилов и др., 2024]. Данный подход, совместно с полученным эмпирическим путем уравнением, нами используется для определения коэффициента тепловой инерционности конструкции при проектировании геофизических кабелей с оптимальными параметрами их тепловой инерции и пространственного разрешения.

По разработанной технологии проведены опытно-промышленные работы на 3-х скважинах месторождений Пермского края (скважины №210, 4068, 3174). В таблице 1 с целью демонстрации сравнительных показателей ФЭС, гидродинамических



параметров и технологических особенностей эксплуатации, приводится информация по данным скважинам, а также для скважин-аналогов, пробуренных в сходных геолого-технологических условиях по стандартной технологии.

Из таблицы 1 видно, что для скважин, эксплуатируемых по рассмотренной технологии, установлены высокие проницаемости ПЗП и соответственно дебиты нефти. Например, для скважины 210 по данным гидродинамических исследований установлено значительное улучшение фильтрационных свойств ПЗП, проницаемость которой превысила значение названного параметра удаленной зоны и составила 0,396 мкм<sup>2</sup>, против 0,267 мкм<sup>2</sup>. В результате показатель скин-фактора, как видно из таблицы, составил – 2,05. Начальный ее дебит по нефти составлял 25,9 тонн в сутки при обводненности 28,7 %, которая со временем значительно снизилась и в среднем составила до 4,2 %. Средний дебит нефти за период ее эксплуатации составляет 28,9 тонн в сутки. При этом анализ в соседних скважинах данного эксплуатационного объекта показывает, что дебиты для них не превышают 16 тонн в сутки.

Таблица 1 / Table 1

**Значения фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов и информация о работе скважин / Values of filtration and capacitance properties of productive formations and information about the operation of wells**

| Наименование параметров /<br>Name of the Unit parameters                    | Единицы изм. /<br>Units of measurement | №№ скважин /<br>№№ wells                                                                         |       |       |                                                                 |       |                                                          |          |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------|----------|
|                                                                             |                                        | 210                                                                                              | 4068  | 3174  | 349                                                             | 1286  | 1123                                                     | 3180     |
| Способ заканчивания /<br>Ending method                                      | -                                      | Перфорация на депрессии с закачкой ПАВ / Perforation on depression with injection of surfactants |       |       | Бурение бокового ствола (БС) / Drilling of the side barrel (SB) |       | Бурение БС + ГРП / Drilling of SB + hydrofracturing (HF) | ГРП / HF |
| Толщина пласта / Thickness of the formation                                 | м / m                                  | 6,2                                                                                              | 5,0   | 7,0   | 14,5                                                            | 11,9  | 6,0                                                      | 6,0      |
| Пористость / Porosity                                                       | %                                      | 18,8                                                                                             | 27,3  | 26,6  | 14,3                                                            | 21,2  | 21,0                                                     | 23,7     |
| Проницаемость удаленной зоны пласта / Permeability of the remote area       | мкм <sup>2</sup> / mcm <sup>2</sup>    | 0,267                                                                                            | 0,381 | 0,183 | 0,387                                                           | 0,211 | 0,235                                                    | 0,530    |
| Проницаемость прискважинной зоны пласта / Permeability of the downhole zone | мкм <sup>2</sup> / mcm <sup>2</sup>    | 0,396                                                                                            | 0,628 | 0,224 | 0,351                                                           | 0,136 | 0,519                                                    | 0,885    |
| Скин-фактор / The skin factor                                               | -                                      | -2,05                                                                                            | -3,29 | -3,31 | 0,36                                                            | 2,09  | -2,38                                                    | -3,2     |
| Время эксплуатации / Operating time                                         | сутки / day                            | 1125                                                                                             | 420   | 280   | 1320                                                            | 150   | 1010                                                     | 340      |
| Средний дебит по нефти / Average oil flow rate                              | т / t                                  | 28,9                                                                                             | 9,28  | 26,0  | 13,2                                                            | 24,5  | 9,7                                                      | 11,4     |
| Средний % воды / Average % of water                                         | %                                      | 4,2                                                                                              | 36,3  | 5,8   | 36,1                                                            | 49,5  | 20,1                                                     | 20,3     |

Об эффективности технологии свидетельствуют отрицательные значения скин-фактора, результаты периодических исследований подтверждают длительность эффекта очистки. Так в скважине 210 за три года непрерывной эксплуатации значение скин-фактора снизилось, но по-прежнему остается отрицательным (-0,95). Еще более существенное снижение наблюдается в скважине 4068, которое через год ее работы уменьшилось более чем в два раза и составило -1,28. В скважине 3174 по результатам гидродинамических исследований показатель скин-фактора составил -3.31. При повторном его определении после выполнения технологических операций по замене отказавшего глубинного насоса и продолжительной эксплуатации подтверждает сохранение фильтрационных свойств пласта даже после выполнения спуско-подъемных операций в скважинах.

Анализ результатов исследований в скважинах, в которых выполнялись сложные дорогостоящие мероприятия по бурению боковых стволов (№№349 и 1286) и гидравлические разрывы пластов (№№1123 и 3180) показывают, что значения скин-факторов, за исключением скважин с ГРП, являются положительными. Также их эффективность по дебитам нефти не превышает показателей по скважинам, освоение которых проводилось по рассмотренной технологии.

### Выводы

Итоги реализации комплексной технологии позволяют сделать вывод о высокой эффективности ее применения. Применение перфорационных жидкостей, как показали опытные работы на моделях и в скважинах, позволяет значительно повысить качество вторичного вскрытия продуктивных объектов. Показано, что в результате их использования происходит увеличение проницаемости прискважинной зоны пласта. Скин-факторы, полученные в таких скважинах, имеют отрицательные значения. Это достигается за счет закачки в интервал вторичного вскрытия по капиллярной трубке кабеля перфорационных жидкостей, приготовленных на основе поверхностно-активных веществ, которые за счет снижения поверхностного натяжения на границе «скважина-пласт» в комплексе с перфорацией на депрессии позволяют дополнительно очистить прискважинную зону пласта и повысить дебит.

Научная новизна выполненных исследований заключается в обеспечении технологической возможности проведения мониторинга параметров разработки при помощи оптоволоконных распределенных датчиков термометрии и глубинных приборов. Разработанная технология позволяет в процессе эксплуатации скважин выполнять текущие гидродинамические исследования пластов, а наличие капиллярной трубки дает возможность производить дозированную подачу ингибиторов с целью профилактики образования асфальтосмолистых и парафиновых отложений на глубинно-насосном оборудовании.

### Литература

1. Акрамов Т.Ф., Яркеева Р.М. Борьба с отложениями парафиновых, асфальтосмолистых компонентов нефти. // Нефтегазовое дело. – 2017. – № 4. – С. 67–72. DOI: 10.17122/ngdelo-2017-4-67-72.
2. Берманн Л., Уолтон И.С., Чанг Ф.Ф., Фаярд А., Чи Кин Хонг. Оптимальные жидкостные системы для перфорирования скважин. // Нефтегазовое обозрение. – 2007. – С. 16–30.
3. Болдырева Н.М. Промыслово-геофизические исследования и контроль динамики работы пласта в режиме реального времени с использованием оптоволоконного кабеля. // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 46–48.

4. Василенко Н.Р., Чертенков М.В., Шепель К.Ю., Ликутков А.Р. Стендовые испытания моделей крепи скважины и продуктивного пласта кумулятивной перфорацией. // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – № 12. – С. 21–26.
5. Гайворонский И.Н., Леоненко Г.Н., Замахаяев В.С. Коллекторы нефти и газа Западной Сибири. Их вскрытие и опробование. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 364 с.
6. Гайворонский И.Н., Меркулов А.А., Балдин А.В., Улунцев Ю.Г. Обеспечение эффективной гидродинамической связи скважины с пластом при вторичном вскрытии. // Каротажник. – 2006. – Вып. 10–11. – С. 153–169.
7. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Сохранение фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов при их временной изоляции. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 180–195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001.
8. Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 108–123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009.
9. Деркач С.Р., Берестова Г.И., Мотылева Т.А. Использование ПАВ для интенсификации нефтедобычи при первичном и вторичном вскрытии пластов. // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2010. – Т. 13. № 4-1. – С. 784–792.
10. Кязимов Э.А., Сулейманов А.Б. Разработка и исследование новой технологической жидкости для повышения эффективности вторичного вскрытия пласта. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2013. – № 9. – С. 35–38.
11. Робин А.В., Семенцов А.А., Шумилов А.В. Освоение скважин геофизическим кабелем, оснащенным внутренним капилляром. // Каротажник. – 2008. – Вып. 11(176). – С. 97–106.
12. Рябоконт С.А., Пеньков А.И., Куксов А.К., Кошелев В.Н., Бадовская В.И. Комплекс технологий, обеспечивающий высокое качество заканчивания скважин. // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 2. – С. 16–22.
13. Сюзев А.В., Лекомцев А.В., Мартюшев Д.А. Комплексная методика подбора реагентов для удаления асфальтеносмолопарафиновых отложений в механизированных нефтедобывающих скважинах. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. – 2018. – Т. 329. № 1. – С. 15–24.
14. Хайбуллина К.Ш. Обоснование комплексной технологии удаления и предупреждения органических отложений в скважинах на поздней стадии разработки нефтяного месторождения: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.17 / Хайбуллина Карина Шамильевна. – СПб.: СПбГУ, 2019. – 98 с.
15. Халилов Д.Г., Савич А.Д., Сальникова О.Л., Костицын В.И., Черных И.А., Черных В.И. Определение пространственной разрешающей способности оптоволоконных распределенных датчиков температуры, интегрированных в геофизические кабели. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2024. – № 4(388). – С. 45–54.
16. Ширяев Е.О. Опыт применения оптоволоконных систем термометрии для исследований скважин. // Каротажник. – 2023. – Вып. 6(326). – С. 76–86.
17. Шумилов А.В. Методика контроля качества цементирования по акустическому импедансу. // Геофизика. – 2019. – № 3. – С. 60–65.
18. Ahmed M.E., Sultan A., Al Hashim H. Optimization of surfactant-polymer flooding for enhanced oil recovery. // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2023. – Vol. 13. – pp. 2109–2123. DOI: 10.1007/s13202-023-01651-0.
19. Ashry I., Mao Y., Wang B., Hveding F. A review of distributed fiber-optic sensing in the oil and gas industry. // Journal of Lightwave Technology. – 2022. – Vol. 40. Issue 5. – pp. 1407–1431. DOI: 10.1109/JLT.2021.3135653.
20. Deng K.H., Zhou N.T., Lin Y.H., Wu Y.X., Chen J., Shu C., Xie P.F. Failure mechanism and influencing factors of cement sheath integrity under alternating pressure. // Petroleum Science. – 2023. – Vol. 20. Issue 4. – pp. 2413–2427. DOI: 10.1016/j.petsci.2023.03.004.
21. Ekechukwu G.K., Sharma J. Well-scale demonstration of distributed pressure sensing

using fiber-optic DAS and DTS. // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – Art. No. 12505. DOI: 10.1038/s41598-021-91916-7.

22. Kostitsyn V.I., Savich A.D., Shumilov A.V., Laptev A.P., Khalilov D.G. Innovative geophysical techniques for permanent type completion and long-term operating monitoring of oil-and-gas wells. // Eds. E. Isaeva, A. Rocha. In: *Science and Global Challenges of the 21st Century – Innovations and Technologies in Interdisciplinary Applications*. Perm Forum 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 622. Springer, Cham. – 2023. – pp. 293–301. DOI: 10.1007/978-3-031-28086-3\_24.

23. Patermina Ch.A. Applications of surfactants and nanoparticles in enhanced oil recovery processes. In book: *Sedimentary Petrology*. / Ed. Ali Ismail Al-Juboury. – 2022. – 16 p. DOI: 10.5772/intechopen.97506.

24. Xu C., Liang H., Guo S. Characteristics of porosity and permeability of ultra-high temperature perforated damage zone in sandstone targets. // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 10. – 10 p. DOI: 10.3389/feart.2022.783556.

25. Xu K. Research status of perforation parameter optimization of different well types at home and abroad. // *Scientific Journal of Technology*. – 2025. – Vol. 7. – pp. 100–104. DOI: 10.54691/q938bd76.

26. Zhang H., Fu W., Wang Ch., Zhang G., Wang Z. Real-time monitoring of oil-well dynamic liquid-level based on optical fiber sensing. // *AIP Conference. Proceedings*. – 2017. – Vol. 1839. Issue 1. DOI: 10.1063/1.4982441.

## References

1. Akramov T.F., Yarkееva R.M. Control deposits of paraffin, asphalt-resin components of oil. *Petroleum Engineering*. 2017. No. 4. pp. 67–72. DOI: 10.17122/ngdelo-2017-4-67-72. (In Russ.)

2. Bermann L., Wolton I.S., Chang F.F., Fayard A., Chi Kin Hong. Optimal fluid systems for wells perforation. *Oil and Gas Review*. 2017. pp. 16–30. (In Russ.)

3. Boldyreva N.M. Field and Geophysical Commercial and geophysical research and real-time monitoring of formation dynamics using fiber optic cable. *Oil Industry*. 2016. No. 10. pp. 46–48. (In Russ.)

4. Vasilenko N.R., Chertenkov M.V., Shepel K.Yu., Likutov A.R. Bench testing of wellbore and productive formation models with cumulative perforation. *Oil. Gas. Innovations*. 2015. No. 12. pp. 21–26. (In Russ.)

5. Gayvoronsky I.N., Leonenko G.N., Zamakhaev V.S. Oil and gas collectors in Western Siberia. Their opening and testing. Moscow. Geoinformmark. 2000. 364 p. (In Russ.)

6. Gayvoronsky I.N., Merkulov A.A., Baldin A.V., Uluntsev Yu.G. Ensuring effective hydrodynamic communication between the wellbore and the formation during secondary opening. *Karotazhnik*. 2006. Issue 10–11. pp. 153–169. (In Russ.)

7. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Preservation of filtration and capacity properties of productive formations during their temporary isolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 180–195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001. (In Russ.)

8. Gasumov E.R., Gasumov R.A. Estimation of the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system formed at the stage of opening a productive reservoir. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 108–123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009. (In Russ.)

9. Derkach S.R., Berestova G.I., Motyleva T.A. Use of surfactants to intensify oil production during primary and secondary formation opening. *Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2010. Vol. 13. No. 4–1. pp. 784–792. (In Russ.)

10. Kyazimov E.A., Suleimanov A.B. Development and research of a new technological fluid to increase the efficiency of secondary formation opening. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2013. No. 9. pp. 35–38. (In Russ.)



11. Robin A.V., Sementsov A.A., Shumilov A.V. Well development using a geophysical cable equipped with an internal capillary. *Karotazhnik*. 2008. Issue 11(176). pp. 97–106. (In Russ.)
12. Ryabokon S.A., Penkov A.I., Kuksov A.K., Koshelev V.N., Badovskaya V.I. A set of technologies ensuring high-quality well completion. *Oil Industry*. 2000. No. 2. pp. 16–22. (In Russ.)
13. Syuzev A.V., Lekomtsev A.V., Martyshev D.A. Complex method of selecting reagents to asphaltene-resin-paraffin deposits in mechanized oil producing wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. Vol. 329. No. 1. pp. 15–24. (In Russ.)
14. Khaibullina K.Sh. Justification of a comprehensive technology for removing and preventing organic deposits in wells at the late stage of oil field development. Candidate dissertation 25.00.17. Saint Petersburg. 2019. 98 p. (In Russ.)
15. Khalilov D.G., Savich A.D., Salnikova O.L., Kostitsyn V.I., Chernykh I.A., Chernykh V.I. Determination of spatial resolution of fibre-optic distributed temperature sensors integrated into geophysical cables. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2024. No. 4(388). pp. 45–54. (In Russ.)
16. Shiryayev E.O. An experience of applying fiber-optic temperature-measurement systems for well logging. *Karotazhnik*. 2023. Issue 6(326). pp. 87–92. (In Russ.)
17. Shumilov A.V. Methodology for quality control of cementing based on acoustic impedance. *Geophysics*. 2019. No. 3. pp. 60–65. (In Russ.)
18. Ahmed M.E., Sultan A., Al Hashim H. Optimization of surfactant-polymer flooding for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2023. Vol. 13. pp. 2109–2123. DOI: 10.1007/s13202-023-01651-0.
19. Ashry I., Mao Y., Wang B., Hveding F. A review of distributed fiber-optic sensing in the oil and gas industry. *Journal of Lightwave Technology*. 2022. Vol. 40. Issue 5. pp. 1407–1431. DOI: 10.1109/JLT.2021.3135653.
20. Deng K.H., Zhou N.T., Lin Y.H., Wu Y.X., Chen J., Shu C., Xie P.F. Failure mechanism and influencing factors of cement sheath integrity under alternating pressure. *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20. Issue 4. pp. 2413–2427. DOI: 10.1016/j.petsci.2023.03.004.
21. Ekechukwu G.K., Sharma J. Well-scale demonstration of distributed pressure sensing using fiber-optic DAS and DTS. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Art. No. 12505. DOI: 10.1038/s41598-021-91916-7.
22. Kostitsyn V.I., Savich A.D., Shumilov A.V., Laptev A.P., Khalilov D.G. Innovative geophysical techniques for permanent type completion and long-term operating monitoring of oil-and-gas wells. Eds. E. Isaeva, A. Rocha. In: *Science and Global Challenges of the 21st Century – Innovations and Technologies in Interdisciplinary Applications*. Perm Forum 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 622. Springer. Cham. 2023. pp 293–301. DOI: 10.1007/978-3-031-28086-3\_24.
23. Patermina Ch.A. Applications of surfactants and nanoparticles in enhanced oil recovery processes. In book: *Sedimentary Petrology*. Ed. Ali Ismail Al-Juboury. 2022. 16 p. DOI: 10.5772/intechopen.97506.
24. Xu C., Liang H., Guo S. Characteristics of porosity and permeability of ultra-high temperature perforated damage zone in sandstone targets. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. 10 p. DOI: 10.3389/feart.2022.783556.
25. Xu K. Research status of perforation parameter optimization of different well types at home and abroad. *Scientific Journal of Technology*. 2025. Vol. 7. pp. 100–104. DOI: 10.54691/q938bd76.
26. Zhang H., Fu W., Wang Ch., Zhang G., Wang Z. Real-time monitoring of oil-well dynamic liquid-level based on optical fiber sensing. *AIP Conference. Proceedings*. 2017. Vol. 1839. Issue 1. DOI: 10.1063/1.4982441.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/w5501-6423-2815-n

Оригинальная статья

## О сейсмической активизации центральной части Эгейской вулканической дуги

Э.Г. Геодакян<sup>1</sup>, Дж.К. Карапетян<sup>1</sup>, Л. Ли<sup>2</sup>, В.Б. Заалишвили<sup>3</sup>,  
Б.В. Саакян<sup>1</sup>, Г.А. Мкртчян<sup>1</sup>, Р.К. Карапетян<sup>1</sup>, М.А. Мкртчян<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. А. Назарова НАН РА,  
Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна, 5а,  
e-mail: geodakyan.e@mail.ru;

<sup>2</sup> Институт геофизики, Китайское управление по землетрясениям,  
Китай, 100081, г. Пекин;

<sup>3</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 10.09.2025, доработана: 04.12.2025, принята к публикации: 08.12.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Центральная часть Эгейской вулканической дуги имеет сложное геолого-тектоническое строение. Здесь выделяется протяжённый вулcano-тектонический линеамент Санторин-Амаргос, где расположены крупные активные подводные вулканические сооружения Санторин-Колумбо, и, к которым приурочены очаги сильнейших в Средиземноморском бассейне дуплет-землетрясений 1956 г. с магнитудами  $M=7.4$  и  $M=7.1$ . Возникновение в этой области аномального проявления сейсмической активизации отражает сложные взаимосвязанные вулcano-тектонические процессы, изучение которых является актуальной и крайне важной научной задачей. **Целью** работы является на основе комплексного анализа сейсмических данных установление возможной связи этих процессов с геодинамической активизацией субдукционной зоны взаимодействия Африканской макроплиты с Эллинской мезоплитой или с сейсмическим отображением глубинных процессов магматической деятельности подводных вулканических сооружений Санторин-Колумбо. **Методы.** Для осуществления поставленной цели использовались современные методические подходы и алгоритмы кластерного анализа сейсмических событий, решены их фокальные механизмы, изучены особенности волновых картин, а также количественные метрики частотных характеристик, длительность и полный момент тензора (МТ) очагового излучения. **Результаты** комплексного анализа позволяют прийти к выводу, что весь аномальный процесс имеет вулканическую природу возникновения и отображает глубинные процессы магматической деятельности по всей протяжённости подводного вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос. Динамика развития аномального процесса во времени указывает, что этот процесс включает одновременное возникновение кратковременного биения магматической камеры подводного дремлющего вулкана Колумбо и тремора всего протяжённого подводного вулcano-тектонического линеамента. По всей вероятности, выявленная активизация связана с дополнительной инъекцией магматического вещества флюидами из верхней мантии в магматический резервуар в область вулканического сооружения Колумбо и его диффузией по всей протяжённости подводного вулcano-тектонического линеамента. Выдвигается гипотеза, что причиной дополнительной инъекции лёгких флюидов из верхней мантии в магматический резервуар, питающий тектонический линеамент Санторин-Амаргос, являются предельные упругие напряжения в очаговой области формирующегося крупного тектонического землетрясения.

**Ключевые слова:** сейсмичность, сейсмический момент, рой землетрясений, грабен, вулкан, вулcano-тектонической линеамент, кальдера, магматическая камера.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета высшего образования и науки Республики Армения в рамках исследовательского проекта (№ АСН-01/23, 21SCG-1E021).

**Для цитирования:** Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Ли Л., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Мкртчян Г.А., Карапетян Р.К., Мкртчян М.А. О сейсмической активизации центральной части Эгейской вулканической дуги. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 42–59. DOI: 10.46698/w5501-6423-2815-n

DOI: 10.46698/w5501-6423-2815-n

Original paper

## On seismic activation of the central part of the Aegean volcanic arc

E.G. Geodakyan<sup>1</sup>, J.K. Karapetyan<sup>1</sup>, L. Li<sup>2</sup>, V.B. Zaalishvili<sup>3</sup>,  
B.V. Sahakyan<sup>1</sup>, G.A. Mkrtchyan<sup>1</sup>, R.K. Karapetyan<sup>1</sup>, M.A. Mkrtchyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA,  
5a V. Sargsyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia,  
e-mail: geodakyan.e@mail.ru;

<sup>2</sup> Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 10.09.2025, revised: 04.12.2025, accepted: 08.12.2025

**Abstract: Relevance.** The central part of the Aegean volcanic arc has a complex geological and tectonic structure. The extended Santorini-Amargos volcanic-tectonic lineament is prominent, home to the large, active, submarine volcanic edifices of Santorini-Columbo. This area was the source of the 1956 doublet earthquakes with magnitudes  $M=7.4$  and  $M=7.1$  that are the strongest in the Mediterranean Basin. The occurrence of anomalous seismic activity in this area reflects the complex interplay of volcanic-tectonic processes. The study of these processes is a pressing and extremely important scientific task. **The aim** of this work is to determine, using a comprehensive analysis of seismic data, whether this process is associated with geodynamic activation of the subduction zone of interaction between the African macroplate and the Hellenic mesoplate, or whether it represents a seismic reflection of deep magmatic activity in the Santorini-Columbo underwater volcanic structures. **Methods.** To achieve this aim, modern methodological approaches and algorithms for cluster analysis of seismic events were applied. Focal mechanisms of the events resolved, and wave pattern features were studied, as well as quantitative metrics of frequency characteristics, duration, and total moment of the tensor (MT) of focal radiation. **The results** of the comprehensive analysis lead to the conclusion that the entire anomalous process is volcanic in origin and reflects deep magmatic activity along the entire length of the Santorini-Amargosa submarine volcanic-tectonic lineament. The temporal dynamics of the anomalous process indicates that it reflects the simultaneous occurrence of a short-term pulsation of the magma chamber of the dormant Columbo submarine volcano and tremors of the entire extended submarine volcanic-tectonic lineament. Most likely, the detected activation is associated with an additional injection of magmatic material, in the form of fluids, from the upper mantle into the magma reservoir in the Columbo volcanic edifice area and its diffusion along the entire length of the submarine volcanic-tectonic lineament. A hypothesis is proposed that the additional injection of light fluids from the upper mantle into the magma reservoir feeding the Santorini-Amargosa tectonic lineament is caused by extreme elastic stresses in the focal region of a developing large tectonic earthquake.

**Keywords:** seismicity, seismic moment, earthquake swarm, graben, volcano, volcano-tectonic lineament, caldera, magma chamber.

**Acknowledgments:** The work was carried out with the financial support of the Committee of Higher Education and Science of the Republic of Armenia as part of a research project (No. ACH-01/23, 21SCG-1E021).

**For citation:** Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Li L., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Mkrtchyan G.A., Karapetyan R.K., Mkrtchyan M.A. On seismic activation of the central part of the Aegean volcanic arc. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 42–59. DOI 10.46698/w5501-6423-2815-n

## Введение

В центральной части Эгейской вулканической дуги, ограниченной географическими координатами  $\varphi=35,5^{\circ}\div 37,5^{\circ}$  N,  $\lambda=24,5^{\circ}\div 26,5^{\circ}$  E, по данным EMSC от 25 января 2025 г. отмечено начало процесса сейсмической активизации в виде возникновения большого числа умеренных и слабых по силе землетрясений, продолжавшихся до 06.03.2025 г. По данным близко расположенных сетей сейсмических наблюдений Греции (National Observatory of Athens, Geodynamic Institute (NOA)) и сейсмологической обсерватории Турции (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI)), контролирующих сейсмичность региона, зарегистрировано более 3100 сейсмических событий в магнитудном диапазоне  $M=2\div 5,3$ . Наиболее сильные 14 землетрясений магнитудой  $M\geq 5$ , зарегистрированы также китайско-армянской автоматизированной системой сейсмических наблюдений на территории Армении [Karapetyan et al., 2022].

В этом районе расположены крупные подводные вулканические сооружения Санторин-Амаргос и фрагмент Восточно-Средиземноморского трансрегионального, протяженного, глубоководного Эллинского желоба, представляющий собой зону субдукции Африканской, Аравийской и Европейской литосферных макроплит. Непосредственно к области активного подводного вулканического сооружения Санторин приурочены очаги сильнейших в Эгейском море дуплет-землетрясений 1956 г. с магнитудами  $M=7.4$  и  $M=7.1$  [Ambraseys, Adams, 1998].

Изучение возникшего аномального процесса является актуальной и крайне важной научной задачей, позволяющей выявить природу его возникновения. Целью работы было на основе анализа сейсмических данных установление связи этого процесса с геодинамической активизацией субдукционной зоны взаимодействия Африканской макроплиты с Эгейской мезоплитой или с сейсмическим отображением глубинных процессов магматической деятельности подводных вулканических сооружений Санторин-Колумбо.

## Методы исследования

При выполнении комплексного анализа в работе были использованы современные методические подходы и алгоритмы кластерного анализа сейсмических событий, решение их фокальных механизмов, изучены особенности волновых картин, а также количественные метрики частотных характеристик, длительность и полный момент тензора (МТ) очагового излучения.

В качестве исходных данных были привлечены приведённые в информационных бюллетенях сейсмологических агентств EMSC, NOA, KOERI высокоточные определения параметров гипоцентров сейсмических событий с магнитудами  $M\geq 2.0$  (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>; <https://www.emsc.eu/>; <https://bbnet.gein.noa.gr/HL/>). Для анализа пространственного распределения эпицентров сейсмических событий была применена программа MapInfo в пакете GIS, с помощью которой была построена карта эпицентров сейсмических событий за вышеуказанный период.

Зарегистрированные в цифровом формате 14 землетрясений с магнитудами  $M\geq 5.0$  на 5 стационарных автономных сейсмических станциях автоматизированной системы сейсмических наблюдений Армении являются исходным фактическим материалом для анализа волновых форм и спектров мощности землетрясений с целью отнесения приуроченности событий к одному из источников.



## Обзор региональной геотектоники, вулканизм и сейсмичность исследуемой территории

Крупный регион, охватывающий южную Европейскую часть Евразийской платформы и Средиземноморье, имеет сложное плитотектоническое строение, которое характеризуется взаимодействием крупных (Африканской, Аравийской и Евразийской) литосферных макроплит. На современном этапе эволюция этих литосферных макроплит сводится к движению Африканской и Аравийской макроплит на север к Евразийской плите (рис. 1), смещающему Анатолийскую мезоплиту на запад и способствующему опусканию Эгейской плиты по направлению на юго-запад (рис. 1) [Хаин, 1984; Апродов, 2000; Reilinger et al., 2006, 2010; Свалова, 2025].

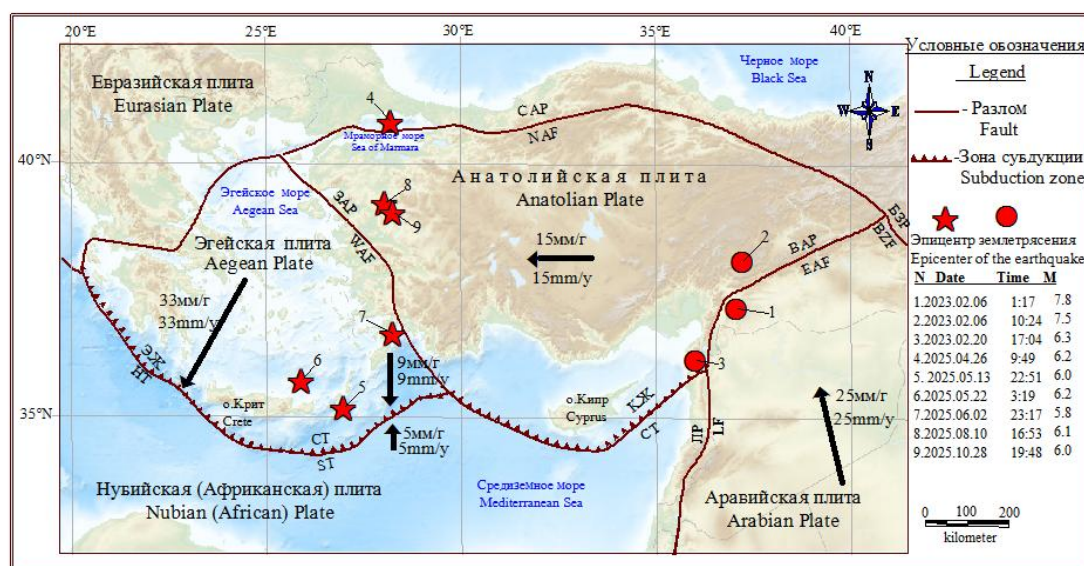


Рис. 1. Структура крупных литосферных плит юга Европы и Средиземноморья и кинематика их взаимодействия [Хаин, 1984]:

ВАР – Восточно-Анатолийский разлом, САР – Северо-Анатолийский разлом, ЗАР – Западно-Анатолийский разлом, ЛР – Левантский разлом, БЗР – Битлис-Загросский разлом, ЭЖ – Эллинский желоб, СТ – Страбон желоб, КЖ – Кипрский желоб /

Fig. 1. The structure of the system of large lithospheric plates of South Europe and the Mediterranean and the kinematics of their interaction [Khain, 1984]:

EAF – East Anatolian Fault, NAF – North Anatolian Fault, WAF – West Anatolian Fault, LF – Levant Fault, BZF – Bitlis-Zagros Fault, EH – Hellenic Trench, PST – Strabo Trench, CT – Cyprus Trench

Возникновение сильнейших за последнее 100-летие катастрофических Восточно-Турецких землетрясений от 06.02.2023 г. и 20.02.2023 г. с магнитудами  $M=7.8$ ,  $M=7.5$ ,  $M=6.3$  соответственно [Геодакян и др., 2023, 2024; Karapetyan et al., 2024] обусловило изменение кинематики и перераспределение тектонических напряжений взаимодействия в этой сложной системе.

До 2025 г. сильнейшие землетрясения  $M \geq 6.0$  в этой системе не наблюдались. В 2025 г. произошли 6 землетрясений  $M \geq 6.0$ , расположение эпицентров которых в виде звёздочек (рис. 1), указывает на то обстоятельство, что в настоящее время наиболее активные процессы тектонического взаимодействия происходят в контактной зоне Анатолийской и Эгейской плит и Восточной части Эллинской дуги в зоне субдукции Африканской и Эгейской плит [Bohnhoff et al., 2006; Karagianni, Papazachos, 2007]. Следует отметить, что в непосредственной близости от этой зоны субдукции

происходил изучаемый нами аномальный процесс активизации слабой сейсмичности.

К северу от Восточно-Греческого сегмента Эллинской дуги, под воздействием тектоники плит, в южной части Эгейского моря, где происходит субдукция Африканской плиты под Эгейскую плиту, образовалась т.н. Южно-Эгейская вулканическая дуга (ЭВД) в виде цепочек более 10, арочно расположенных спящих и исторически активных крупных вулканов. Указанная дуга длиной 450 км включает вулканы, которые простираются от полуострова Метана на материковой Греции через острова Милос, Санторин, Кос, Яли и Нисирос до полуострова Бодрум в Турции [Casten Snopce, 2006; Brustle, 2012]. ЭВД, в центральной части которой происходит изучаемый нами процесс активизации умеренных и слабых землетрясений, имеет сложное геолого-тектоническое строение (рис. 2).

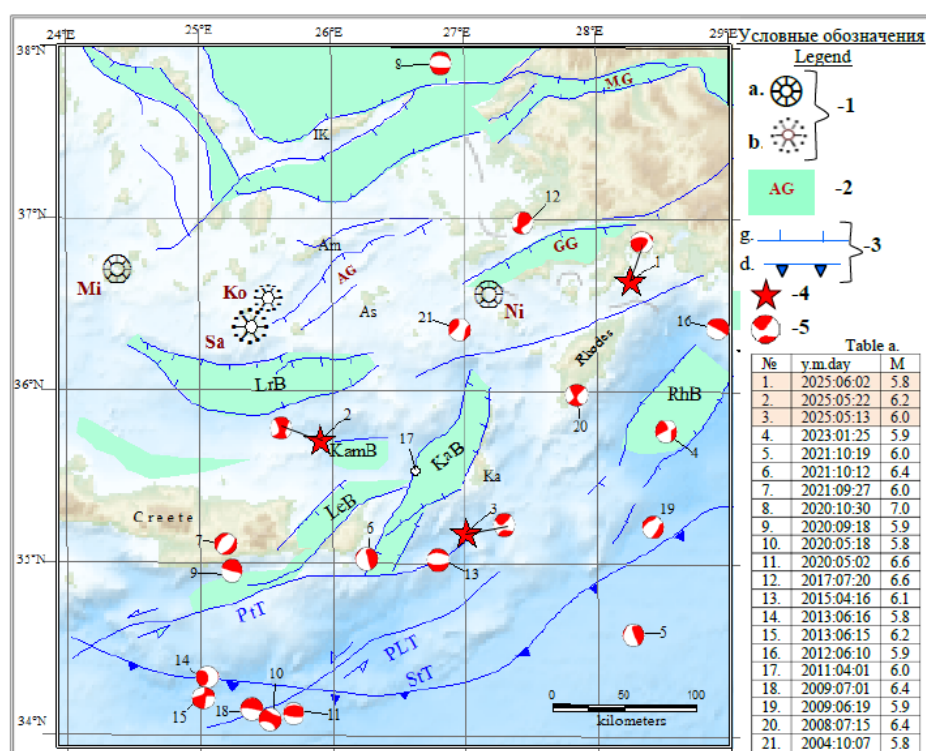


Рис. 2. Геотектоническое строение района центральной части Эгейской вулканической дуги [Chamot-Rooke et al., 2005]: 1 – вулканические центры: а – надводные вулканы, Милос (Mi), Нисирос (Ni); б – подводные вулканы, Санторин (Sa), Коломбо (Ko); 2 – основные грабены (G) и бассейны (B): Мендересский грабен (MG), Гёкова грабен (GG), Аморгосский грабен (AG), Ираклионский бассейн (IrB), Камилонисский бассейн (KamB), Иерапетрский бассейн (IeB), Карпатосский бассейн (KaB), Родосский бассейн (RhB); острова: Икарія (Ik), Наксос (Na), Аморгос (Am), Асиптапея (Ac), Карпатос (Ka); 3 – разломы и желоба: g – сдвиговые, d – надвиговые. Птолемаея желоб (PtT), Плиния (PlT), Страбона (StT); 4 – сильные землетрясения 2025 г.; 5 – стереограмма фокального механизма очага (данные в таблице а (усл. обозначения)) / Fig. 2. Geotectonic structure of the area of the central part Aegean volcanic arc [Chamot-Rooke et al., 2005]: 1 – Volcanic centers: a – above-water volcano, Milos (Mi), Nisyros (Ni); b – underwater volcano, Santorini (Sa), Kolombo (Ko); 2 – Major graben (G) and basins (B): Menderes graben (MG), Gokova graben (GG), Amorgos graben (AG), Iraklion basin (IrB), Kamilonisi basin (KamB), Ierapetra basin (IeB), Karpathos basin (KaB), Rhodes basin (RhB); Islands: Ikaria (Ik), Naxos (Na), Amorgos (Am), Asytpalea (As), Karpathos (Ka); 3 – Faults and trenches: g – strike-slips fault, d – thrusts fault. Ptolemy trench (PtT), Pliny (PlT), Strabo trenches (StT); 4 – Strong earthquakes in 2025; 5 – stereogram focal mechanism of the foci of earthquake (data in Table a (legend))

Подводный вулканический комплекс Санторин-Колумбо является наиболее крупной активной вулканической системой в Европе. Самое известное извержение вулкана Санторин датируется 1600 годом до н.э. (Минойское извержение) и считается одним из самых мощных извержений на нашей планете.

Результаты детального исследования кальдеры Санторин указывают, что на северном борту кальдеры выделяются более 91 сегмента даек и 15 разрывных нарушений способствующих или препятствующих распространению магмы [Drymoní et al., 2022]. Магматической резервуар вулкана Санторин расположен в земной коре на глубине от нескольких километров до десятков километров верхней мантии.

Активный вулкан Колумбо является крупнейшим из цепочки 19 вулканических конусов, протянувшихся от острова Санторин на северо-восток. Современный кратер Колумбо имеет приблизительно овальную форму диаметром 1,7 км. Диаметр вулкана составляет около 3,6 км, с глубиной залегания около 500 м. Сильнейшее извержение этого вулкана датируется 1650 г. н.э., которое по своей характеристике считается очень крупным и катастрофическим, с индексом VEI=5–6. Объем магматической камеры составляет 1,4 км<sup>3</sup>, и находится в земной коре на глубине от 5 до 7 км [Nomikou et al., 2012; Klaver et al., 2016].

Вулкан Колумбо пространственно связан с вулканической системой Санторин. Однако недавние исследования геохимических характеристик коревых магматических систем этих вулканов указывают на различную историю дифференциации земной коры и их невзаимосвязанность [Klaver et al., 2016].

Для оценки текущей сейсмичности и сейсмического режима, на основе архивных сейсмостатистических инструментальных данных EMSC, нами был проведён анализ данных сейсмического мониторинга исследуемой территории за период 2005–2025 гг. Фоновая сейсмичность характеризуется умеренной интенсивностью проявлений слабых землетрясений. Среднее годовое количество землетрясений в магнитудном интервале от 2 до 3.5 варьируется в пределах 1000–1300. При этом по своей форме проявления, рассматриваемый нами кратковременный процесс интенсивной активизации слабой сейсмичности, за указанный период не наблюдался. Результаты нашего мониторинга указывают на повышенную интенсивность событий. За двадцать лет здесь произошли 19 сильных землетрясений с магнитудами  $M \geq 5.8$ , эпицентры и фокальные механизмы которых приведены на рисунке 2.

Анализ фокальных механизмов показывает, что в восточной части исследуемой территории, в очагах этих землетрясений преобладают, в основном, сбросо-сдвиговые подвижки. Это связано с тем обстоятельством, что, начиная от юго-запада Турции до зоны субдукции зон Беньюфа-Вадати-Заварицкого (БВЗ), действует поле растяжения тектонических напряжений, вероятно обусловленное миграцией Эгейской плиты на юг из-за отката Африканской литосферной плиты. В 5 очагах, расположенных южнее острова Крит, на кромке Африканской литосферной плиты, наблюдаются сеймотектонические подвижки взбросо-сдвигового типа.

Особого внимания заслуживают землетрясения, отмеченные звёздочками на рисунке 2, и произошедшие после окончания изучаемого нами процесса активизации в центральной части ЭВД, 13.05.2025 г., 22.05.2025 г., 02.06.2025 г. с магнитудами  $M=6.0$ ,  $M=6.2$ ,  $M=5.8$  соответственно.

В ходе многолетних детальных инструментальных наблюдений в сейсмоактивных зонах сильных землетрясений были выявлены различные формы аномальных вариаций сейсмической активизации во времени, которые зависят от магнитуды го-

товящихся землетрясений. Наблюдались они на расстояниях от сотен до тысяч километров. Многочисленные теоретические исследования моделей подготовки тектонических и вулканических землетрясений, а также экспериментальные наблюдения аномальных проявлений сейсмичности различных сейсмоактивных регионов, показывают, что на процесс подготовки сильных землетрясений существенно влияют такие факторы, как изменение поля напряжений, упруго-пластические деформации, геометрия разломов и их насыщенность флюидом, реология и вязкость геологической среды в очаговой зоне. Это позволило разработать ряд методических подходов и алгоритмов, позволяющих выявлять аномальные проявления слабой сейсмичности, предвещающие возникновение сильных землетрясений [Hill et al., 1993; Родкин, Андреева, 2025б]. Исходя из вышеизложенного, нами был принят процесс подготовки этих 3 сильных землетрясений в качестве вероятного источника возникновения этой аномальной активизации.

## Обсуждение результатов

### Комплексный анализ инструментальных данных

Согласно оперативным данным EMSC в центральной части ЭВД, ограниченной географическими координатами  $\varphi=35.5^{\circ}\div 37.5^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=24.5^{\circ}\div 26.5^{\circ}\text{E}$ , с 25.01.2025 по 06.03.2025 гг. зафиксировано более 3095 сейсмических событий в магнитудном диапазоне  $M=2\div 5.3$ . В этом общем объёме количество умеренных землетрясений с магнитудами  $M\geq 4$  составляет более 250.

Для детального анализа сейсмических событий весь массив исходных сейсмических данных нами был сгруппирован по магнитуде с шагом по фрактальности энергии  $\Delta m=0.5$  и их распределение по глубине залегания очагов с интервалом  $\Delta h=5$  км (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

### Распределение количества сейсмических событий по магнитуде и глубине / Distribution of the number seismic events according to magnitude and to depth

| Глубина (км) /<br>Depth (km) | количество сейсмических событий (N)<br>по магнитуде (M) /<br>number of seismic events (N)<br>by magnitude (M) |     |      |     |     |     |    | общее<br>количество/<br>total number<br>$\sum N(M)$ |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|----|-----------------------------------------------------|
|                              | 2                                                                                                             | 2.5 | 3    | 3.5 | 4   | 4.5 | 5+ |                                                     |
| 5                            | 99                                                                                                            | 221 | 173  | 60  | 19  | 5   | 3  | 580                                                 |
| 10                           | 99                                                                                                            | 373 | 389  | 180 | 60  | 37  | 24 | 1162                                                |
| 15                           | 26                                                                                                            | 238 | 440  | 278 | 121 | 59  | 1  | 1163                                                |
| 20                           | 4                                                                                                             | 27  | 62   | 31  | 14  | 8   | 2  | 148                                                 |
| 25                           | 3                                                                                                             | 5   | 4    | 3   | 0   | 2   | 1  | 65                                                  |
| 30                           | 2                                                                                                             | 3   | -    | 2   | -   | -   | -  | 7                                                   |
| 35                           | 1                                                                                                             | 3   | 2    | 1   | -   | -   | -  | 7                                                   |
| 40+                          | -                                                                                                             | 1   | 4    | 5   | 3   | -   | -  | 13                                                  |
| $\sum N$                     | 234                                                                                                           | 871 | 1074 | 560 | 217 | 110 | 30 | 3096                                                |



Для анализа пространственного распределения эпицентров сейсмических событий была применена программа MapInfo в пакете GIS, с помощью которой построена карта эпицентров сейсмических событий за вышеуказанный период (рис. 3).

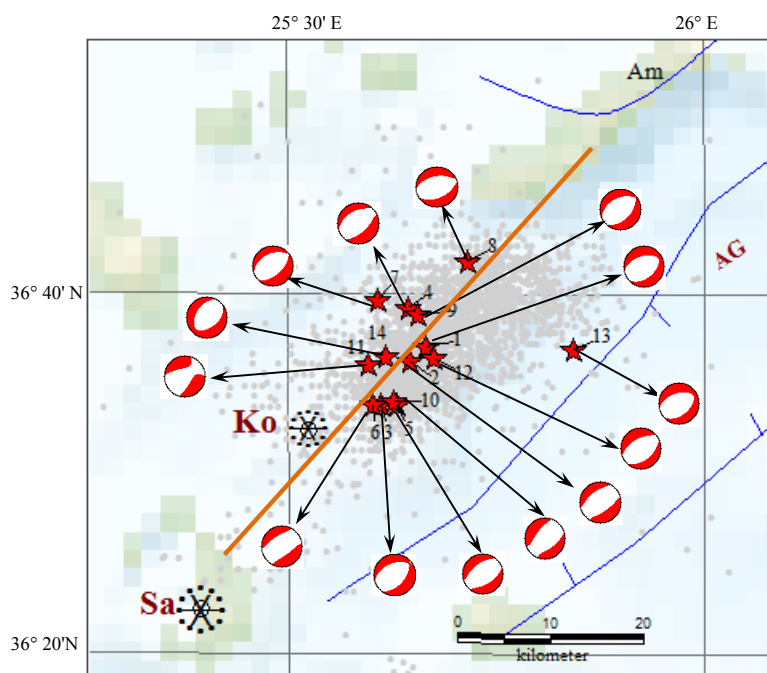


Рис. 3. Карта эпицентров сейсмических событий в области процесса аномальной активизации слабой сейсмичности и механизма очагов 14 землетрясений (см. таблицу 2).

*A-A' – протяжённость эпицентрального поля /*

Fig. 3. Map of epicenters of seismic events in the area of the process of anomalous activation of weak seismicity and the focal mechanism of the 14 earthquakes (see table 2),

*A-A' – extent of epicentral field*

В связи с большой насыщенностью эпицентрами сейсмических событий, эпицентрального поле на рисунке 3 представлено в виде области, оконтуренной краевыми эпицентрами, образующими периметр. На этом поле отдельно указаны эпицентры 14 сильных землетрясений с магнитудами  $M \geq 5.0$ , подробные инструментальные данные которых приведены в таблице 2.

Эпицентрального поле по латерали имеет вид протяжённой овалообразной полосы длиной  $L=56$  км, шириной  $W=26$  км и общей площадью  $S \sim 1300$  км<sup>2</sup>. Юго-западная часть эпицентральной области расположена на северной окраине кальдеры Санторин и направлена на северо-восток параллельно грабену Амаргос в сторону кальдеры вулкана Колумбо, охватывая по ширине цепочку 24 мелких подводных конусов вулканического комплекса Санторин-Колумбо, представляющего собой один из самых активных вулкано-тектонических линеаментов ЭВД. На этом линеаменте расположено более 90 сегментов насыщенных магматических даек и более 15 мелких разнонаправленных разрывных нарушений в области вулкана Колумбо. Распределение эпицентров землетрясений  $M \geq 5$  в виде роя, указывает на то, что преобладающее большинство их сосредоточено в северо-восточной части подножия вулканического сооружения Колумбо, на расстоянии от 7 до 18 км, образуя в центральной части эпицентральной области веерообразный кластер наиболее сильных землетрясений.

Таблица 2/ Table 2

**Основные параметры и тензорные составляющие очагов 14 сильных  
землетрясений с магнитудами  $M > 5.0$  /  
Main parameters and tensor components of the foci of 14 strong earthquakes  
with magnitude  $M > 5.0$**

| День.<br>Месяц/<br>Day,<br>month | ч.м.с. /<br>h.m.s | Координаты /<br>Coordinate |              | Глубина/<br>Depth | Магнитуда /<br>Magnitude | Скалярный<br>сейсмич.<br>момент<br>$M_0 \cdot 10^{16}$ /<br>scalar seismic<br>moment<br>$M_0 \cdot 10^{16}$ | Тензорные составляющие $M_{RTP} \cdot 10^{16}$<br>сейсмического момента /<br>Tensor components $M_{RTP} \cdot 10^{16}$ of the<br>seismic moment |      |       |            |            |            |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------------|------------|------------|
|                                  |                   | $\varphi^0N$               | $\lambda^0E$ |                   |                          |                                                                                                             | RR                                                                                                                                              | TT   | PP    | RT /<br>TR | RP /<br>PR | TP /<br>PT |
| 03.02                            | 9:29:43           | 36.62                      | 25.67        | 5                 | 5                        | 2.04                                                                                                        | -1.78                                                                                                                                           | 1.49 | 0.29  | 0.17       | -0.78      | 0.88       |
| 04.02                            | 2:46:06           | 36.6                       | 25.65        | 7                 | 5.1                      | 1.33                                                                                                        | -1.22                                                                                                                                           | 0.74 | 0.48  | -0.14      | -0.28      | 0.73       |
| 04.02                            | 13:04:14          | 36.56                      | 25.61        | 9                 | 5.3                      | 3.92                                                                                                        | -3.14                                                                                                                                           | 2.14 | 1.00  | -0.14      | -0.41      | 2.73       |
| 05.02                            | 19:09:38          | 36.65                      | 25.64        | 10                | 5.1                      | 3.62                                                                                                        | -3.41                                                                                                                                           | 2.18 | 1.23  | -0.12      | -0.57      | 1.95       |
| 07.02                            | 7:16:15           | 36.56                      | 25.63        | 7                 | 5.1                      | 1.15                                                                                                        | -0.80                                                                                                                                           | 0.44 | 0.36  | 0.14       | -0.38      | 0.83       |
| 08.02                            | 9:00:41           | 36.56                      | 25.60        | 8                 | 5.1                      | 1.36                                                                                                        | -1.11                                                                                                                                           | 0.88 | 0.38  | 0.04       | -0.53      | 0.73       |
| 09.02                            | 19:05:39          | 36.66                      | 25.61        | 15                | 5.2                      | 5.60                                                                                                        | -3.39                                                                                                                                           | 3.50 | -0.11 | 0.01       | -2.17      | 3.85       |
| 10.02                            | 20:16:29          | 36.7                       | 25.72        | 8                 | 5.2                      | 7.08                                                                                                        | -3.35                                                                                                                                           | 6.13 | -2.79 | -0.68      | 1.39       | 4.41       |
| 10.02                            | 22:37:25          | 36.65                      | 25.66        | 8                 | 5.1                      | 2.53                                                                                                        | -2.40                                                                                                                                           | 1.60 | 0.80  | 0.02       | -0.08      | 1.40       |
| 12.02                            | 1:14:55           | 36.57                      | 25.63        | 10                | 5.1                      | 2.91                                                                                                        | -2.44                                                                                                                                           | 1.98 | 0.47  | 0.84       | -1.23      | 1.08       |
| 12.02                            | 8:29:51           | 36.6                       | 25.60        | 10                | 5                        | 1.50                                                                                                        | 0.25                                                                                                                                            | 1.27 | -1.52 | 0.10       | 0.47       | 0.16       |
| 17.02                            | 7:49:50           | 36.61                      | 25.68        | 6                 | 5                        | 1.68                                                                                                        | -1.31                                                                                                                                           | 0.81 | 0.49  | 0.04       | -0.47      | 1.14       |
| 18.02                            | 4:46:52           | 36.62                      | 25.84        | 8                 | 5.1                      | 2.30                                                                                                        | -2.21                                                                                                                                           | 1.46 | 0.74  | 0.38       | -0.51      | 1.05       |
| 18.02                            | 6:08:09           | 36.61                      | 25.62        | 8                 | 5.1                      | 1.07                                                                                                        | -0.98                                                                                                                                           | 0.39 | 0.59  | 0.24       | -0.28      | 0.54       |

Для определения общего объёма геологической среды, охваченной процессом активизации, используя данные, приведённые в таблице 1, нами было рассмотрено распределение гипоцентров сейсмических событий по глубине залегания в земной коре и верхней мантии. С этой целью гипоцентры сейсмических событий были спроектированы на вертикальную плоскость, проходящую по длине протяжённой оси эпицентрального поля по разрезу AA' (рис. 4).

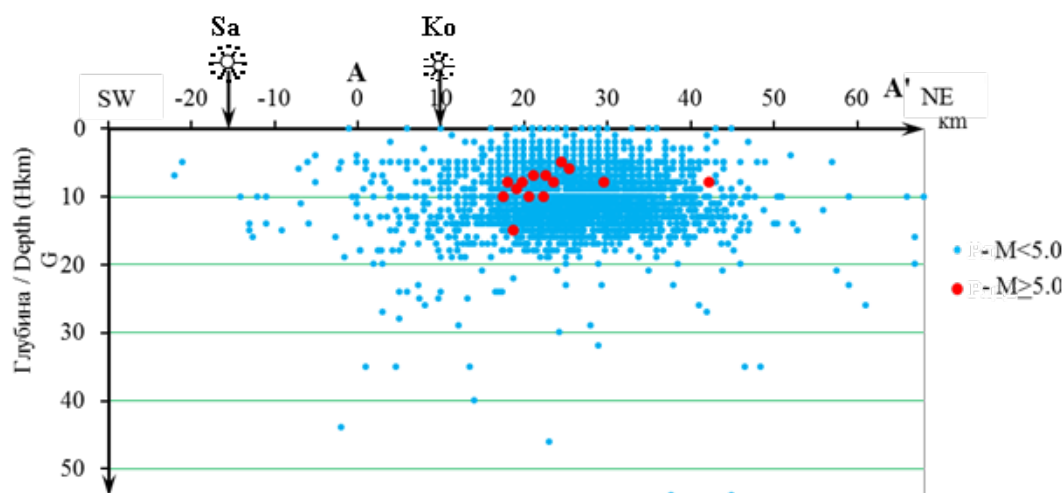


Рис. 4. Проекция гипоцентров сейсмических событий по разрезу AA' (см. рис. 3) /  
Fig. 4. Projection of hypocenters of seismic events along the AA' section (see fig. 3)

Анализ распределения гипоцентров сейсмических событий по глубине их залегания указывает на то, что основной массив гипоцентров сосредоточен в земной коре в диапазоне глубин от 3 до 15 км. Наряду с этим, по всей длине разреза наблюдается редкое количество гипоцентров сейсмических событий, которые углубляются в верхнюю мантию до 35 км. Характерной особенностью этого распределения является то обстоятельство, что очаги наиболее сильных землетрясений магнитудной группы  $4.8 \leq M \leq 5.3$ , располагаются в земной коре на глубинах от 4 до 10 км. На основе параметров трёхмерного пространственного распределения эпицентров, оценен общий объем сейсмогенеза области аномального процесса активизации, который в первом приближении составляет  $V \approx 2,0 \cdot 10^4 \text{ км}^3$ . В этом объеме по вертикали отражаются изменения реологических свойств и анизотропное состояние вулканогенной, насыщенной флюидами геологической среды, приводящие по мере углубления в земную кору к хрупкому и квазихрупкому разрушению. Следует отметить, что квазихрупкое разрушение в этой геологической среде сконцентрировано, в толще земной коры на глубине от 4 до 10 км.

Это распределение указывает, что аномальный процесс сейсмической активизации происходил в первом мелководном кластере сейсмичности в сейсмогенной зоне БВЗ, в пределах Эгейской плиты, в области магматического резервуара, питающего вулканический комплекс Санторин-Колумбо.

Для определения типов сейсмических подвижек в очагах наиболее сильных сейсмических событий, нами рассмотрены решения фокальных механизмов более 48 землетрясений в магнитудном диапазоне  $4.5 \leq M \leq 5.3$ , приведенные на сайтах Гарвардского университета (США) и NOA (Греция), эпицентры которых, как по латерали, так и по глубине залегания, расположены по всей протяженности эпицентрального поля. Анализ азимутальной направленности нодальных плоскостей в очагах этих землетрясений показывает, что они ориентированы с севера-востока  $\Phi_s = 30^\circ \div 60^\circ$  на юго-запад  $\Phi_s = 225^\circ \div 255^\circ$  (STRK), с углами падения в диапазоне  $30^\circ \div 60^\circ$  (DIP). Сейсмические подвижки в очагах этих землетрясений варьируются в интервале  $\lambda = -75^\circ \div -105^\circ$  (SLIP). Наблюдаются редкие случаи, когда значения сейсмотектонических подвижек  $\lambda = -35^\circ \div -45^\circ$  (SLIP) связаны с внедрением в очагах этих землетрясений сдвиговой составляющей. Анализ решения фокальных механизмов указывает, что в очагах этих землетрясений имеют место чисто сбросовые и сбросо-сдвиговые подвижки.

С целью определения вулканической природы и их типов в аномальном процессе роевых землетрясений, нами рассмотрено наличие в нем общепринятых характерных признаков вулканических землетрясений, каковыми являются расположение эпицентров вблизи окрестностей вулканического сооружения, глубина залегания их очагов, решение их фокальных механизмов, особенности волновых картин сейсмограмм, а также количественные метрики частотных характеристик, длительность и полный момент тензора (МТ) очагового излучения.

Как известно, по особенностям их проявления вулканические землетрясения, согласно международной классификации, подразделяются на четыре основных типа: высокочастотные, так называемые вулкано-тектонические (тип А), низкочастотные (тип В), эксплозивные (взрывные) и вулканическое дрожание [Minakami, 1960]. Каждый из этих типов землетрясений имеет свои характерные особенности волновых проявлений на сейсмограммах, которые детально рассмотрены в работе Гордеева Е.И. [Гордеев, 2007].

Для этой цели, нами отдельно изучены фокальные механизмы 14 роевых землетрясений с магнитудой  $M \geq 5.0$ . На рисунке 3 приведены стереограммы этих землетрясений, а количественные значения тензорных компонентов их сейсмических моментов, указаны в таблице 2. Решение фокальных механизмов показывает, что в очагах 12 землетрясений действует дипольная сила с преобладанием отрицательных значений тензорных компонентов полного сейсмического момента, приводящая к чисто сбросовым подвижкам.

Для определения типа этих вулканических землетрясений нами рассмотрены волновые картины их сейсмограмм, зарегистрированных в цифровом формате, на сейсмогеодинамических станциях современной автоматизированной системы наблюдений Армении.

Анализ сейсмограмм показывает, что волновые формы и длительность записи 10 землетрясений практически идентичны. На рисунке 5(а) приведена сейсмограмма землетрясения от 04.02.2025 г., показывающая характерную для всех землетрясений волновую картину последовательного вступления различных сейсмических волн и их затухание. На всех сейсмограммах отчетливо выделяются вступления фаз Р и S-волн.

В группе поверхностных волн выделяются несколько плавно затухающих цуг волн с продолжающимся длинным хвостом, по всей вероятности отражающим неоднородности в области вулканических сооружений. Характерные особенности волновых картин сейсмограмм, указывают на их принадлежность к группе А, т.е. к вулкано-тектоническим землетрясениям. Гипотетический центр роевых землетрясений, по всей вероятности, приурочен к области магматической камеры вулкана Колумбо. Иная волновая картина наблюдается на сейсмограммах двух землетрясений, приведенных в таблице 2, под номерами 7 и 8, одна из которых представлена на рисунке 5(б).

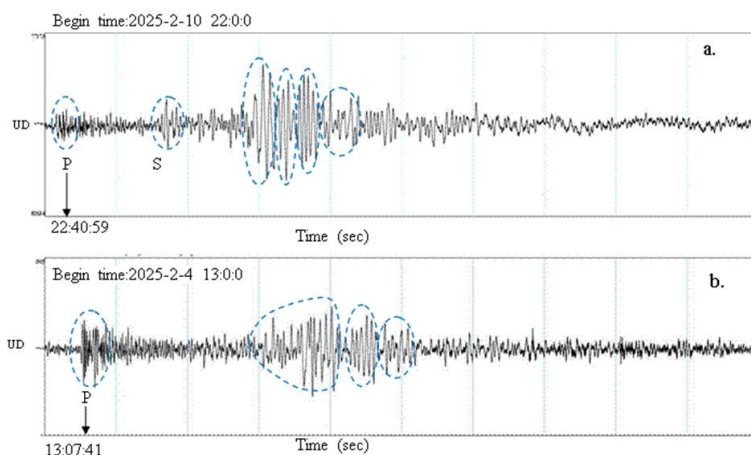


Рис. 5. Сейсмограммы землетрясений 4 (а) и 10 (б) февраля 2025 г., записанные на станции "BRKH" /

Fig. 5. Seismograms of the earthquakes of February 4 (a) and 10 (b) 2025, recorded at the "BRKH" station

На сейсмограмме вступление продольной волны Р характеризуется резким начальным импульсом, вступление поперечной волны S не отчетливое, размазанное. Волновой состав поверхностных волн представлен несколькими цугами с плавным



убыванием, а их продолжительность превышает длительность поверхностных волн вышеуказанных вулcano-тектонических землетрясений более чем на одну минуту. Анализ частотного состава поверхностных волн указывает на наличие узкой полосы низкочастотных колебаний в диапазоне  $0.15 \div 0.2$  Гц. Выделение характерных особенностей волновых картин этих двух землетрясений указывает на их принадлежность к вулканическим землетрясениям типа В. Глубина залегания очагов этих землетрясений ( $h \approx 5 \div 7$  км) непосредственно соответствует положению в магматической камере вулкана Колумбо, объемом  $1.4 \text{ км}^3$ . Кратное превышение значений девятерных компонентов полного сейсмического момента по отношению к их главным шаровым компонентам для этих двух землетрясений указывает на то, что в магматической камере, возможно, происходил процесс инфляции в виде магматического расплава, выбросов газа или обрушения кровли.

Особый интерес представляют результаты исследования большого количества более слабых землетрясений, возникших в период этой активизации по всей протяженности вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос. Большая удаленность наших сейсмических станций, от указанных сейсмических событий ( $\Delta \approx 1700$  км), не позволила провести изучение частотных характеристик и процесс формирования полного момента тензора (МТ) очаговых излучений этих землетрясений. Детальное исследование было реализовано в NOA на основе изучения сейсмограмм более близких сейсмических станций ( $\Delta \approx 40\text{--}300$  км) [Fountoulakis, Evangelidis, 2025]. Изучение частотных составляющих (FI) и формирования полного момента тензоров (МТ) очаговых излучений сейсмических событий от подножия вулкана Колумбо по направлению на северо-восток к грабену Амаргос показало, что преобладают высокочастотные вулcano-тектонические землетрясения типа А, с постепенным переходом от чисто сбросовых к сбросо-сдвиговым подвижкам. Иной характер имеют количественные метрики частоты и формирования полного момента тензоров очаговых излучений сейсмических событий, расположенных к юго-западу от вулкана Колумбо, вдоль 19 мелких вулканических построек, в направлении кальдеры вулканического сооружения Санторин [Bozkurt, Bozkurt, 2009]. Здесь, в очагах слабых землетрясений, наблюдаются низкочастотные значения FI, а при формировании МТ предполагается участие магматических флюидных процессов.

Обобщая результаты анализа пространственно-временнo-энергетического распределения эпицентров землетрясений, решения фокальных механизмов их очагов, волновых картин сейсмограмм роя землетрясений ( $M \geq 5.0$ ) и спектральные особенности очаговых излучений большого количества слабых землетрясений, приходим к выводу, что весь аномальный процесс имеет вулканическую природу возникновения и отображает глубинные процессы магматической деятельности по всей протяженности подводного вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос.

Для адекватной интерпретации аномального проявления кратковременной активизации сейсмичности нами рассмотрена динамика ее развития во времени.

Для изучения динамики развития всего аномального процесса во времени с 25.01.25 г. по 06.03.25 г., нами рассмотрен ход ежесуточной частоты сейсмических событий в общем магнитудном диапазоне  $M=2 \div 5$  с разложением их по каждой магнитудной группе с шагом  $\Delta m=0.5$ . На рисунке 6 представлен график-гистограмма ежесуточной частоты сейсмических событий, за период с 25.01.25 г. по 28.02.25 г., в пределах которого наблюдалось наиболее интенсивное проявление аномального процесса.

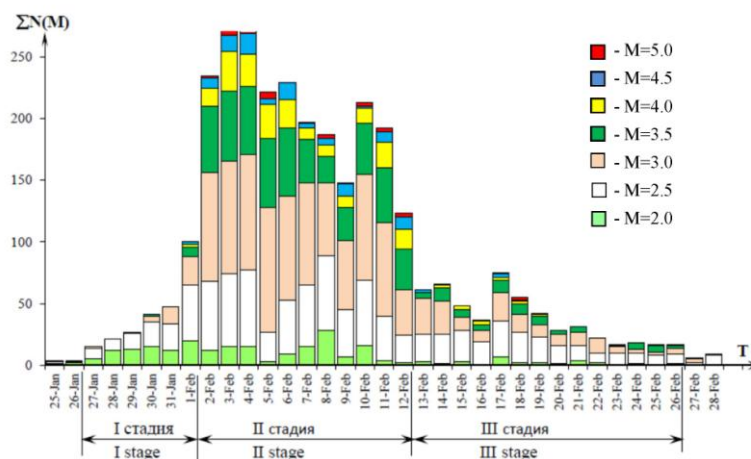


Рис. 6. График количественного распределения землетрясений по magnitude ( $M$ ) за период наблюдений ( $T$ ) /

Fig. 6. Graph of the quantitative distribution of earthquakes by magnitude over the observation period ( $T$ )

Анализ графика-гистограммы позволяет общую продолжительность всего аномального процесса разложить на 3 временные стадии, соответствующие 6, 10 и 15 суткам.

Первая стадия соответствует началу процесса активизации и характеризуется трендом нарастаний значений суточной частоты от 15 до 100 событий, с последующим резким переходом ко второй стадии. Вторая стадия характеризуется наиболее интенсивным проявлением сейсмических событий со средним уровнем  $n=200$  ежесуточных значений частоты и, по сути, является началом основной стадии процесса вулканической активизации. Период третьей стадии – плавный спад интенсивности проявления сейсмических событий от 120 до 17 значений, и, при этом с 12.02 по 19.02 частота возникновения сейсмических событий в магнитудной группе  $M=4.5 \div 5$  сохраняется. Процесс активизации второй и третьей стадии не монотонный. Выделяются временные фазы возникновения импульсно куполообразных всплесков флуктуации сейсмичности продолжительностью от двух до пяти дней, в пределах которых наблюдаются одновременные возникновения землетрясений с магнитудами  $M=2 \div 5$ . Эти флуктуации прерываются двумя бухтообразными снижениями уровней, в пределах которых возникновение землетрясений с магнитудами значений  $M=4.5 \div 5$  сохраняется. В общем процессе наличие таких аномальных флуктуаций показывает, что этот процесс отображает одновременное возникновение кратковременного биения магматической камеры подводного дремлющего вулкана Колумбо и тремора всего протяженного подводного вулcano-тектонического линеймента Санторин-Амаргос. По всей вероятности, выявленная активизация связана с дополнительной инъекцией магматического вещества, в виде флюидов, из верхней мантии в магматический резервуар, в область вулканического сооружения Колумбо, и ее диффузии по всей протяженности подводного вулcano-тектонического линеймента.

Возникновение большого количества сейсмических событий, в магнитудном диапазоне  $M=2 \div 5$ , является следствием миграции этой диффузии, приводящей к разрывам многочисленных, разномасштабных магматических даек, насыщенных по всей протяженности вулcano-тектонического линеймента.

Исследуемый нами процесс является одной из аномальных форм проявления сложных процессов вулcano-тектонического взаимодействия. Большинство случаев вулcano-тектонических землетрясений предваряются и сопровождаются извержением магмы или выбросом газов из кратеров активных вулканов. Подобные вулканические явления, при наблюдаемой нами сейсмической активности, не зафиксированы.

В этой связи, необходимо отметить, что в работах [Родкин, Андреева 2025а, 2025б] на основе изучения сейсмичности вулканически активной Курило-Камчатской зоны с «окном» 100 дней до события при подготовке крупных ( $M \geq 6.5$ ) тектонических землетрясений, очаги которых расположены в верхней мантии на глубине в несколько десятков км, происходит прорыв легких флюидов из верхней мантии в поверхностные слои земной коры.

После окончания наблюдаемого нами в течение 100 дней процесса аномальной активизации слабой сейсмичности на расстоянии 80 км южнее вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос, 22.05.2025 г. произошло крупное землетрясение с магнитудой  $M=6.2$ , гипоцентр которого был расположен в верхней мантии на глубине 58 км.

По всей вероятности, выявленная активизация связана с дополнительной инъекцией легких флюидов из верхней мантии под воздействием предельных упругих напряжений в очаговой области в магматический резервуар, питающий тектонический линеament Санторин-Амаргос, в область вулканического сооружения Колумбо.

### Выводы

Вулканы Санторин, Колумбо и Нисирос являются наиболее активными т.н. «Горячими точками» Эгейской вулканической дуги, где активные мантийные плюмы внедряются в магматические резервуары, способствуя их активизации. Этот процесс можно принять в качестве одной из основных причин возникновения аномальных проявлений сейсмичности в виде умеренных и слабых сейсмических событий в окрестности вулканических структур.

Выявленные закономерности явления позволяют предположить, что причиной дополнительной инъекции легких флюидов из верхней мантии в магматический резервуар, питающий тектонический линеament Санторин-Амаргос, являются предельные упругие напряжения в очаговой области крупного тектонического землетрясения. При этом пространственно-временные параметры полностью укладываются в рамки вышеуказанных критериев подготовки крупных тектонических землетрясений. Поэтому достаточно длительная аномальная активизация слабой сейсмичности в пределах вулcano-тектонического линеамента предваряет тектонические землетрясения.

Проявленный повышенный интерес к изучению данного процесса обусловлен тем обстоятельством, что на Армянском Нагорье расположены крупные вулканические сооружения Арарат, Арагац, Ардаган, Сипан, Немрут, Тондрак, а на Большом Кавказе – Эльбрус, Казбек, сейсмические условия которых по ряду объективных причин с рассмотренной точки зрения слабо изучены [Abrehdari et al., 2022].

Автоматизированная система сейсмогеодинамических наблюдений Армении, включающая армянскую и китайскую аппаратуру, уверенно регистрирует слабые землетрясения с пороговым магнитудным уровнем  $M \geq 1.5$ , по всей территории Кавказского региона.

Выдвигаемые нами выводы не претендуют на однозначность, и являются предметом широкой научной дискуссии, в ходе которой на основе результатов дополнительных исследований, гипотеза может быть подтверждена или опровергнута.

## Литература

1. Апродов В.А. Зоны землетрясений. М.: Мысль, 2000. – 461 с.
2. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Мкртчян М.А., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Карапетян Р.К., Мкртчян Г.А. Разрядка сейсмотектонических напряжений Восточно-Турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г.  $M_w = 7.8$  как процесс деструкции геологической среды очаговой области. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 71–84. DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f.
3. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ( $M_w=7,8$ ). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.
4. Гордеев Е.И. Сейсмичность вулканов и контроль вулканической активности. // Вестник Дальневосточного отделения РАН. – 2007. – № 2(132). – С. 38–45.
5. Родкин М.В., Андреева М.Ю. О проявленности типовых предвестниковых аномалий в форшоковых областях сильных землетрясений, Курило-Камчатский регион. // Вулканология и сейсмология. – 2025а. – № 2. – С. 62–72. DOI: 10.31857/S0203030625010053.
6. Родкин М.В., Андреева М.Ю. Уточнение характера типовых предвестниковых аномалий для разноглубинных землетрясений Курило-Камчатский регион. // Геодинамика и тектонофизика. – 2025б. – Т. 16. № 1. 0811. DOI: 105800/GT-2025-16-1-0811.
7. Свалова В.Б. Геодинамика, геотермия и сейсмичность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона и землетрясение в Мраморном море (Турция) 23 апреля 2025 года. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 8–23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001.
8. Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. М.: Недра, 1984. – 344 с.
9. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. The Caucasus territory hot-cold spots determination and description using 2D surface waves tomography. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2022. – Vol. 22. – ES5004. DOI: 10.2205/2022ES000814.
10. Ambraseys N., Adams R. The Rhodes earthquake of 26 June 1926. // Journal of Seismology. – 1998. – Vol. 2. – pp. 267–292.
11. Bohnhoff M., Rische M., Meier T., Becker D., Stavrakakis G., Harjes. H.-P. Microseismic activity in the Hellenic Volcanic Arc, Greece, with emphasis on the seismotectonic setting of the Santorini-Amorgos zone. // Tectonophysics. – 2006. – Vol. 423. No. 1. – pp. 17–33. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.03.024.
12. Bozkurt C.N., Bozkurt E. Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. // Tectonophysics. – 2009. – Vol. 473. No. 1. – pp. 234–260. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.05.036.
13. Brustle A. Seismicity of the eastern Hellenic Subduction Zone. Ph.D. thesis. Bochum: Ruhr University, 2012. – 151 p.
14. Casten U., Snopek K. Gravity modelling of the Hellenic subduction zone – a regional study. // Tectonophysics. – 2006. – Vol. 417. No. 3. – pp. 183–200. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.11.002.
15. Chamot-Rooke N., Rangin C., Le Pichon X. DOTMED: A synthesis of deep marine data in the eastern Mediterranean: book. Mem. Soc. Geol. France, 2005. Vol. 177, – 64 p.
16. Drymoni K., Browning J., Gudmundsson A. Spatial and temporal volcanotectonic evolution of Santorini volcano, Greece. // Bulletin of Volcanology. – 2022. – Vol. 84. No. 6. – pp. 1–18. DOI: 10.1007/s00445-022-01566-4.



17. Fountoulakis I., Evangelidis C.P. The 2024–2025 seismic sequence in the Santorini-Amorgos region: Insights into volcano-tectonic activity through high-resolution seismic monitoring. // *Seismica*. – 2025. – Vol. 4. No. 1. – DOI: 10.26443/seismica.v4i1.1663.
18. Hill D.P., Reasenber P.A., Michael A. et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. // *Science*. – 1993. – Vol. 260. – pp. 1617–1623.
19. Karagianni E., Papazachos C. Shear velocity structure in the Aegean region obtained by joint inversion of Rayleigh and Love waves. // *Geological Society London Special Publications*. – 2007. – Vol. 291. No. 1. – pp. 159–181. DOI: 10.1144/SP291.8.
20. Karapetyan J., Li L., Geodakyan E., Yuan S.Y., Karapetyan R. Site survey and assessment for the planned seismogeodynamic monitoring network in the Republic of Armenia. // *Earthquake Science*. – 2022. – No. 35. – p. 487–495. DOI: 10.1016/j.eqs.2022.12.004.
21. Karapetyan J., Li L., Zhou J., Hovhannisyan L., Wang Y., Karapetyan R., Gevorgyan A., Harutyunyan K. The problems of declustering in the processing of seismic information in the Tauro Caucasus Region. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2024. – Vol. 114. – pp. 2008–2027. DOI: 10.1785/0120230291.
22. Klaver M., Carey S., Nomikou P., Smet I., Godelitsas A., Vroon P. A distinct source and differentiation history for Kolumbo submarine volcano, Santorini volcanic field, Aegean Arc. // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. – 2016. – Vol. 17. No. 8. – pp. 3254–3273. DOI: 10.1002/2016GC006398.
23. Minakami T. Fundamental research for prediction of volcanic eruption. Pt I. // *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. – 1960. – Vol. 38. – pp. 497–544.
24. Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelou K. Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece. // *Global and Planetary Change*. – 2012. – Vol. 90–91. – pp. 135–151. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.01.001.
25. Reilinger R., McClusky S., Paradissis D., Ergintav S., Vernant P. Geodetic constraints on the tectonic evolution of the aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone. // *Tectonophysics*. – 2010. – Vol. 488. Issue 1–4. – pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.05.027.
26. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F. et al. GPS constraints on continental deformation in the African-Arabian-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2006. – Vol. 111. No. (B5):B05411. – pp. 1–26. DOI: 10.1029/2005jb004051.

## References

1. Aprodov V.A. *Earthquake Zones*. Moscow. Mysl. 2000. 461 p. (In Russ.)
2. Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Mkrtchyan M.A., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Karapetyan R.K., Mkrtchyan G.A. Release of seismotectonic stresses of the Eastern Turkey earthquake on 06 February 2023  $M_w=7.8$  as a destruction process in focal area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 71–84. DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f. (In Russ.)
3. Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan M.A., Mkrtchyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ( $M_w=7.8$ ). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004. (In Russ.)
4. Gordeev E.I. Seismicity of volcanoes and monitoring of volcanic activity. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2007. No. 2(132). pp. 38–45. (In Russ.)
5. Rodkin M.V., Andreeva M.Yu. On the manifestation of typical precursor anomalies in foreshock areas of strong earthquakes, Kuril-Kamchatka region. *Volcanology and Seismology*. 2025a. No. 2. pp. 62–72. DOI: 10.31857/S0203030625010053. (In Russ.)

6. Rodkin M.V., Andreeva M.Yu. Clarification of the nature of typical precursor anomalies for earthquakes of varying depths in the Kuril-Kamchatka region. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2025b. Vol. 16. No. 1. 0811. DOI: 105800/GT-2025-16-1-0811. (In Russ.)
7. Svalova V.B. Geodynamics, geothermics and seismicity of the Caucasus-Anatolian-Arabian region and the earthquake in the Sea of Marmara (Turkey) on 23 April 2025. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 8–23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001. (In Russ.)
8. Khaine V.E. *Regional Geotectonics. Alpine-Mediterranean Belt*. Moscow. Nedra. 1984. 344 p. (In Russ.)
9. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. The Caucasus territory hot-cold spots determination and description using 2D surface waves tomography. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2022. Vol. 22. ES5004. DOI: 10.2205/2022ES000814.
10. Ambraseys N., Adams R. The Rhodes earthquake of 26 June 1926. *Journal of Seismology*. – 1998. Vol. 2. pp. 267–292.
11. Bohnhoff M., Rische M., Meier T., Becker D., Stavrakakis G., Harjes. H.-P. Microseismic activity in the Hellenic Volcanic Arc, Greece, with emphasis on the seismotectonic setting of the Santorini-Amorgos zone. *Tectonophysics*. 2006. Vol. 423. No. 1. pp. 17–33. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.03.024.
12. Bozkurt C.N., Bozkurt E. Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. *Tectonophysics*. 2009. Vol. 473. No. 1. pp. 234–260. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.05.036.
13. Brustle A. Seismicity of the eastern Hellenic Subduction Zone. Ph.D. thesis. Bochum. Ruhr University. 2012. 151 p.
14. Casten U., Snopek K. Gravity modelling of the Hellenic subduction zone – a regional study. *Tectonophysics*. 2006. Vol. 417. No. 3. pp. 183–200. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.11.002.
15. Chamot-Rooke N., Rangin C., Le Pichon X. DOTMED: A synthesis of deep marine data in the eastern Mediterranean: book. *Mem. Soc. Geol. France*. 2005. Vol. 177. 64 p.
16. Drymonis K., Browning J., Gudmundsson A. Spatial and temporal volcanotectonic evolution of Santorini volcano, Greece. *Bulletin of Volcanology*. 2022. Vol. 84. No. 6. pp. 1–18. DOI: 10.1007/s00445-022-01566-4.
17. Fountoulakis I., Evangelidis C.P. The 2024–2025 seismic sequence in the Santorini-Amorgos region: Insights into volcano-tectonic activity through high-resolution seismic monitoring. *Seismica*. 2025. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.26443/seismica.v4i1.1663.
18. Hill D.P., Reasenberg P.A., Michael A. et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. *Science*. 1993. Vol. 260. pp. 1617–1623.
19. Karagianni E., Papazachos C. Shear velocity structure in the Aegean region obtained by joint inversion of Rayleigh and Love waves. *Geological Society London Special Publications*. 2007. Vol. 291. No. 1. pp. 159–181. DOI: 10.1144/SP291.8.
20. Karapetyan J., Li L., Geodakyan E., Yuan S.Y., Karapetyan R. Site survey and assessment for the planned seismogeodynamic monitoring network in the Republic of Armenia. *Earthquake Science*. 2022. No. 35. p. 487–495. DOI: 10.1016/j.eqs.2022.12.004.
21. Karapetyan J., Li L., Zhou J., Hovhannisyan L., Wang Y., Karapetyan R., Gevorgyan A., Harutyunyan K. The problems of declustering in the processing of seismic information in the Tauro Caucasus Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2024. Vol. 114. pp. 2008–2027. DOI: 10.1785/0120230291.
22. Klaver M., Carey S., Nomikou P., Smet I., Godelitsas A., Vroon P. A distinct source and differentiation history for Kolumbo submarine volcano, Santorini volcanic field, Aegean Arc. *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. 2016. Vol. 17. No. 8. pp. 3254–3273. DOI: 10.1002/2016GC006398.
23. Minakami T. Fundamental research for prediction of volcanic eruption. Pt I. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. 1960. Vol. 38. pp. 497–544.
24. Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelou K. Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera,

Greece. *Global and Planetary Change*. 2012. Vol. 90–91. pp. 135–151. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.01.001.

25. Reilinger R., McClusky S., Paradissis D., Ergintav S., Vernant P. Geodetic constraints on the tectonic evolution of the aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone. *Tectonophysics*. 2010. Vol. 488. Issue 1-4. pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.05.027.

26. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F. et al. GPS constraints on continental deformation in the African-Arabian-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2006. Vol. 111. No. (B5):B05411. pp. 1–26. DOI: 10.1029/2005jb004051.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a

Оригинальная статья

## Инженерно-сейсмометрические сети, как геофизический метод контроля воздействий опасных природно-техногенных процессов на урбанизированные территории

Н.К. Капустян<sup>1</sup>, В.Б. Заалишвили<sup>2,3,4</sup>, Д.А. Мельков<sup>2</sup>, Р.Т. Акбиев<sup>3,4</sup>,  
Т.И. Мерзликин<sup>2</sup>, Т.В. Морозова<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: nkapustian@gmail.com;

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

<sup>3</sup> Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России, Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29;

<sup>4</sup> Евразийская СЕЙСМО Ассоциация, Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29, e-mail: akbi.rust@gmail.com;

<sup>5</sup> АНО «СРОСЭКСПЕРТИЗА», Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29, e-mail: t.morozova22@yandex.ru

Статья поступила: 03.11.2025, доработана: 02.12.2025, принята к публикации: 07.12.2025

**Резюме:** Получение достоверной информации о сейсмостойкости существующей застройки в настоящее время является наиболее **актуальной** задачей. Это, в первую очередь, касается застройки, сформированной из многоквартирных зданий 1960–1980-х гг. постройки. **Целью** работы является выявление наиболее важных особенностей поведения зданий и сооружений при природно-техногенных воздействиях, не учитываемых Нормами, что исключает учет изменения параметров при задании «критических значений» на стадии проектирования. **Методы.** Экспериментальное исследование позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физической системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках. Это обусловило использование результатов мониторинга движений объектов, обусловленных природными и техногенными воздействиями. **Результаты.** Дается обзор развития инженерных сейсмометрических сетей, рассматриваются особенности установки станций, исходя не только из особенностей строительных конструкций, но и особенностей грунтовых условий. Необходимость паспортизации застройки, при которой важнейшими задачами являются оценка реальной сейсмостойкости существующих конструкций и степени износа, должна быть основана на современных технологиях мониторинга с централизованным сбором данных для совершенствования нормативной базы и экономически эффективного инструментального обследования большого количества зданий.

**Ключевые слова:** воздействия, инструментальный мониторинг, инженерно-сейсмометрическая сеть, застройка, сейсмостойкость, физический износ.

**Для цитирования:** Капустян Н.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Акбиев Р.Т., Мерзликин Т.И., Морозова Т.В. Инженерно-сейсмометрические сети, как геофизический метод контроля воздействий опасных природно-техногенных процессов на урбанизированные территории. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a



DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a

Original paper

# Engineering seismometric networks as a geophysical method for monitoring the impact of hazardous natural and technogenic processes on urbanized areas

N.K. Kapustyan<sup>1</sup>, V.B. Zaalishvili<sup>2,3,4</sup>, D.A. Melkov<sup>2</sup>, R.T. Akbiev<sup>3,4</sup>,  
T.I. Merzlikin<sup>2</sup>, T.V. Morozova<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
10/1 B. Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation,  
e-mail: nkapustian@gmail.com;

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

<sup>3</sup> Central Research Institute of Construction, Ministry of Construction, Housing and Utilities  
of the Russian Federation, 29 Vernadsky Ave., Moscow 119331,  
Russian Federation;

<sup>4</sup> Eurasian Seismic Association, 29 Vernadsky Ave., Moscow 119331,  
Russian Federation, e-mail: akbi.rust@gmail.com;

<sup>5</sup> SROSEXPERTIZA 29, Vernadsky Ave., Moscow 119331, Russian Federation,  
e-mail: t.morozova22@yandex.ru

Received: 03.11.2025, revised: 02.12.2025, accepted: 07.12.2025

**Abstract:** Obtaining reliable information on the seismic resistance of existing buildings is currently urgent issue. This primarily applies to buildings consisting of multi-apartment buildings constructed between the 1960s and 1980s. **The aim** of this study is to identify the most important features of the behavior of residential buildings and structures under natural and anthropogenic impacts that are not taken into account by the by current Building Codes, which precludes consideration of parameter changes when setting “critical values” at the design stage. **Methods.** Experimental research allows for the most reliable determination of the safe potential of a building, structure, or any physical system under seismic, dynamic, and other loads. This necessitated the use of the results of monitoring object movements caused by natural and anthropogenic impacts. **Results.** An overview of the development of engineering seismometric networks is provided, and the specifics of station installation are considered, based not only on the characteristics of building structures but also on the specifics of soil conditions. The need for building certification, where the most important tasks are assessing the actual seismic resistance of existing structures and the degree of deterioration, should be based on modern monitoring technologies with centralized data collection. This is essential for improving the regulatory framework and cost-effectively instrumental surveys of large numbers of buildings

**Keywords:** impacts, instrumental monitoring, engineering seismometric network, building, seismic resistance, physical deterioration.

**For citation:** Kapustyan N.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Akbiev R.T., Merzlikin T.I., Morozova T.V. Engineering seismometric networks as a geophysical method for monitoring the impact of hazardous natural and technogenic processes on urbanized areas. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a

## Введение

Землетрясения являются одним из наиболее опасных природных явлений, приводящих к колоссальным потерям и массовой гибели людей. При этом к таким последствиям приводят не сами землетрясения, а разрушения зданий и сооружений. Половина федеральных округов Российской Федерации занимает 70 % территории страны, при этом более трети субъектов России, входящих в эти округа расположены на сейсмоопасных территориях.

Достоверная информация о сейсмостойкости сложившейся застройки на сейсмоопасных территориях отсутствует. Тем более, в условиях природно-техногенных процессов. Особенно это касается застройки, сформированной из многоквартирных зданий 1960–1980-х гг. постройки, которая превышает 500 млн м<sup>2</sup> в четырех федеральных округах Российской Федерации. По экспертным оценкам на эти многоквартирные дома приходится порядка 200 млн м<sup>2</sup> зданий с дефицитом сейсмостойкости и около 26 млн м<sup>2</sup> находящихся в ограниченно работоспособном состоянии, и именно они станут главной угрозой для жизни и здоровья населения в случае возникновения сильных землетрясений.

Только в прошлом столетии на сейсмоопасных территориях СССР и современной России произошло шесть разрушительных землетрясений, погибло около 200 тыс. человек, был нанесен огромный экономический ущерб, сопоставимый с ущербом от военных действий.

После каждого разрушительного землетрясения происходит совершенствование строительных норм, принимаются меры по снижению будущих ущербов.

После Ташкентского землетрясения 1966 г. в СССР на урбанизированных территориях в крупных городах и столицах союзных республик, расположенных в сейсмически опасных регионах, с 1970 г. в союзных республиках были организованы инженерно-сейсмометрические станции (ИСС), которые располагались в зданиях и сооружениях. Особое значение имело то обстоятельство, что при этом изучалось поведение застройки в различных грунтовых условиях (инженерно-геологические, геоморфологические и гидрогеологические условия). На Кавказе такие наблюдения велись, в основном, на Южном Кавказе (Азербайджан, Армения, Грузия), в Иране и Турции [Zaalishvili, 2001; Zaalishvili et al., 2001]. Высокая сейсмическая активность Южного Кавказа обуславливала такой приоритет. На Северном Кавказе аналогичные наблюдения, проводились в Махачкале (Дагестан) и в Сочи.

## Методология исследований

Экспериментальное исследование позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физической системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках. Это обусловило использование результатов мониторинга движений объектов, обусловленных природными и техногенными воздействиями.

Известно, что именно экспериментальное исследование при его правильном планировании и корректном анализе полученных данных позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физиче-

ской системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках. Современная методика расчета на сейсмостойкость зданий и сооружений основана на спектральной теории. Основными данными последней являются спектры коэффициентов динамичности и формы колебаний зданий и сооружений, полученные при сильных землетрясениях [Bektas, Kegyes-Brassai, 2023]. В связи с указанным обстоятельством одной из основных задач на современном этапе развития теории сейсмостойкости является получение в достаточном количестве данных по колебаниям зданий и сооружений при сильных землетрясениях [Domaneschi et al., 2017; Mangalathu et al., 2020]. Задачей инженерно-сейсмометрической службы (ИСС) является получение информации о колебаниях сооружений и прилегающих участков грунта при землетрясениях [Рекомендации ... , 1984].

### Инженерно-сейсмометрические станции в Грузии

В соответствии с постановлением Госкомитетов по науке и технике и строительству Совета Министров СССР, а также и Президиума Академии наук СССР за № 116/2 от 1967 г. на территории г. Тбилиси как столицы Грузинской ССР в начальный период намечалась организация 6-ти инженерно-сейсмометрических станций.

Ко времени принятия постановления Совета Министров Груз. ССР о выделении Институту строительной механики и сейсмостойкости (ИСМИС) АН Груз. ССР помещений в зданиях жилых домов и проектных институтов в г. Тбилиси для организации в них инженерно-сейсмометрических станций (ИСС), в новых застраиваемых районах города возводились в основном 8-этажные крупноблочные и 9-этажные крупнопанельные жилые здания и в старых районах – 10–15-этажные производственные железобетонные здания каркасного типа.

Грунтами основания зданий являлись коренные породы и глинистые грунты разной мощности, фундированные в зависимости от вида и состояния грунтов оснований на ленточных фундаментах или на плитах.

Инженерно-сейсмометрические станции в числе 10 (9 станций в г. Тбилиси и одна в г. Гори), начиная с 1970 г., были размещены в жилых и административно-производственных зданиях различных типовых конструкций.

Инженерно-сейсмометрическая станция ИИС 9 была установлена в районе новостроек «Цминда-Цкали» города Гори. Участок находится на территории первой левой надпойменной террасы р. Лиахви, сложенной мощной толщей обводненных галечников, покрытых тонким слоем суглинков.

Грунтами основания здания являются галечники с редкими валунами с песчаным заполнителем в количестве 15–30 %. Уровень грунтовых вод залегает на глубине 2,0–2,2 м от планировочной отметки. Здание представляет собой крупнопанельный трехсекционный 40-квартирный пятиэтажный жилой дом с чердачным перекрытием из сборных железобетонных плит. Фундаменты ленточные железобетонные заглубленные на 2,6 м от планировочной отметки. Крыша плоская, двускатная к средней части здания.

В плане здание размером 59,4×10,5 м. Высота здания 18,0 м. Общий вид здания и вертикальный разрез приведены на рисунке 1.

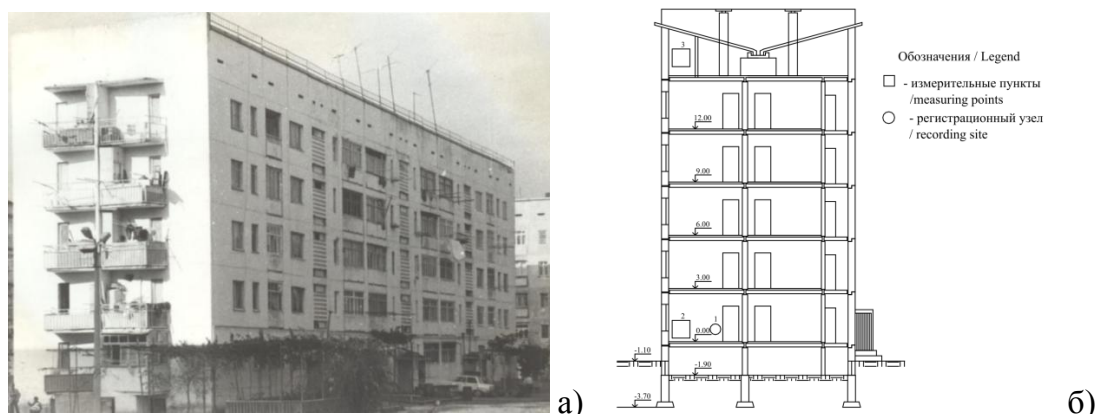


Рис. 1. Общий вид (а) и вертикальный разрез (б) здания ИСС № 9 /  
 Fig. 1. General view (a) and vertical section (b) of the ISS No. 9 building

Измерительный пункт № 1 расположен во дворе на расстоянии 20 м от здания в специальной камере, заглубленной в грунты основания здания. В бункере (грунтовая точка) повышенная влажность из-за просачивания грунтовых вод. Измерительный пункт № 2 расположен в комнате на перекрытии первого этажа. Измерительный пункт № 3 размещен в чердачном помещении на перекрытии в специальной камере. Все пункты были оснащены сейсмическими приемниками: ВБП-3, С5С, СПМ-16 по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и ВЭГИК для запуска станции (рис. 2).

Регистрационный узел станции (рис. 2б) расположен в комнате первого этажа, рядом с измерительным пунктом № 1 и был оснащен приборами: осциллограф Н041 (4 шт.), гальванометр ГБ-IV (24 шт.), шунтовая коробка ШК-2 (4 шт.). Запуск системы осциллографов производится электронным пусковым устройством типа ПУ-1 с получением сигнала от сейсмоприемника типа ВЭГИК, расположенного в измерительном пункте № 1 и ориентированного по оси  $x$ . Время отработки станции после запуска 20 с. Скорость протяжки бумаги  $v=40$  мм/с.

С целью устранения помех во время записи колебаний здания при землетрясениях осциллографы были установлены и закреплены на пружинах в специальном каркасе. Осциллографы снабжены гальванометрами типа ГБ-1У-10 и работали в ждущем режиме.

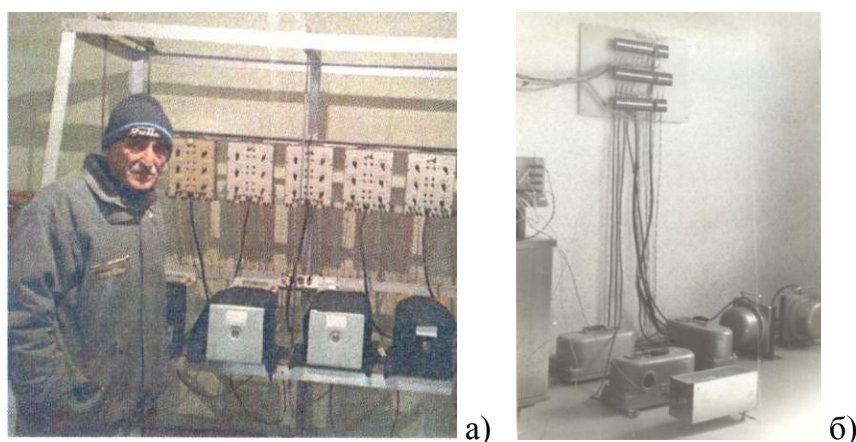


Рис. 2. Измерительный пункт (фото В.Б. Заалишвили, 2009) (а),  
 регистрационный узел станции ИСС № 9 (б) /

Fig. 2. Measuring point (photo by V.B. Zaalishvili, 2009) (a), registration unit of ISS station No. 9 (b)



Станцией была получена аналоговая запись Рачинского землетрясения (29.04.1991 г.) (рис. 3). Для записи использовались сейсмоприемники ОСП-2. Запуск системы осциллографов производился электронным пусковым устройством типа ПУ-1 с получением сигнала от сейсмоприемника, расположенного в измерительном пункте № 1. По техническим причинам Х-компонента измерительного пункта № 1 не сработала.

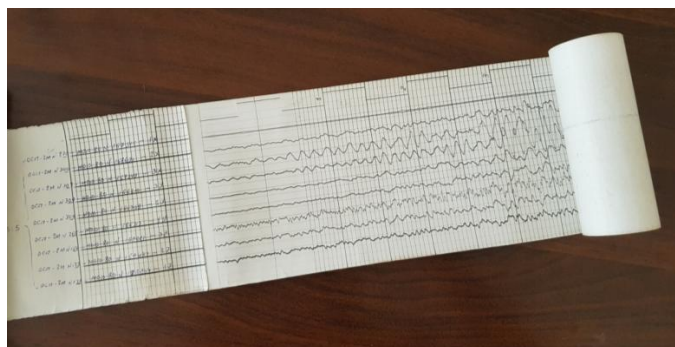


Рис. 3. Запись Рачинского землетрясения, полученная ИСС г. Гори /

Fig. 3. Recording of the Racha earthquake obtained by the engineering-seismological network of Gori

Для оцифровки аналоговых записей в ГФИ ВНЦ РАН разработан специальный алгоритм. Данный алгоритм был апробирован при оцифровке сейсмических записей схода ледника Колка 20 сентября 2002 года, полученных аналоговыми станциями России и Грузии. Результаты оцифровки представлены на рисунке 4. Далее строились спектры колебаний. Наибольший интерес представляла Y-компонента, т.к. она единственная горизонтальная компонента, записанная на всех трех измерительных пунктах. Наблюдается соответствие преобладающих частот (периодов) колебаний собственной частоте здания равной 4 Гц (0,25 с).

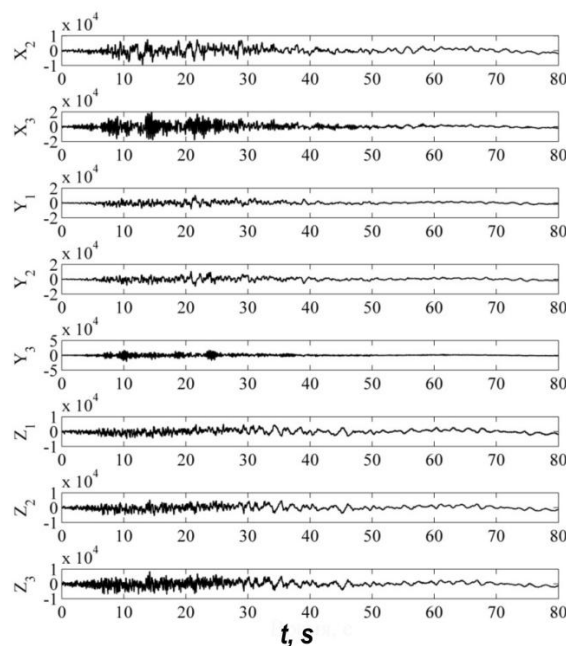


Рис. 4. Оцифрованные записи Рачинского землетрясения, полученные на инженерно-сейсмометрической станции ИСС 9 /

Fig. 4. Digitized records of the Racha earthquake obtained at the ISS 9 engineering seismometric station

Спектр реакции (ответа) – один из наиболее важных и широко используемых параметров в теории и практике расчетов сооружений на сейсмостойкость. Предложенная более 80 лет назад, в настоящее время, концепция используется практически во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчету сооружений на сейсмостойкость.

Спектр реакции представляет собой зависимость максимальных амплитуд смещений (скоростей, ускорений) от периодов собственных колебаний системы с одной степенью свободы и позволяет оценивать реакцию системы (период собственных колебаний) на заданные сейсмические воздействия или огибающую сейсмических воздействий [Чернов, 2023, 2024]. В частности, в СНиП II-7-81\* [Строительные ..., 2000] или в его актуализированной версии введено понятие «спектрального коэффициента динамичности» –  $\beta$ , который представляет собой отношение спектра реакции к максимальной амплитуде входящего воздействия.

По записи Рачинского землетрясения, записанной непосредственно на грунтах, был построен спектр реакции в диапазоне 0–10 с (рисунок 5а).

Полученные записи реакции одномассового осциллятора на внешнее воздействие сравнивались с инструментальной записью на чердачном перекрытии рассматриваемого здания. Для этого были построены спектры этих записей (рисунок 5б). Наибольшее совпадение спектра расчетной записи со спектром инструментальной наблюдается для коэффициента демпфирования  $\xi=0,05$ . Именно это значение, как правило, используется в практике сейсмостойкого строительства при расчете спектров реакции для зданий данного типа.

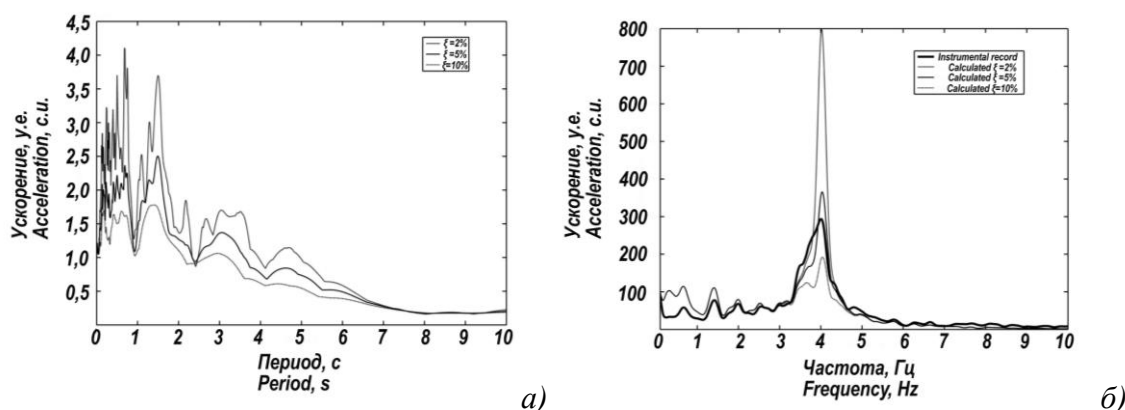


Рис. 5. Спектр реакции при различных значениях коэффициента демпфирования /

Fig. 6. Response spectrum for different damping coefficient values

Соответствие реакции одномассового осциллятора записям реального землетрясения показывает, что крупнопанельные здания являются жесткими конструкциями и, в первом приближении, с достаточной точностью могут рассматриваться в качестве одномассового осциллятора (во всяком случае, при этажности в пределах пяти).

### Инженерно-сейсмометрические наблюдения на высотных зданиях в Москве

Одним из направлений обследования здания является разработка методов анализа колебаний зданий. Развитие аппаратных и вычислительных средств позволило при обследовании конструкций перейти от использования вынужденных колебаний (от вибромашин, взрывов, землетрясений) к регистрации микроколебаний,

возбуждаемых микросейсмами и ветровыми пульсациями (Патент RU 2242026 С1, 15.01.2004) [Острецов и др., 2004].

Возведение в Москве современных высотных зданий потребовало использования монолитных железобетонных конструкций, а не стальных (московские высотки 1950-х гг.) и в сложных грунтовых условиях широкого применения специальных плитных фундаментных конструкций. Немаловажным является необычное для мировой практики высотного строительства превалирование ветровых нагрузок над сейсмическими, что характерно для Русской платформы [Николаев и др., 2006]. К особенностям строительства можно также отнести достаточно сложные архитектурные объемно-планировочные решения зданий, создающие контрастную мозаику напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций.

Уточнение надежности принимаемых проектных решений потребовало проведения специализированных исследований, причем не на моделях или отдельных элементах конструкций, а натурных, для реальных зданий. По существу, была возрождена практика детального обследования работы конструкций (например, исследования Л.И. Корчинского при строительстве московских высоток 1950-х гг.). Отметим, что проведение таких работ было начато АО «ЦНИИЭП жилища» еще до появления концепции мониторинга высотных зданий. Накопленный к тому моменту опыт обследования высотных зданий позволил АО «ЦНИИЭП жилища» выступить в качестве головной организации при разработке соответствующих нормативов (например, МГСН 4.19-2005). Требования безопасности при строительстве и эксплуатации зданий обусловили создание ряда инструкций и нормативов не в результате традиционного обобщения опыта, а на основании модельных и теоретических представлений. В связи с этим, АО «ЦНИИЭП жилища», опираясь на уже полученные экспериментальные данные, выступал с критикой отдельных положений документов (например, устройство пунктов измерения колебаний каждые 5 этажей). Естественно, часть требований принятых документов оказалась излишней, другие важные моменты не были учтены, что привело к фактической отмене МГСН 4.19-2005 с заменой этих норм на ряд других. Опыт показал, что более эффективно регулировать безопасность при строительстве более общими документами – Федеральным законом (например, ФЗ № 384), ГОСТ Р 22.1.12-2005 (Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений – СМИС), а для каждого, по существу, индивидуального высотного здания или иного сложного сооружения разрабатывать Специальные технические условия (СТУ), в которых указываются виды мониторинга.

Этот путь, хотя и оказался более совершенным, но тоже не свободным от недостатков, которые проявляются, в первую очередь, в разделе СМИС, посвященном мониторингу конструкций (СМИК). Иллюстрацией является требование СМИК назначения уже в процессе проектирования «критических» значений контролируемых параметров, превышение которых является угрозой безопасности. Ясно, что, например, значения НДС, закладываемые в проект, и реальные различаются, хотя бы за счет обязательного запаса. Кроме того, требования этих норм не учитывают изменения параметров во времени, прежде всего, температурных. Следует учитывать также разброс в показаниях разных датчиков (особенно при измерении НДС), связанный с условиями их установки, например, необходимость «выставления» нулевого уровня. Мониторинг требует настройки после установки датчиков, «критические» значения не могут быть определены до их монтажа, т.е. при проектиро-

вании. Все эти особенности становятся ясными только после выполнения работ по мониторингу и обследованию зданий и анализа экспериментальных результатов.

### Изменение состояния конструкций во времени

Мониторинг выполнялся как в процессе строительства, так и при эксплуатации. Ниже анализируются результаты, не связанные с ростом этажности, в частности, при монтаже конструкций тогда, когда возведение здания не проводилось – при длительной (более года) остановке строительства и после его завершения. Проанализируем изменение во времени трех типов параметров: собственных частот колебаний, деформаций основных несущих надземных конструкций и давления на грунт под фундаментной плитой.

Временной ход собственных частот колебаний здания иллюстрируется уникальными данными, полученными при мониторинге 44-этажного жилого дома «Эдельвейс» на Давыдовской ул. в Москве. Анализируется 12-летний ход, наблюдения начаты после завершения строительства в 2004 г. и ведутся по настоящее время с шагом по времени в 10 дней. Станция мониторинга расположена на 44-м этаже, ведется сейсмометрическая регистрация колебаний по трем направлениям (по осям плана и вертикали), а также пульсаций давления микробарографом у фасада [Острецов и др., 2005]. Существенно, что для выполнения этих работ был разработан оригинальный аппаратно-программный комплекс, который тиражировался и использовался для обследования состояния зданий – как пострадавших в результате аварий, так и архитектурных памятников [Антоновская и др., 2008].

На рисунке 6 приведены графики временного хода для основных собственных частот колебаний этого здания по разным осям плана  $f_1, f_2$ . Отметим важные особенности кривых, существенные для понимания работы конструкций и для возможности выполнения нормативов (требования задания «критических» значений):

- значения частот собственных колебаний меняются во времени, основной тренд – убывание величин, на который накладываются периодические вариации;
- уравнение кривой основного тренда изменения частот также меняется во времени, изменения становятся все более слабыми. Тем не менее, значения частот изменились от первоначальных частот более чем на 20 %;
- после устранения тренда путем подбора аппроксимирующей кривой и ее вычитания, остается квазипериодический ход, соответствующий по времени и величинам сезонным температурным вариациям (расширению-сжатию монолитного железобетонного здания в целом), размах вариаций значений частоты – 2–3 %.

В течение примерно одного года после завершения строительства, уменьшение частоты колебаний было связано с осадками здания и формированием, так называемой присоединенной массы грунта к фундаментной плите [Острецов и др., 2006]. Дальнейшее уменьшение частоты может быть объяснено явлением ползучести бетона. В настоящее время существует несколько моделей ползучести, дающих разную зависимость частоты от времени. Сравнение кривых для набора моделей и экспериментально полученного тренда позволяет подобрать наиболее подходящую модель ползучести и, тем самым, верифицировать теоретические представления [Капустян и др., 2013]. Необходимо отметить, что модели ползучести были предложены исключительно на основании результатов испытаний относительно небольших железобетонных изделий. Состояние материала реального здания оценивалось впервые.



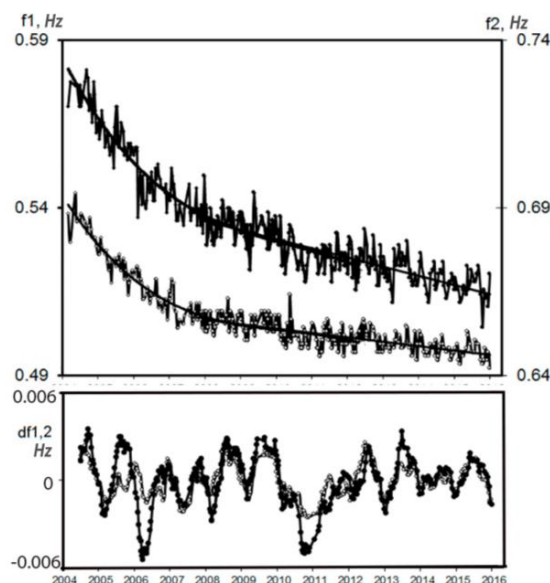


Рис. 6. Изменения во времени собственных частот колебаний высотного 44-этажного здания «Эдельвейс» в Москве ( $f_1, f_2$  – сплошные и полые кружки соответственно) и вычисленные линии тренда (вверху), внизу – с вычитанием линии тренда [Капустян и др., 2013] /

Fig. 6. Changes over time in the natural frequencies of vibrations of the 44-story high-rise building “Edelweiss” in Moscow (solid and hollow circles, respectively) and calculated trend lines (top), bottom – with the subtraction of the trend line [Kapustyan et al., 2013]

Приведенный пример показывает, что задать «критические значения» при проектировании крайне сложно, более реальна длительная настройка мониторинга собственных колебаний, т.к. требуется учет будущих температурных вариаций и недостаточно хорошо изученного процесса ползучести. На основании нашего опыта и анализа литературных данных складывается представление о том, что использование значений собственных частот более эффективно не для мониторинга, а для обследования здания (пример приведен ниже).

Изменение НДС конструкций определяется путем установки деформометров. Для мониторинга высотного 48-этажного здания «Континенталь» на пр. Маршала Жукова в Москве была установлена сеть деформометров фирмы Sisgeo (Италия) в фундаментной плите, в стенах и пилонах первого этажа [Острецов и др., 2008]. Помимо решения многих методических вопросов, связанных с правильной установкой датчиков, их настройкой и определением временного шага снятия показаний [Таракановский и др., 2010], были получены данные о работе конструкций при строительстве и эксплуатации; остановимся на главных результатах:

– мониторинг в процессе возведения, для оценки НДС характеризующийся известным законом роста нагрузок (график строительства), позволяет верифицировать показания датчиков и отсеять «плохие». Наиболее информативными для оценки состояния конструкций являются датчики в пилонах, т.к. их показания связаны достаточно простыми зависимостями с изменением нагрузок. Показания датчиков в стенах и, тем более, в фундаментной плите отображают перераспределение напряжений между конструкциями, а для фундаментной плиты – также и между зданием и грунтом. Таким образом, установка датчиков деформации в стенах и фундаментной плите малоэффективна для мониторинга;

– деформометры в пилонах (как правило, нижних этажей) являются эффективным инструментом мониторинга – они позволяют измерять деформации, которые соответствуют прилагаемым нагрузкам, причем величины достаточно хорошо согласуются с проектными значениями. Это положение хорошо иллюстрирует рисунок 7, где показан в сравнении с расчетными кривыми временной ход деформаций в пилонах 1-го этажа при мониторинге в процессе строительства (рост нагрузок) и при его остановке на год. Обратим внимание на ярко выраженный сезонный температурный ход при остановке строительства, составляющий до 20 %. Такие большие вариации получены из-за того, что строительство не было завершено, конструкции были подвержены внешним атмосферным воздействиям. Расчет температурных деформаций соответствует экспериментально полученным данным.

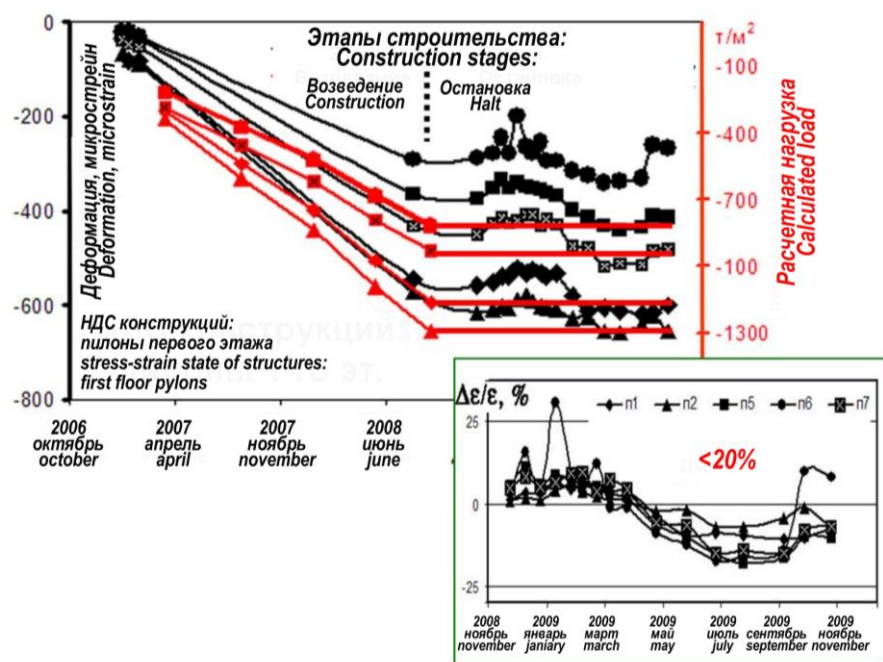


Рис. 7. Изменение во времени деформаций в пилонах 1-го этажа высотного корпуса «Континенталь», Москва: сверху – в сравнении с расчетными значениями, внизу – вариации при остановке строительства /

Fig. 7. Changes in deformations over time in the pylons of the 1st floor of the Continental high-rise building, Moscow: top – in comparison with the calculated values, bottom – variations when construction was stopped

### Пространственно-временные изменения параметров при мониторинге, взаимодействие здания с грунтами основания

В отличие от закономерностей работы конструкций, которые в основном известны и предсказуемы, состояние грунтов основания определяется значительно более сложными закономерностями и многими факторами (геологическим строением, гидрологией, распределением нагрузок и пр.). Одним из способов получения пространственно-временной картины НДС на контакте фундаментная плита-грунт является установка сети датчиков давления на грунт [Заалишвили и др., 2022].

Для высотных зданий, возведенных по проектам Института, с плитной фундаментной конструкцией была реализована схема мониторинга с датчиками давления

под плитой. Наиболее представительные результаты получены для рассматривавшегося выше объекта «Континенталь». На рисунке 8 приведена картина изменения во времени величин разности между реальными и расчетными значениями давления на грунт при строительстве дома. Отчетливо видно следующее:

- превышение реальных нагрузок над расчетными наблюдается тогда, когда здание из «высокого» становится «высотным», т.е. количество этажей проходит рубеж более 20 этажей. Незначительное увеличение при 8 этажах соответствует отпору грунта при большом котловане здания. Отметим, что регистрация отпора грунта показывает чувствительность методики;
- яркое пятно больших реальных давлений достаточно компактно и соответствует зоне, в которой была зафиксирована повышенная фильтрация воды из-за размыкания стены в грунте;
- по абсолютным величинам отмеченная разница невелика – 100 кПа, что составляет не более 20 % от значения давления в этой зоне.

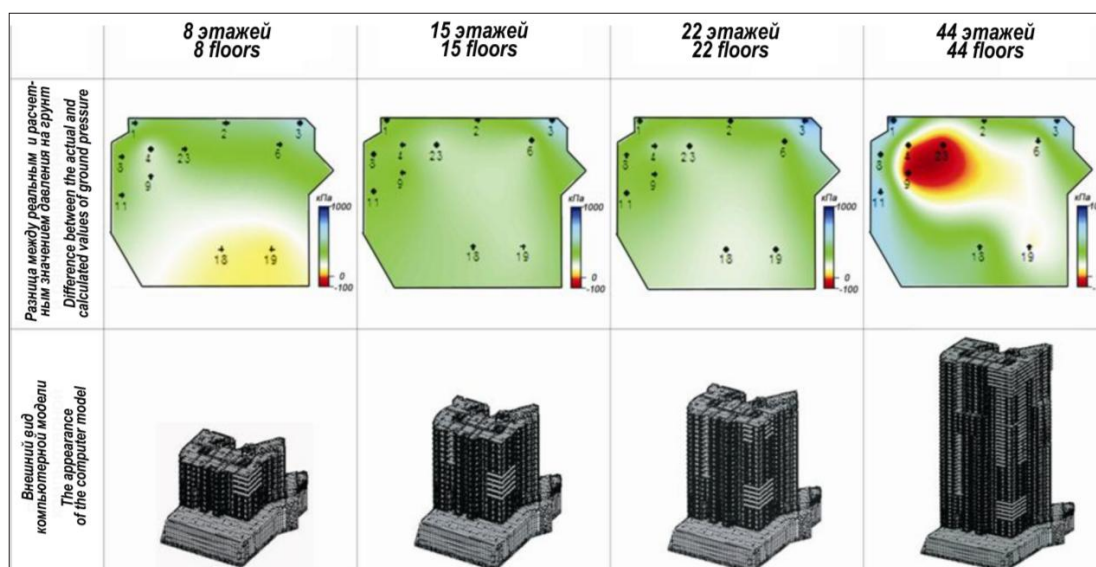


Рис. 8. Мониторинг в процессе строительства: сверху поля разностей между реальными и расчетными значениями давления на грунт под фундаментной плитой, внизу – соответствующие этапы возведения, «Континенталь», Москва /

Fig. 8. Monitoring during construction: at the top are the fields of differences between the actual and calculated values of pressure on the ground under the foundation slab, at the bottom are the corresponding stages of construction, Continental, Moscow

Важным вопросом осуществления безопасности здания по результатам мониторинга является выяснение того, как быстро проявляются изменения параметров в зависимости от природы происходящих процессов. Известно, что здание находится постоянно в изменении, например, перемещения вследствие ветровых нагрузок, особенно в верхней части здания, могут быть достаточно большими, но это не опасный процесс. Рассмотрим связь величин давления на грунт и осадки здания – явно взаимосвязанных параметров. На рисунке 10 приведены три кривые, построенные по данным с датчиков давления на грунт и со скважинных датчиков осадок, расположенных по диагонали фундаментной плиты, причем одна точка (2) – под высотной частью здания. Кривые подобны по форме, но демонстрируют достаточно сложную зависимость, отличающуюся от ожидаемого «плавного хода». Например, отчетливо

видна ситуация, когда давление растет, а осадки нет или она даже уменьшается. Это происходит на ранних стадиях строительства и соответствует отпору грунта.

Для того чтобы понять с чем связаны отклонения от плавного хода, была проведена процедура вычисления тренда (плавного хода, например, показан пунктиром для кривой 2 на рисунке 9) и отклонений от него (флуктуаций давления). Существенно, что для каждого датчика будет свой тренд и свой набор флуктуаций. Нами анализировались карты трендов и флуктуаций, т.е. для каждого заданного момента времени распределения значений по площади фундаментной плиты [Таракановский и др., 2010]. Важная информация об изменении состояния грунтов была получена при остановке строительства более чем на год, когда не было полной нагрузки на грунт от здания, и ход осадки был минимальный. На рисунке 9 показаны карты флуктуаций давления на грунт для разных моментов времени при остановке строительства. Мы можем наблюдать достаточно интересное явление – давление на грунт меняется, причем неравномерно по площади. Наиболее «спокойная картина – зимой, наиболее контрастная – летом, вариации доходят до 50 % от трендового значения. Более того, вариации имеют отчетливую периодичность около 1 года (подобные карты показаны стрелками). Отметим также, что появление пятен неравномерного распределения по площади значений давления объясняет отклонение кривой рисунка 9 от «плавного хода» – мы наблюдаем явление перераспределения давления в пространстве. Нечто подобное наблюдается и по данным тензодатчиков в фундаментной плите, но связать их с полями значений с датчиков давления не просто, т.к. тут играет роль перераспределение деформаций в конструкциях фундаментной плиты.

Природа отмеченного явления в грунте пока не ясна, но сам факт такой мозаичной и достаточно сильной вариации, как давления на грунт, так и деформаций в плите ставит под сомнение эффективность задания «критических значений» параметров до строительства и затем автоматического объявления опасной ситуации при их превышении, как этого требует норматив.

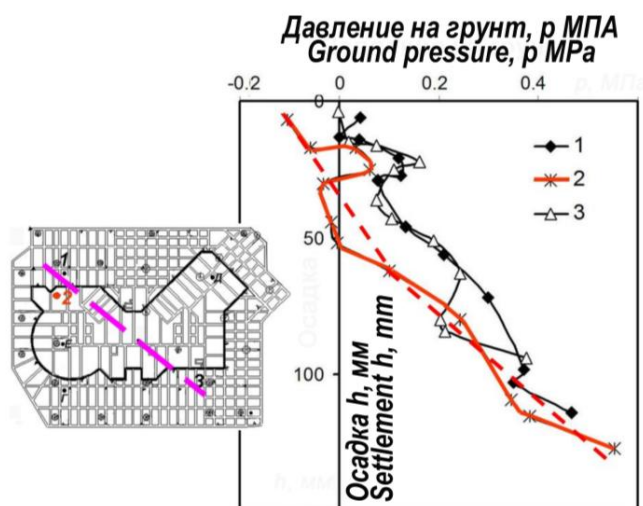


Рис. 9. Экспериментальные кривые соотношения давления на грунт и осадки по данным датчиков давления 1...3 и интегральной осадки, расположение датчиков показано на схеме плиты, «Континенталь», Москва /

Fig. 9. Experimental curves of the relationship between ground pressure and settlement based on data from pressure sensors 1...3 and integral settlement, the location of the sensors is shown on the slab diagram, Continental, Moscow



## Обследование зданий с использованием собственных колебаний

Существует мнение, что выполнение непрерывного мониторинга высотных зданий с использованием частот собственных колебаний малоэффективно, и более эффективно использование этого параметра при обследованиях. С другой стороны, непрерывные наблюдения колебаний, например, высотных арочных плотин целесообразны и дают оценку их состояния при разных типах воздействий – сейсмических, техногенных и пр. [Антоновская и др., 2015]. Это связано с тем, что, в отличие от высотных зданий, влияние геологической среды и закрепление сооружения в ней у плотин существенно большее, а именно закрепление определяет значительную долю возможных вариаций собственных частот.

Для того чтобы понять как влияет на изменение собственных частот состояние здания, нами было выполнено натурное и компьютерное моделирование. В качестве модели было выбрано здание простой формы и сильно разрушенное. Это – памятник архитектуры Преображенская гостиница на Соловках (рис. 10). Здание 3-этажное, сохранились стены практически без перекрытий (частично на 1 эт.). Материал стен – сильно выветрелая кирпичная кладка. Фундамент – валунный, мало-заглубленный. Визуальное обследование обнаруживает значительные трещины, по существу, разделяя здание на блоки. Сейсмометрическое обследование проводилось методом собственных колебаний путем установки датчиков на подоконниках 2-го этажа вдоль фасадов, наблюдения повторены с интервалом в год при разных состояниях грунтов оснований (сухое и дождливое лето). По результатам обмеров и визуального обследования была составлена расчетная модель с определением частот и форм собственных колебаний (рис. 10).

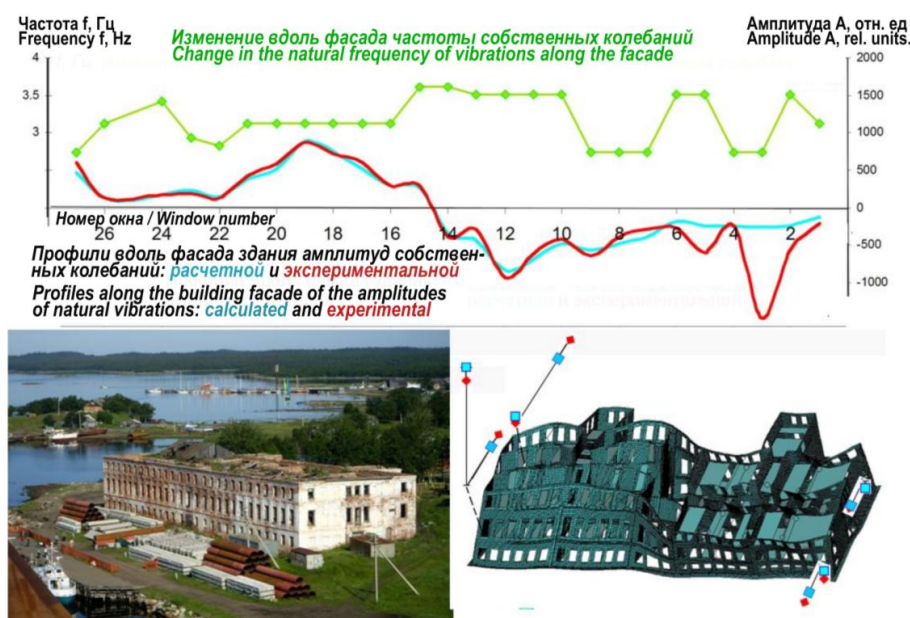


Рис. 10. Сейсмометрическое обследование Преображенской гостиницы на Соловках (фото), внизу – расчетная модель, сверху – профиль вдоль главного фасада значений расчетных и экспериментальных значений амплитуд собственных частот колебаний и экспериментально полученных частот /

Fig. 10. Seismometric survey of the Preobrazhenskaya Hotel on Solovki (photo), below is the calculation model, above is the profile along the main facade of the calculated and experimental values of the amplitudes of natural frequencies of oscillations and experimentally obtained frequencies

Обработка данных сейсмометрического обследования показала, что доминирующие значения собственных частот при измерениях в разных частях здания различаются (рис. 10, кривая значений частот вдоль фасада). Анализ результатов расчета для модели показал, что значения собственных частот разных форм близки. Мы наблюдаем суперпозицию разных форм колебаний, причем в зависимости от свойств блоков здания, доминирует по амплитуде та или иная форма, определяя тем самым, определяемое по записи значение собственной частоты. Учитывая это, было проведено сложение основных расчетных форм колебаний, в результате чего был получен расчетный профиль колебаний на собственных частотах, который сравнивался с экспериментальным (рис. 10).

Сравнение кривых показывает их хорошее совпадение, кроме отдельных точек, где, по-видимому, были плохие условия установки датчика (разбитый подоконник). По другой оси плана и по вертикали также получено совпадение значений (показано на модели рис. 10).

Результаты обследований с интервалом в год различаются мало, т.е. роль верхней части грунтового массива незначительна. Кроме того, внесение в модель трещин практически не повлияло на результат. Все это указывает на то, что собственные колебания отражают интегральные свойства НДС конструкций; с их помощью можно достаточно точно создать модель реального здания, пригодную, например, для реставрации, но нельзя отследить появление и развитие трещины. Этот вывод подтверждает и тот факт, что сейсмометрическое обследование бетонной арочной плотины Саяно-Шушенской ГЭС не выявило в картине колебаний присутствия деформационных швов [Еманов и др., 2002].

### Обсуждение результатов

Получение достоверной информации о сейсмостойкости существующей застройки является наиболее актуальной задачей, это в первую очередь касается жилищного фонда, сформированного из многоквартирных домов типовых серий 1960–1980-х гг. постройки. Известно, что именно экспериментальное исследование позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физической системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках.

Полученные инженерно-сейсмометрическими станциями записи поведения типовых зданий при сейсмических воздействиях, практически в той или иной мере учитывались при их возведении, поскольку данные сети располагались в новостройках, и представляют собой уникальный инструментальный материал, позволяющий производить сопоставление исходного состояния с их текущим состоянием.

Благодаря этому многое в поведении зданий и сооружений стало понятным. В этой связи необходимо отметить, что при сильнейшем землетрясении (Япония, 2011 г.) большинство жертв было обусловлено цунами.

### Выводы

После Ташкентского землетрясения 1966 г. в б. СССР в крупных городах и столицах союзных республик, расположенных в сейсмически опасных регионах, с 1970 г. организовывались инженерно-сейсмометрические станции, которые располагались в зданиях и сооружениях. Каждая сейсмограмма представляет собой уникальную запись реального воздействия на отдельные элементы и здания, в це-

лом. В качестве примера приведена запись Рачинского землетрясения 1991 года, полученная на крупнопанельном трехсекционном пятиэтажном жилом здании при 7-балльном проявлении, в г. Гори при Рачинском землетрясении от 29 апреля 1991 г. (Грузия). Станции работали в ждущем режиме, поскольку регистрация осуществлялась на кассеты с фотобумагой. Современные цифровые станции могут работать практически непрерывно, что исключает потерю информации.

Наиболее эффективным представляется объединение системы, регламентирующей мониторинг уникальных объектов, при котором регистрируются собственные колебания конструкций, с возможностью регистрации сильных сейсмических воздействий.

Анализ полученных результатов инструментального мониторинга современных строительных конструкций позволяет выявить наиболее важные особенности работы конструкций, не учитываемые в настоящее время Нормами.

Инженерно-сейсмометрические сети, которые можно рассматривать как геофизический метод контроля опасных природно-техногенных процессов на урбанизированных территориях, должны стать основой разработки научных и методологических основ комплексной оценки и выявления зон повышенной природно-техногенной опасности и рисков урбанизированных территорий (городов и населенных пунктов в составе агломераций, иных объектов градостроительной деятельности), расположенных в сейсмических зонах для повышения эффективности реализации задач комплексного устойчивого развития таких территорий.

### Литература

1. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М. Инженерно-сейсмометрические возможности при проведении реставрационных работ. // Труды 3-го Международного научно-практического симпозиума «Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси». Сергиев Посад, 2008. – С. 59–61.
2. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Рогожин Е.А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения. // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51. № 1. – С. 5–15.
3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П. Инженерно-сейсмологические исследования зданий и сооружений стоячими волнами. // Материалы восьмой международной конференции «Глубинное строение и геодинамика Фенноскандии, окраинных и внутриплатформенных транзитных зон». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2002. – С. 92–94.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
5. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Климов А.Н. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании. // Жилищное строительство. – 2013. – № 11. – С. 6–12.
6. Николаев С.В., Капустян Н.К., Кальчук В.Г. Опыт исследования ветровых и сейсмических нагрузок в условиях высотного строительства г. Москвы. // «Будівельні конструкції». Вып. 64. Киев: НДІБК, 2006. – С. 61–64.
7. Острцов А.В., Вознюк А.Б., Капустян Н.К. Опыт мониторинга конструкций и грунтов оснований высотных зданий в Москве. // Строительная наука и техника. – 2008. – № 5(20). – С. 99–101.
8. Острцов В.М., Гендельман Л.Б., Дыховичная Н.А., Вознюк А.Б., Болдырев С.С., Капустян Н.К. Опыт тестирования состояния конструкций высотных зданий методом ре-

гистрации собственных колебаний. // Железобетонные конструкции зданий большой этажности. М.: МГСУ, 2004. – С. 86–95.

9. Острцов В.М., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Капустян Н.К. Станция стационарного мониторинга высотного здания: оборудование и опыт эксплуатации. // Уникальные и специальные технологии в строительстве (UST-Build 2005). М.: Дом на Брестской, 2005. – С. 86–90.

10. Острцов В.М., Капустян Н.К., Вознюк А.Б. Мониторинг высотного 44-этажного жилого дома на Давыдовской улице. // «Технологии, машины, оборудование, материалы и нормативное обеспечение для подземного и высотного строительства». Т. 2. «Высотное строительство». М.: КДЦ «Гостиный двор», 2006. – С. 17–19.

11. Рекомендации по организации и эксплуатации станций инженерно-сейсмометрической службы (ИСС). М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1984. – 74 с.

12. Строительные нормы и правила «Строительство в сейсмических районах» СНиП II-7-81\* / Госстрой России. М.: ГУПЦПП, 2000. – 44 с.

13. Таракановский В.К., Капустян Н.К., Климов А.Н. Инструменты и возможности мониторинга процессов в грунтах основания высотных зданий в Москве. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2010. – № 6. – С. 551–562.

14. Чернов Ю.К. Об оценках спектров колебаний и спектральных характеристик грунтов для вероятностного анализа сейсмической опасности территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006.

15. Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 113–127. DOI:10.46698/VNC.2024.44.23.010.

16. Bektas N., Kegyes-Brassai O. Development in machine learning based rapid visual screening method for masonry buildings. In: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. / Eds. M.P. Limongelli, P.F. Giordano, S. Quqa, C. Gentile, A. Cigada. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – p. 411–421.

17. Domaneschi M., Sigurdardottir D., Glisic B. Damage detection on output-only monitoring of dynamic curvature in composite decks. // Structural Monitoring and Maintenance. – 2017. – Vol. 4. Issue 1. – pp. 1–15.

18. Mangalathu S., Sun H., Nweke C.C., Yi Z., Burton H.V. Classifying earthquake damage to buildings using machine learning. // Earthquake Spectra. – 2020. – Vol. 36. – pp. 183–208. DOI: 10.1177/8755.

19. Zaalishvili V. Strong motion in absorbing nonlinear medium and problems of their registration. Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures. In: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Istanbul, 2001. – pp. 611–621.

20. Zaalishvili V., Timchenko I., Kacharava V., Zaalishvili Z. Strong motion instrumentation for structures of civil engineering and economical aspects of planning of territory of big cities. Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures. In: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Istanbul, 2001. – pp. 599–612.

## References

1. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Basakina I. M. Engineering and seismometric capabilities in carrying out restoration work. In: Proc. of the 3rd Int. Scientific and Practical Symp. “Natural conditions for the construction and preservation of Churches of Orthodox Russia”. Sergiev Posad. 2008. pp. 59–61. (In Russ.)
2. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Rogozhin E. A. Seismic monitoring of industrial facilities: problems and solutions. Seismic Instruments. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 5–15. (In Russ.)
3. Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A., Danilov I.A., Kuzmenko A.P. Engineering and seismological studies of buildings and structures by standing waves. In: Proc. of the Eighth Int. Conf. “Deep structure and geodynamics of Fennoscandia, marginal and intraplateau transit zones”. 2002. pp. 92–94. (In Russ.)



4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (In Russ.)
5. Kapustyan N.K., Antonovskaya G.N., Klimov A.N. High-rise buildings: monitoring experience and ways of using it in design. *Housing Construction*. 2013. No. 11. pp. 6–12. (In Russ.)
6. Nikolaev S.V., Kapustyan N.K., Kalchuk V.G. Experience in studying wind and seismic loads in high-rise construction conditions in Moscow. In: “Budyvelni konstruktsii”. Issue 64. Kiev. NDIBK. 2006. pp. 61–64. (In Russ.)
7. Ostretsov A.V., Voznyuk A.B., Kapustyan N.K. Experience in monitoring structures and soils of the foundations of high-rise buildings in Moscow. *Construction Science and Technology*. 2008. No. 5(20). pp. 99–101. (In Russ.)
8. Ostretsov V.M., Gendelman L.B., Dykhovichnaya N.A., Voznyuk A.B., Boldyrev S.S., Kapustyan N.K. Experience in testing the state of high-rise building structures by recording natural vibrations. In “Reinforced Concrete Structures of High-Rise Buildings”. Moscow. MGSU. 2004. pp. 86–95. (In Russ.)
9. Ostretsov V.M., Gendelman L.B., Voznyuk A.B., Kapustyan N.K. Stationary monitoring station for a high-rise building: equipment and operating experience. In: *Unique and Special Technologies in Construction (UST-Build 2005)*. Moscow. Dom na Brestskoy. 2005. pp. 86–90. (In Russ.)
10. Ostretsov V.M., Kapustyan N.K., Voznyuk A.B. Monitoring of a high-rise 44-story residential building on Davydovskaya street. “Technologies, Machines, Equipment, Materials, and Regulatory Support for Underground and High-Rise Construction.” Vol. 2 “High-Rise Construction”. Moscow. Gostiny Dvor. 2006. pp. 17–19. (In Russ.)
11. Recommendations for the Organization and Operation of Seismometric Service Stations (ISS). Moscow. Kucherenko Central Research Institute of Steel Structures. 1984. 74 p.
12. Building Codes and Regulations “Construction in Seismic Areas” SNiP II-7-81\*. Gosstroy of Russia. Moscow. GUPTsPP. 2000. 44 p. (In Russ.)
13. Tarakanovsky V.K., Kapustyan N.K., Klimov A.N. Tools and capabilities for monitoring processes in the foundation soils of high-rise buildings in Moscow. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2010. No. 6. pp. 551–562.
14. Chernov Yu.K. On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006. (In Russ.)
15. Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. 14. No. 4. pp. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010. (In Russ.)
16. Bektas N., Kegyes-Brassai O. Development in machine learning based rapid visual screening method for masonry buildings. In: *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*. Eds. M.P. Limongelli, P.F. Giordano, S. Quqa, C. Gentile, A. Cigada. Cham. Springer Nature Switzerland. 2023. p. 411–421.
17. Domaneschi M., Sigurdardottir D., Glisic B. Damage detection on output-only monitoring of dynamic curvature in composite decks. *Structural Monitoring and Maintenance*. 2017. Vol. 4. Issue 1. pp. 1–15.
18. Mangalathu S., Sun H., Nweke C.C., Yi Z., Burton H.V. Classifying earthquake damage to buildings using machine learning. *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. pp. 183–208. DOI: 10.1177/8755.
19. Zaalishvili V. Strong motion in absorbing nonlinear medium and problems of their registration. Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures. In: *Kluwer Academic Publishers*. Printed in the Netherlands. Istanbul. 2001. pp. 611–621.
20. Zaalishvili V., Timchenko I., Kacharava V., Zaalishvili Z. Strong motion instrumentation for structures of civil engineering and economical aspects of planning of territory of big cities. Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures. In: *Kluwer Academic Publishers*. Printed in the Netherlands. Istanbul. 2001. pp. 599–612.

УДК 551.24

DOI: 10.46698/e0666-8690-8412-z

Оригинальная статья

## Активная тектоника Даргавской и Фиагдонской котловин в Северной Осетии

А.Н. Овсяченко<sup>1,2</sup>, Е.Д. Едемский<sup>3</sup>, А.М. Корженков<sup>1</sup>,  
В.Б. Заалишвили<sup>2,4</sup>, А.С. Ларьков<sup>1</sup>, А.А. Аверин<sup>3</sup>, Ю.В. Бутанаев<sup>5</sup>,  
Н.Г. Кошевой<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва,  
ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: ovs@ifz.ru;

<sup>2</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,  
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а;

<sup>3</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4;

<sup>4</sup> Центральный научно-исследовательский и проектный институт  
Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской  
Федерации, Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29;

<sup>5</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
Россия, 667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а

Статья поступила: 10.10.2025, доработана: 27.11.2025, принята к публикации: 01.12.2025

**Резюме:** Актуальность работы определяется назревшей необходимостью разработки принципиально новой сейсмотектонической модели Большого Кавказа, в содержание которой, помимо пространственных параметров и сейсмического потенциала зон возможных очагов землетрясений, должны войти повторяемость землетрясений с  $M_{\max}$  и кинематика прогнозных смещений в очаге на основе прямых данных. **Цель работы** заключается в детальном изучении очаговых зон сильных землетрясений Северо-Юрской депрессии. **Методы исследования:** методы палео-, археосейсмологии, георадарное профилирование, сориентированные на получение конкретных параметров очагов палео- и исторических землетрясений. Эти методы позволяют подойти к проблеме реконструкции долговременного сейсмического режима на основе прямых данных о возрасте и масштабах проявления конкретных сейсмических событий за представительный интервал времени. **Результаты работы.** Собраны прямые данные о пространственном положении, возрасте, кинематике и величине сейсмотектонических подвижек по молодым тектоническим разрывам Даргавской и Фиагдонской котловин, которые представляют собой первичный материал для построения сейсмотектонической модели Северо-Юрской депрессии, как крупнейшей сейсмогенерирующей структуры. Тесная взаимосвязь древних селений с активными разломами позволяет использовать их в качестве надежных маркеров для определения возраста и величины молодых одноактных смещений. Установлена разломная природа обрыва Скалистого хребта. В пределах Даргавской и Фиагдонской котловин продольные разрывы образуют три основных системы с разной кинематикой смещений. По данным о параметрах сейсмотектонических подвижек по отдельным разрывам, в историческое время здесь происходили сильные землетрясения с  $M=6.5-6.8$  (Средняя и Южная системы) и  $M=6.8-7.2$  (Северная). Интервал повторяемости сильных землетрясений по разным данным составляет 250–500 лет. Определенная прямыми методами доминирующая правосторонняя взбросо-сдвиговая кинематика смещений для разломных систем Северо-Юрской депрессии соответствует сейсмологическим и геодезическим данным.

**Ключевые слова:** Большой Кавказ, Северная Осетия, оценка сейсмической опасности, активные разломы, палеосейсмология, археосейсмология.

**Благодарности:** Научная программа выполнена по Государственному заданию ГФИ ВЦ РАН и ИФЗ РАН. Георадарные исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00083-П.

**Для цитирования:** Овсяченко А.Н., Едемский Е.Д., Корженков А.М., Заалишвили В.Б., Ларьков А.С., Аверин А.А., Бутанаев Ю.В., Кошевой Н.Г. Активная тектоника Даргавской и Фиагдонской котловин в Северной Осетии. *Геология и геофизика Юга России*. 15(4): 78–96. DOI: 10.46698/e0666-8690-8412-z

## GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/e0666-8690-8412-z

Original paper

## Active tectonics of the Dargavs and Fiagdon basins in North Ossetia

A.N. Ovsyuchenko<sup>1,2</sup>, E.D. Edemsky<sup>3</sup>, A.M. Korzhenkov<sup>1</sup>,  
V.B. Zaalishvili<sup>2,4</sup>, A.S. Larkov<sup>1</sup>, A.A. Averin<sup>5</sup>, Yu.V. Butanayev<sup>5</sup>,  
N.G. Koshevoy<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Geophysical institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation;

<sup>3</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,  
Russian Academy of Sciences, 4 Kaluzhskoe highway, Moscow,  
Troitsk 108840, Russian Federation;

<sup>4</sup> Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing  
and Communal Services of the Russian Federation, 29 Vernadskogo Pr., Moscow 119331,  
Russian Federation;

<sup>5</sup> Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, 117a Internatsionalnaya Str., Kyzyl 667007,  
Russian Federation

Received: 10.10.2025, revised: 27.11.2025, accepted: 01.12.2025

**Abstract:** The relevance of this work is determined by the urgent need to develop a fundamentally new seismotectonic model of the Greater Caucasus. This model, in addition to spatial parameters and the seismic potential of potential earthquake source zones, should include the recurrence of Mmax earthquakes and the kinematics of predicted source displacements based on direct data. **The aim** of the work is to conduct a detailed study of the source zones of strong earthquakes in the North Jurassic Depression. **Research methods:** paleoseismology, and ground-penetrating radar profiling, aimed at obtaining specific source parameters of paleo- and historical earthquakes. These methods allow us to approach the problem of reconstructing long-term seismic regimes based on straight data on the age and scale of seismic events over a representative time interval. **Results.** Straight data on the age, kinematics and values of seismotectonic offsets along young tectonic faults of the Dargavs and Fiagdon basins were collected. This data represent the primary material for constructing a seismotectonic model of the North Jurassic Depression, as the largest seismic source. The close relationship between ancient settlements and active faults allows them to be used as reliable markers for determining the age and offset of seismic ruptures. The fault nature of the Skalisty Ridge scarp has been

established. Within the Dargavs and Fiagdon basins, longitudinal faults form three main systems with different rupture kinematics. According to seismic rupture parameters along individual faults, strong earthquakes with magnitudes of 6.5–6.8 (Middle and Southern systems) and 6.8–7.2 (Northern) occurred here in historical times. The recurrence interval of strong earthquakes, according to various sources, is 250–500 years. The dominant dextral reverse-slip kinematics determined for the fault systems of the North Jurassic Depression corresponds to seismological and geodetic data.

**Keywords:** Greater Caucasus, Northern Ossetia, seismic hazard assessment, active faults, paleoseismology, archeoseismology.

**Acknowledgements:** *The scientific program was carried out according to the State assignment of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Georadar studies were carried out with the support of a grant from the Russian National Science Foundation No. 22-12-00083-П.*

**For citation:** Ovsyuchenko A.N., Edemsky E.D., Korzhenkov A.M., Zaalishvili V.B., Larkov A.S., Averin A.A., Butanayev Yu.V., Koshevoy N.G. Active tectonics of the Dargavs and Fiagdon basins in North Ossetia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 15(4): 78–96. DOI: 10.46698/e0666-8690-8412-z

## Введение

В широкой полосе между высокогорьем Большого Кавказа и Предкавказским передовым прогибом в позднем плиоцене оформились чешуйчато-надвиговая моноклиналь Северного крыла и, расположенная к югу от него, Северо-Юрская депрессия [Милановский, 1968]. По данным спутниковой геодезии скорость современного горизонтального сокращения здесь составляет 1–2 мм/год [Милюков и др., 2018]. При этом на инструментальном этапе сейсмологических наблюдений эта активная тектоническая структура проявила умеренный уровень сейсмической активности [Рогожин и др., 2014; Vorobieva et al., 2023]. Однако, о более сильных землетрясениях, неоднократно происходивших здесь на протяжении голоцена, свидетельствуют результаты палео-, архео- и историко-сейсмологических исследований [Никитин и др., 1993; Рогожин и др., 2005; 2014; Корженков и др., 2023; 2025; Овсюченко и др., 2024].

В последние годы нами проводятся детальные исследования активных тектонических структур, направленные на разработку детальной сеймотектонической модели Большого Кавказа в целях оценки сейсмической опасности. Общеизвестно, что землетрясение представляет собой результат импульсного смещения участков земной коры по активному разлому, поэтому каркас сеймотектонической модели образуют активные тектонические структуры. Статья посвящена результатам детальных исследований активных тектонических структур Даргавской и Фиагдонской котловин в Северной Осетии.

## Методы исследований

Определение активных разломов, как структур, по которым происходили тектонические смещения на протяжении позднего плейстоцена – голоцена, т.е. последних 100–130 тыс. лет [Trifonov, 2004], предопределяет методические принципы их исследования – выявление и детальное изучение деформаций форм рельефа и отложений соответствующего возраста. Наиболее предпочтительными для детальных исследований являются поверхности накопления слоистых позднелейстоцен-голоценовых отложений, маркирующих собой опорные уровни, используемые для возрастной привязки деформаций. В целях изучения активной



тектоники также исследуются разнообразные молодые формы рельефа. Использование геоморфологических методов в таких исследованиях выполнено в русле структурно-геоморфологического подхода или тектонической геоморфологии [Флоренсов, 1978; Burbank, Anderson, 2012]. Полевые исследования проводились с использованием палеосейсмологического подхода. Основная задача – выявление и прослеживание одноактных и разновозрастных сеймотектонических уступов, рвов и валов в разновозрастных формах рельефа, включая проходку горных выработок для изучения нарушений в молодых отложениях [Солоненко, 1973; McCalpin, 2009]. По отношению к сейсмическому очагу такие нарушения являются первичными, т.е. представляют собой выход очага землетрясения на поверхность. Поэтому исследования были нацелены на определение величины и кинематики одноактной подвижки, которые напрямую связаны с магнитудой землетрясения [Wells, Coppersmith, 1994 и др.]. Кроме молодых форм рельефа и отложений важными хронологическими маркерами являются разнообразные памятники человеческой деятельности, позволяющие выявлять и датировать самые молодые тектонические деформации.

Разрезы молодых отложений на всех выявленных активных разломах изучены методом георадарного профилирования, георадаром повышенной мощности «ЛЮЗА-В» [Berkut et al., 2017], который применяется для решения различных задач в области геологии, археологии, мерзлотоведения и т.д. Амплитуда зондирующего импульса составляет 5 кВ, а ширина импульса 7–10 нс. Антенна с центральной частотой 50 МГц способна обеспечивать глубину зондирования порядка 20–25 м при разрешающей способности  $\sim 0.5$  м. Обработка георадарных данных включала в себя подбор коэффициента усиления сигнала, применение полосовой фильтрации сигнала и функции усреднения, а также отображение результатов в виде функции амплитуды или производной волновой формы принятого сигнала. Для преобразования георадарных разрезов из временного масштаба в масштаб глубин и оценки глубины залегания отдельных элементов разреза, применена усредненная скорость распространения электромагнитной волны  $V = 0.12$  м/нс, которая получена методом общей глубинной точки, а также в результате анализа георадарных профилей, отражений зондирующего импульса от локальных объектов. При анализе и локализации разрывов в молодых отложениях использованы такие основные признаки, как: разрывы осей синфазности с их смещением или изменением угла наклона; образование дифрагированных волн по линии разрыва; формирование локальных зон профиля с изменением волновой текстуры отражений по линии разрыва [Едемский, Прокопович, 2024].

### Результаты исследований

В днище и бортах Даргавской и Фиагдонской котловин прослежены зоны прямолинейных уступов, валов и ложбин, имеющих разное простирание и кинематику смещений, которые можно объединить в 4 основные системы: Северную, Среднюю, Южную и Субмеридиональную (рис. 1). Первые три ветви вытянуты вдоль простирания основных морфоструктур – Скалистого хр. и Северо-Юрской депрессии. 4-я ветвь (Субмеридиональная) имеет поперечную ориентировку и вытянута на коротком отрезке вдоль правого борта долины р. Гизельдон.

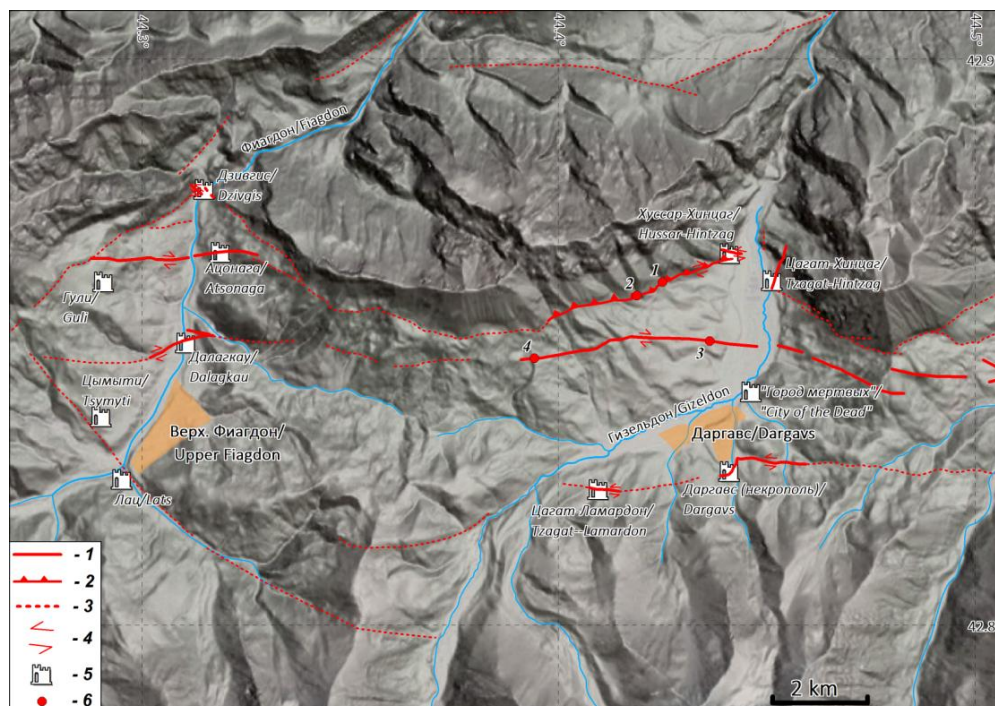


Рис. 1. Схема активных разломов Даргавской и Фиагдонской котловин.

1, 2 – сейсмостектонические разрывы, изученные в молодых отложениях, формах рельефа и архитектурных памятниках древности (1 – сдвиги; 2 – взбросо-сдвиги, бергштрихи указывают направление падения сместителя); 3 – активные разрывы по структурно-геоморфологическим и дистанционным данным; 4 – направление горизонтального смещения по разрывам; 5 – изученные древние поселения со следами землетрясений; 6 – точки наблюдения, описываемые в тексте /

Fig. 1. Scheme of the Dargavs and Fiagdon basin.

1, 2 – active faults studied in young deposits, relief forms and ancient architectural sites (1 – strike-slip faults; 2 – oblique-slip faults); 3 – active faults by structural-geomorphological and remote sensing data; 4 – direction of horizontal displacement along faults; 5 – studied ancient settlements with evidences of earthquakes; 6 – observation points described in the text

Северная ветвь нарушений образует ярко выраженную северную границу котловины с моноклиналью Северного крыла, представленную грандиозным обрывом Скалистого хребта, в котором обнажены позднеюрско–меловые массивные известняки и доломиты. Вдоль подножия обрыва почти сплошной полосой протягивается мощный шлейф коллювиально–оползневых накоплений, скрывающий зону разлома, формирующую обрыв Скалистого хребта. Простираение системы нарушений меняется в противоположных бортах долины р. Гизельдон с СВ на СЗ, что отражает общее падение субширотной разломной зоны в северном направлении.

В западном (левом) борту долины р. Гизельдон прослежен правосторонний взбросо-сдвиг ВСВ простираения. Долины ручьев по нему смещены вправо на 15–20 м (рис. 2, а). Разлом представлен зоной брекчирования, вдоль которой скальный борт долины временного водотока был срезан и выдвинут в горизонтальном направлении на 18–20 м, образовав отвесный скальный обрыв высотой до 25 м. Основная плоскость смещения имеет крутое (70–80°) падение в СЗ направлении (310–320°) (рис. 2, с). Борозды скольжения имеют средний наклон к горизонту 40–50°, что говорит о равном вкладе горизонтальной и вертикальной компонент смещений. Самая молодая, последняя генерация плоскости смещения отличается очень хорошей сохранностью – она покрыта единичными лишайниками и карсто-



выми кавернами (рис. 2, d). Размеры плоскости смещения последней генерации, по всей видимости, соответствуют величине одноактной подвижки – 1–1.5 м.

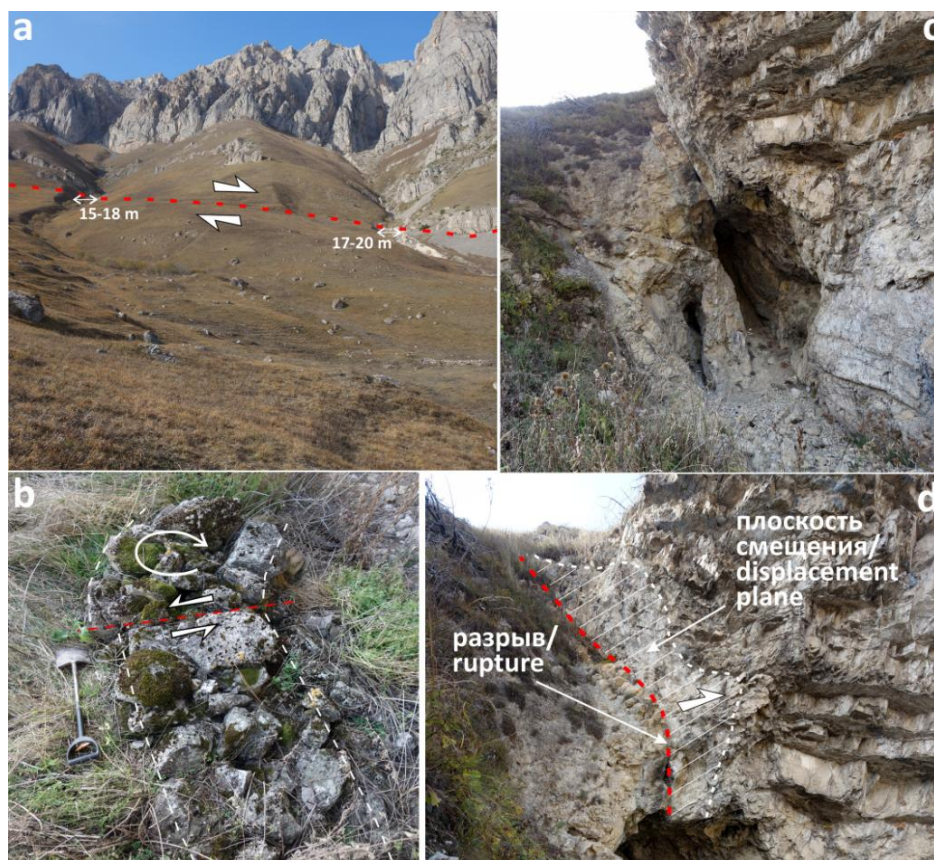


Рис. 2. Смещения и приразломные деформации по разлому в подножии главного обрыва Скалистого хребта. а – сдвиг долин ручьев в т. 2 на рис. 1, б – разрыв, разворот и увеличение толщины фрагмента стены древней постройки возле разлома в результате приразломного сжатия, т. 1 на рис. 1, с – общий вид разлома в разрезе, т. 1 на рис. 1, д – последняя генерация плоскости смещения, т. 1 на рис. 1 /

Fig. 2. Displacements and near-fault deformations along the fault at the foot of the main scarp of the Scalisty Ridge. a – offset of stream valleys, point 2 in Fig. 1, b – offset, rotation and increase in thickness of a wall fragment of an ancient building near a rupture as a result of near-fault compression, point 1 in Fig. 1, c – general view of the fault in section, point 1 in Fig. 1, d – latest generation of the displacement plane, point 1 in Fig. 1

Кроме смещения позднеголоценовых форм рельефа, о молодом возрасте последней подвижки свидетельствуют деформации стен прямоугольного древнего (скорее всего средневекового) строения, расположенные в 2–4 м от разрыва (рис. 2, b). Стены испытали продольное сдавливание с увеличением толщины и разворот ближайшего к разрыву фрагмента стены по часовой стрелке вдоль короткого оперяющего левого сдвига (простираение 310–320°). По всей видимости, деформации имеют сейсмотектоническую природу и образовались в непосредственной близости от очага землетрясения, вышедшего на поверхность. Продольное сжатие стен, ориентированное вдоль разрыва, может свидетельствовать о существенной горизонтальной компоненте смещений по разрыву.

В районе выхода главного обрыва Скалистого хребта к днищу долины р. Гизельдон, в её левом борту выявлен короткий (прослеженная длина около 400 м) левый сдвиг ЗСЗ простираения. В селении Хуссар-Хинцаг, сохранившиеся по-

стройки которого датируются периодом с эпохи средневековья до нового времени [Свод ..., 2021], разрыв представлен горизонтальными смещениями стен в среднем на 30–40 см (подробнее см.: [Корженков и др., 2025]). Левый сдвиг стены-крепиды на 1.2 м, также ориентированный в СЗ направлении, наблюдался на некрополе древнего селения-крепости Дзивгис [Корженков и др., 2023].

К Северной ветви также относится правый сдвиг субширотного (ЗСЗ) простирания, по которому детально изучены разновозрастные смещения древней дороги и стен селения Ацонага, произошедшие за последние 600–700 лет [Овсяченко и др., 2024]. Величина предпоследней подвижки – 0.9–1.1 м; последней – 0.6–0.8 м. Правый сдвиг 1-ой надпойменной террасы долины р. Фиагдон по этому разрыву составляет 8–11 м.

Средняя ветвь в бортах долины р. Гизельдон представлена системой тектонических валов и уступов субширотного простирания. В нижней части долины р. Гизельдон 1-ая надпойменная терраса на пересечении с системой нарушений деформирована – в южном крыле она расположена ниже на 5–6 м (рис. 3). Выше по склону уступ полностью сглажен самыми поздними сельскохозяйственными террасами, но сечет более древние. Здесь наблюдается кулисообразная система валообразных уступов ВСВ простирания высотой до 2 м и субширотных ложбин ЗСЗ ориентировки длиной в первые сотни м. Валы задирают участок древних сельскохозяйственных террас, прилегающий к уступу (рис. 4, б). Нарушения сопровождаются цепочками родников и обильной, густой травянистой растительностью, контрастирующей с соседними склонами. В приводораздельной части склона правосторонние смещения прослеживаются по сдвигам на 17–20 м мелких долин и гребней водоразделов (рис. 4, а). В покровном чехле четвертичных отложений с этими ложбинами связаны грабены шириной в первые метры.

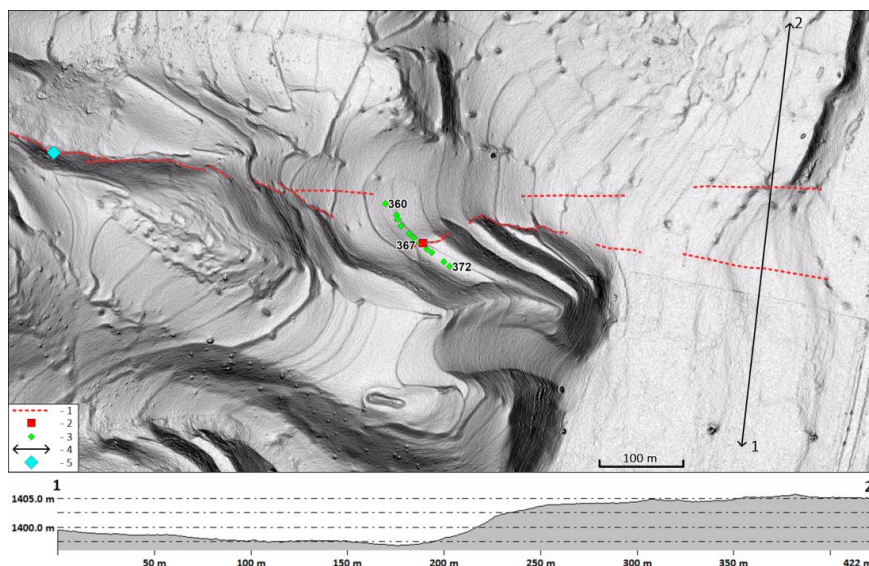


Рис. 3. Цифровая модель рельефа левого борта долины р. Гизельдон, т. 3 на рис. 1.

Внизу гипсометрический профиль поверхности 1-ой надпойменной террасы.

1 – система тектонических валов и уступов; 2 – канава; 3 – точки георадарного профиля;  
4 – положение гипсометрического профиля; 5 – источник /

Fig. 3. Digital elevation model of the left side of the Gizeldon River valley, point 3 in Fig. 1.

At the bottom is a hypsometric profile of the surface of the first floodplain terrace.

1 – system of tectonic ridges and scarps; 2 – trench; 3 – points of the ground penetrating radar profile;  
4 – position of the hypsometric profile; 5 – spring



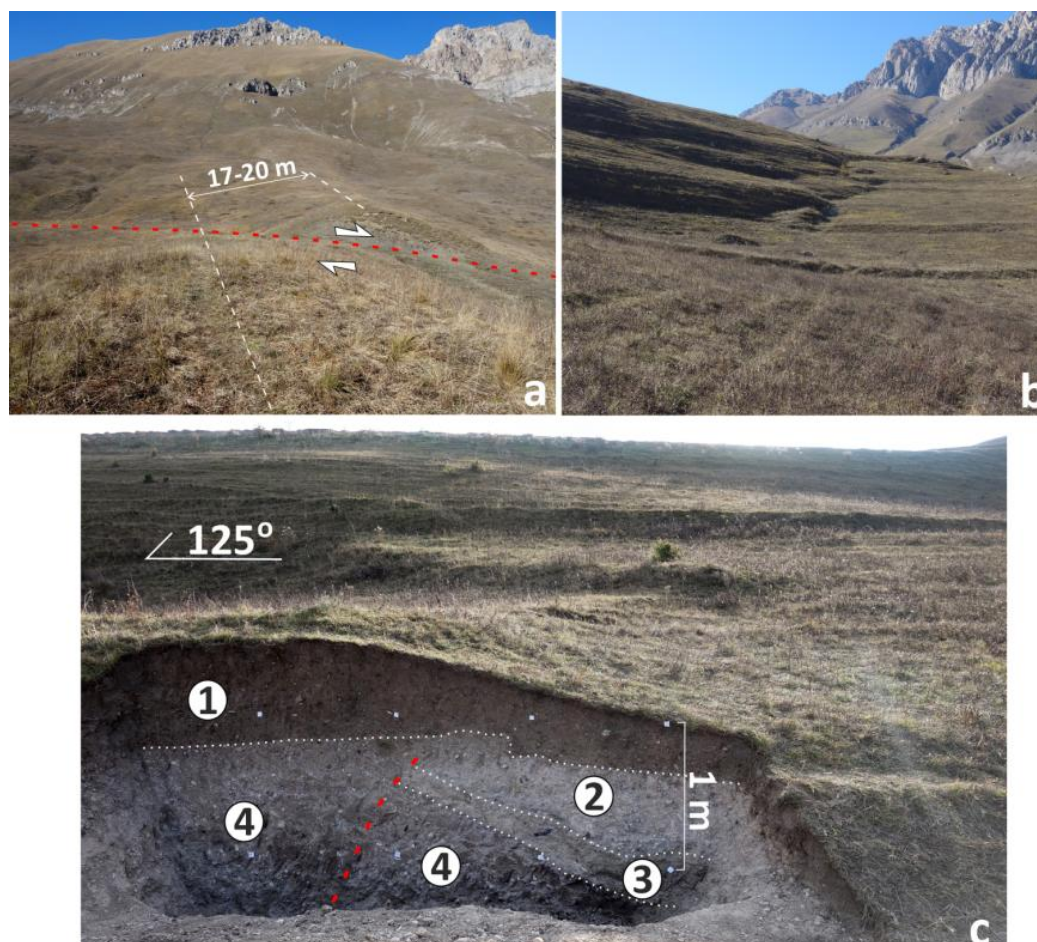


Рис. 4. Тектонические деформации в левом борту долины р. Гизельдон.  
 а – сдвиг гребня в т. 4 на рис. 1, б – валообразный уступ, секущий поверхность ранних сельскохозяйственных террас, т. 3 на рис. 1, с – разрез валообразного уступа в стенке канавы, т. 3 на рис. 1: 1 – современный степной чернозем с редким щебнем и дресвой; 2 – массивные, крепкие лессовидные суглинки с щебнем, дресвой и трубкообразными каналами, заполненными белым известковым порошком; 3 – известняковый щебень с известняковой крошкой (до 40 %) (обвал); 4 – светло-серые суглинки (до 60 %) с грубо окатанным щебнем и дресвой (пролювий) /

Fig. 4. Tectonic deformations on the left side of the Gizeldon River valley.  
 a – ridge offset at point 4 in Fig. 1, b – swell-shaped scarp cutting the surface of early agricultural terraces, point 3 in Fig. 1, c – section of the swell-shaped scarp in the wall of the trench, point 3 in Fig. 1: 1 – modern steppe chernozem; 2 – massive, strong loess with crushed stones and tubular channels; 3 – limestone crushed stones with limestone crushes (up to 40 %) (avalanche); 4 – light gray clay loam (up to 60 %) with coarsely rounded crushed stones (proluvium)

Строение вала сжатия ВСВ простирания ( $65\text{--}75^\circ$ ) изучено в специальной пройденной канаве, где вскрыт пологий надвиг (угол падения  $15\text{--}20^\circ$ ), соответствующий уступу на поверхности сельскохозяйственной террасы (рис. 4, с). Вдоль разрыва склоновые суглинки надвинуты на обвальные отложения и образуют ступень (вертикальное смещение на 20–25 см) в основании современного степного чернозема. На георадарном разрезе вала сжатия соответствует разрыв с валообразным воздыманием границ георадарных комплексов, проникающий в самые верхние слои разреза (рис. 5).

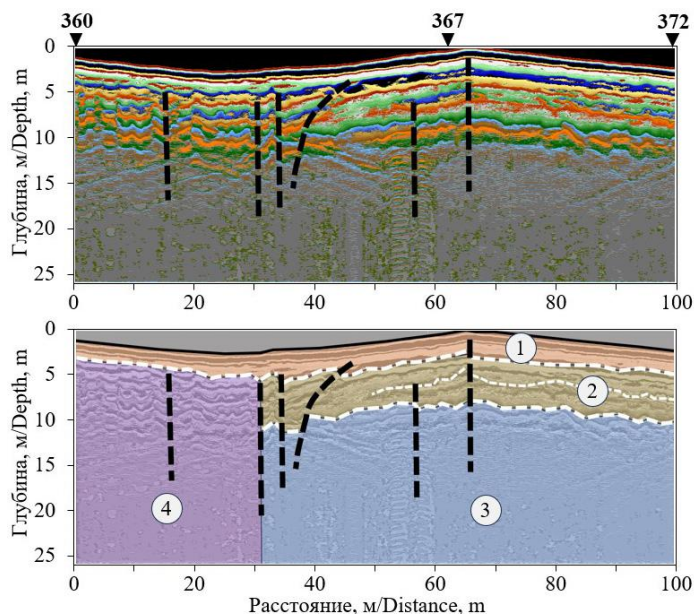


Рис. 5. Георадарный профиль 360-372, положение на рис. 4. 1, 2, 3, 4 – георадарные комплексы. Черные штриховые линии – разломы /  
Fig. 5. Ground penetrating radar profile 360-372, position in Fig. 4. 1, 2, 3, 4 – ground penetrating radar complexes. Black dashed lines – faults

В Фиагдонской котловине Средняя ветвь изучена в днище долины, в районе древнего селения Даллагкау (Барзикау) (рис. 6).

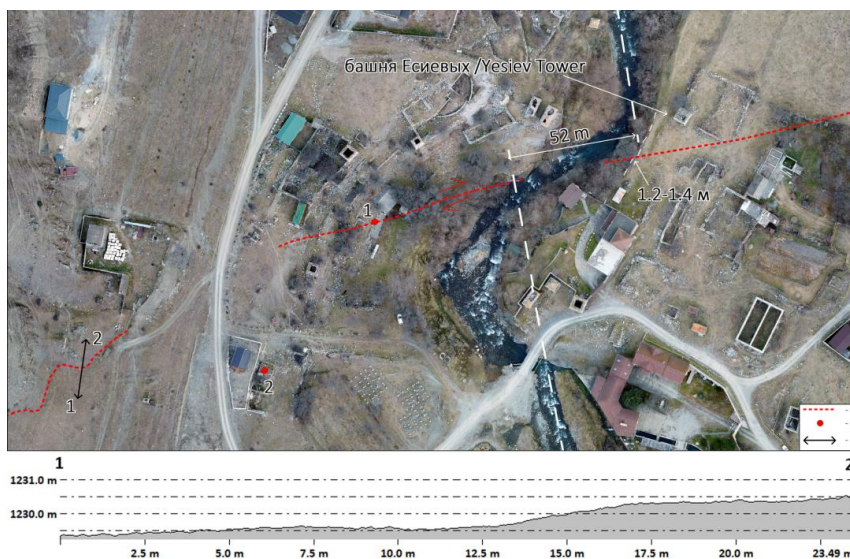


Рис. 6. Фотоплан днища долины р. Фиагдон в центральной части древнего селения Даллагкау (Барзикау). Внизу гипсометрический профиль поверхности 2-ой надпойменной террасы на пересечении с тектоническим уступом.  
1 – система тектонических ложбин и уступов; 2 – точки;  
3 – положение гипсометрического профиля /

Fig. 6. Plan of the bottom of the Fiagdon River valley in the central part of the ancient settlement of Dallagkau (Barzikau). At the bottom is a hypsometric profile of the surface of the second floodplain terrace.

1 – system of tectonic hollows and scarps; 2 – points; 3 – position of the hypsometric profile

На гребне водораздела к СВ от селения в юрских сланцах наблюдается асимметричная приразломная антиклиналь, крутое крыло которой подорвано серией взбросо-надвигов. В русловом врезе р. Фиагдон в северном крыле наблюдается выступ смятых в приразломную антиклиналь юрских сланцев, резко погружающихся под аллювиальные наносы в южном крыле. Общее правостороннее смещение таль-



вега долины р. Фиагдон достигает 52 м. Бровка уступа 1-ой надпойменной террасы смещена вправо на 1.2–1.4 м.

В древнем селении Даллагкау вдоль разрыва полностью разрушен угол здания (ганаха), примыкавшего к башне Есиевых [Тменов, 1984]. Внутренняя стена этого здания испытала сильные винтообразные изгибы с разрывом сплошности (рис. 7, с). Это свидетельствует о сжатии, ориентированном близко к простиранию стены с утратой целостности конструкции. Внутренние углы стен постройки испытали неравномерную плановую деформацию – сжатие в ЮВ углу, разрушенном вдоль разрыва, и растяжение в противоположном (СЗ) (рис. 7, а). В ЮВ части угол между стенами оказался на  $18^\circ$  меньше противоположного (СЗ). В итоге, стены постройки демонстрируют неравномерную сохранность – восточная и северная стены сохранились гораздо лучше западной и южной, а внутренняя стена испытала сильные деформации сжатия. Видимо, плановую деформацию испытала и башня, приобретая ромбовидную в плане форму. Кроме того, башня испытала направленное обрушение – её северная часть сохранилась на значительно меньшую высоту с отлетом камней в СВ направлении до 9 м в горизонтальном направлении (рис. 7, b).



Рис. 7. Сейсмотектонические деформации построек древнего селения Даллагкау (Барзикау).  
а – план башни Есиевых и прилегающей постройки, б – общий вид башни Есиевых с севера,  
с – винтообразные изгибы с разрывом сплошности внутренней стены здания, примыкающего к  
башне Есиевых, d – смещение стены в центральной части селения Даллагкау, т. 1 на рис. 6 /  
Fig. 7. Seismotectonic deformations of the buildings of the ancient settlement of Dallagkau (Barzikau).  
a – plan of the Yesiev Tower and adjacent building, b – general view of the Yesiev Tower from the north,  
c – spiral bends with a break in the integrity of the internal wall of the building adjacent to the Yesiev  
Tower, d – displacement of the wall in the central part of the Dallagkau settlement, point 1 in Fig. 6.

В левом борту Фиагдона разрыв прослеживается в стенах древней постройки, включенной в конструкцию загона для скота возле относительно недавно заброшенного дома. Здесь, в нижней части стены наблюдается правый сдвиг со смеще-

нием на 0.4 м (рис. 7, d). После подвижки стена была отремонтирована в верхней части и включена в новую конструкцию.

Выше по склону, на незастроенном участке с ненарушенной дневной поверхностью, на простирации разрыва прослеживается извилистый уступ высотой 0.8–1 м (рис. 8).

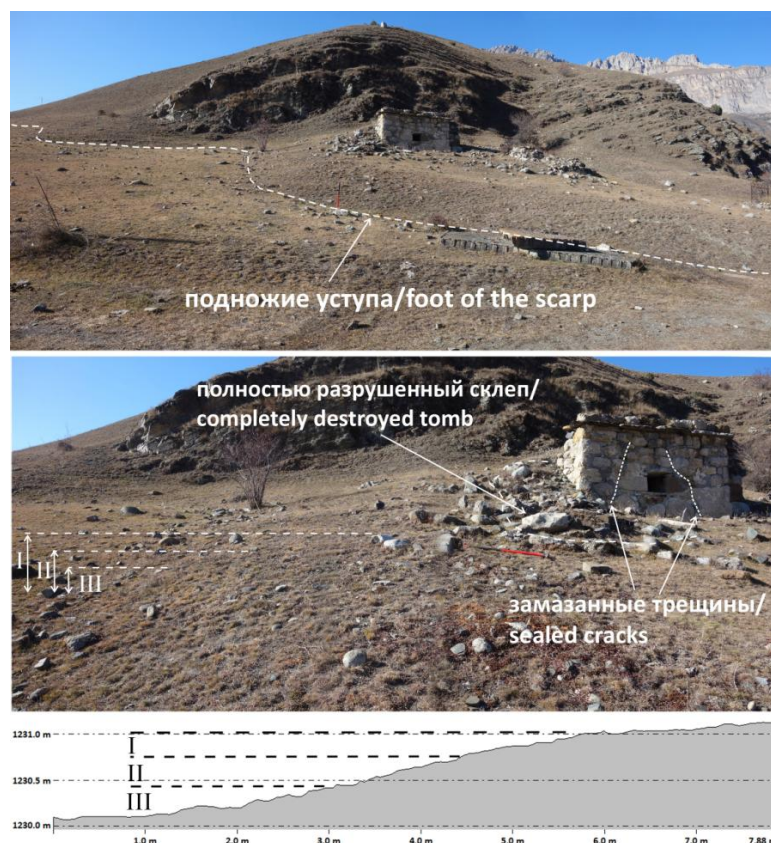


Рис. 8. Сейсмотектонический уступ на западной окраине древнего селения Даллагкау (Барзикау), профиль 1–2 на рис. 6. Римскими цифрами показаны разновозрастные уступы /

Fig. 8. Seismotectonic scarps on the western edge of the ancient settlement of Dallagkau (Barzikau), profile 1–2 in Fig. 6. Roman numerals indicate scarps of different ages

Микрорельеф участка сохранился ненарушенным благодаря расположенному здесь склепу. Морфология уступа свидетельствует о сдвиго-взбросовой кинематике смещений. На склоне уступа выделяются три участка примерно одинаковой высоты (0.25–0.3 м), но с разной крутизной (12°, 10° и 7°). Ступенчатый или ломаный профиль тектонического уступа указывает на сейсмотектоническую дискретность вертикального смещения, при которой крутизна соответствующей части склона уступа напрямую зависит от длительности его разрушения экзогенными процессами, т.е. возраста подвижки. При одинаковой высоте уступов наиболее молодым из них будет тот, чья поверхность круче. Морфология уступа может свидетельствовать о его трехактном подрастании в результате трех подвижек. Об импульсном характере образования уступа также может свидетельствовать резко различная сохранность склепов в его поднятом крыле. Если более древний склеп у бровки уступа оказался полностью разрушен (сохранились только фрагменты стен на 1–2 камня в высоту), то более поздний склеп нарушен двумя замазанными цементом трещинами, по которым произошло незначительное проседание центральной части. Ниже



по склону от уступа башня Гайтовых [Тменов, 1984], сохранившаяся на высоту до 2.5 м, оказалась погребена примерно на 2 м осыпью песчано-глыбового материала, слагающего надпойменные террасы, что может свидетельствовать о её резком опускании в прошлом в опущенном крыле разрыва (т. 2 на рис. 6).

**Южная ветвь** изучена в заброшенном селении Цагат-Ламардон, на окраине с. Даргавс и в районе заброшенных селений Верх. и Ниж. Кора. В селении Цагат-Ламардон обнаружены левые сдвиги стен, которым по данным георадиолокационного профилирования, соответствует разломная зона, проникающая в самые молодые отложения (рис. 9). Величина левого сдвига стен вдоль разрыва меняется от 1.5–1.7 до 0.4–0.5 м. Основной сдвиг ЗСЗ простирания сопровождается опережающим сбросом СЗ простирания, выраженным вертикальными смещениями в молодых отложениях (рис. 9, с).

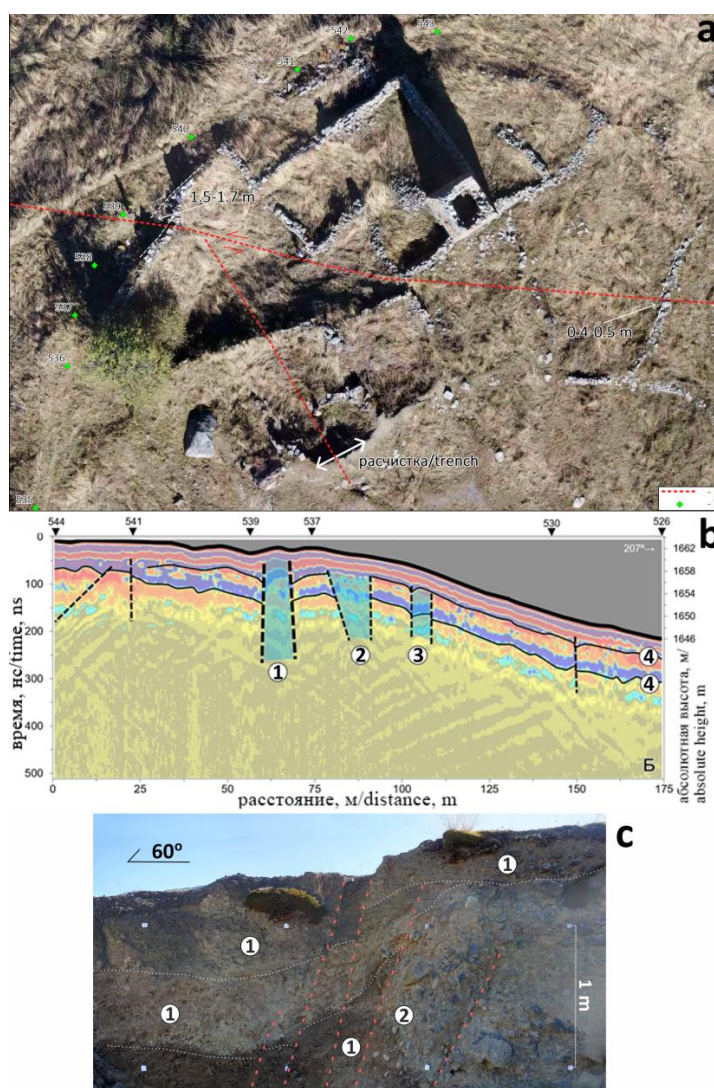


Рис. 9. Тектонические деформации в древнем селении Цагат-Ламардон

*а* – план центральной части селения: 1 – система тектонических ложбин и уступов (цифрами подписаны левосторонние смещения стен); 2 – точки георадарного профиля, *б* – георадарный профиль: 1, 2, 3 – зоны нарушения строения подповерхностной среды; 4 – маркирующие горизонты; черная штриховая линия – линии разломов; 526–554 – пикеты георадарного профиля, *с* – разрез молодых отложений вкрест простирания разрыва в расчистке: 1 – уплотненный щебень, дресва с супесчаным заполнителем («слоистый щебень», осыпные отложения); 2 – грубо сортированные, по-разному окатанные глыбы, валуны, щебень, галька, дресва в супесчаном заполнителе (пролювий) /

*Fig. 9. Tectonic deformations at the ancient settlement of Tsagat-Lamardon*  
*a – photographic plan of the central part of the settlement: 1 – system of tectonic hollows and scarps; 2 – points of the ground penetrating radar profile, b – ground penetrating radar profile: 1, 2, 3 – zones of subsurface faults; 4 – marker horizons; black dashed line – fault lines; 526-554 – profile pickets, c – cross-section of young sediments across the strike of a fault in the trench: 1 – flattened crushed rock, gravel with sandy loam filler (scree deposits); 2 – roughly sorted, differently rounded debris in sandy loam filler (proluvium)*

На окраине с. Даргавс, в районе некрополя прослежен тектонический разрыв, выраженный извилистым уступом. В 350 м к СВ от некрополя в подножии уступа обнаружен левый сдвиг подпорной стены сельскохозяйственной террасы на 6 м. Здесь же, примерно на 55 м, смещена влево долина ручья. В некрополе на окраине с. Даргавс, на поднятом крыле уступа, в склепах наблюдаются разрывы раздвигового типа, по всей видимости, возникшие в результате сейсмотектонического подрастания уступа.

### Обсуждение результатов

Даргавская и Фиагдонская котловины являются звеньями в субширотной цепочке внутригорных тектонических впадин между Боковым и Скалистым хребтами. В её осевой части трассируется зона регионального Пуйского разлома, представленного на территории Северной Осетии несколькими сегментами (Нузальский, Дзуарикауский, Даллагкау-Даргавский и др.) [Ольховский, Тибилов, 1998]. Тектоническое устройство депрессии осложняется системой грабенов, изученных в долинах рек Ардон и Фиагдон [Шевченко, 1962]. Они секут раннеальпийские складки в юрских отложениях и имеют форму сходящихся вниз клиньев шириной в несколько километров, сформировавшихся вероятнее всего, в условиях горизонтального сдвига. Эти структуры отражают стиль новейших деформаций, а заложение их относится к позднему плиоцену [Милановский, 1968].

Характер голоценовых тектонических деформаций фиксируется современным положением позднеплейстоценовых ледниковых образований. По долинам рек Фиагдон, Гизельдон и Геналдон у подножия Скалистого хребта позднеплейстоценовые морены слагают днища трогов и погребены толщами аллювиально-озерных осадков мощностью в десятки – сотни метров, что свидетельствует об относительном опускании впадины в голоцене [Письменный и др., 2006]. В то же время, в долине р. Ардон они в значительной степени размыты и сохранились в виде прислоненных к склонам валунных суглинков. Это указывает на смену опускания впадины поднятием и фиксирует границу сейсмотектонических сегментов Северо-Юрской впадины с разной интенсивностью молодых деформаций.

Северная граница впадины с моноклиалью Северного крыла, представлена грандиозным обрывом Скалистого хребта. Обрыв и сопутствующий ему мощный шлейф коллювиально-пролювиально-оползневых накоплений подпруживают долины рек Терек, Геналдон, Гизельдон и Фиагдон. Обломочный шлейф протягивается почти сплошной полосой, практически повсеместно скрывая зону разлома, формирующего обрыв Скалистого хребта. По этой причине зона разлома изучена только в самом первом приближении, а на происхождение естественной плотины в долинах рек высказывалось мнение, что её происхождение не требует привлечения каких-то местных тектонических причин [Милановский, 1968]. В то же время, прослеживание слоев мезозойских отложений показывает, что по разлому карбонатные толщи

Скалистого хребта взброшены или надвинуты на песчано-глинистые толщи средней – нижней юры с амплитудой до 6.5 км [Ольховский, Тибилов, 1998].

Нами были получены прямые данные о разломном происхождении уступа в подножии обрыва Скалистого хребта и его сейсмотектонической активности в историческое время. В долине р. Гизельдон, при ВСВ простирации разлом представлен позднеголоценовым правосторонним вбросо-сдвигом. Основная плоскость смещения имеет крутое (70–80°) падение в СЗ направлении. Величина последней одноактной подвижки – 1–1.5 м. В селении Ацонага величина предпоследней правосдвиговой подвижки – 0.9–1.1 м; последней – 0.6–0.8 м. Собранные здесь данные позволяют полагать, что за последние 600–700 лет произошло два сильных землетрясения с  $M \geq 6.8$  и  $M \geq 6.6$ ; последнее возможно в 1785 г. [Овсяченко и др., 2024].

В зоне разлома выявлены относительно короткие (длиной первые км – сотни м) левые сдвиги ЗСЗ простирации. В селении Хуссар-Хинцаг левосдвиговые одноактные смещения исторического времени в среднем составляют 30–40 см. В селении-крепости Дзивгис левый сдвиг средневековой стены-крепиды составляет 1.2 м. Возможно, смещение является результатом нескольких событий. По археосейсмологическим данным за период с VII по начало XX вв. в Дзивгисе произошло 5 сильных землетрясений; последнее в конце XIX – начале XX вв. [Корженков и др., 2023]. Средняя повторяемость землетрясений по этим данным составляет 260 лет, однако очаги всех событий не локализованы.

Рассмотренная (Северная) система разрывов имеет непосредственную пространственную и кинематическую связь с тремя другими ветвями нарушений Северо-Юрской впадины: Средней, Южной и Субмеридиональной. Одноактные смещения по Средней ветви имеют правосдвиговую кинематику со смещением на 0.4 м (селение Даллагкау, вертикальная компонента подвижки – 0.25–0.3 м). По Южной ветви величина левого сдвига стен вдоль разрыва меняется от 1.5–1.7 до 0.4–0.5 м. По всей видимости, амплитуда последней подвижки составляет 0.4–0.5 м, а величина 1.5–1.7 м – результат нескольких смещений.

Данные о возрасте, величине и кинематике подвижек представляют собой первичный материал для построения сейсмотектонической модели Северо-Юрской депрессии, как крупнейшей сейсмогенерирующей структуры. С использованием уравнения и коэффициентов для сейсмотектонической подвижки сдвиговой кинематики [Wells, Coppersmith, 1994] получены оценки магнитуды землетрясений –  $M=6.5$ – $6.8$  для Средней и Южной систем; для Северной –  $M=6.8$ – $7.2$ .

По результатам массового радиоуглеродного датирования правосдвиговых сейсмотектонических рвов и валов в Кармадонской и Даргавской котловинах, для последних 10 000 лет получены сведения о, по крайней мере, семи сейсмических событиях с  $M_w=6.5$ – $7.0$  [Рогожин и др., 2005; 2014]. Средний период повторяемости сильнейших землетрясений составляет примерно 1400–1500 лет, однако в середине голоцена, примерно, 6000–8000 л. н., землетрясения повторялись значительно чаще – примерно через 500 лет. Очевидно, что некоторые события были пропущены, поэтому можно принять относительно широкий интервал повторяемости сильных землетрясений с учетом археосейсмологических данных – 250–500 лет.

Продольные разрывы Даргавской и Фиагдонской котловин образуют три основных системы с разной кинематикой смещений. Это обстоятельство требует дальнейшего изучения и осмысления. С одной стороны, кинематика смещений определяется ориентировкой конкретных разрывов, т.е. их положением относительно



действующего поля напряжений. Так, в пределах Северной ветви, при СВ-ВСВ ориентировке преобладают правые сдвиги и взбросо-сдвиги, при СЗ-ЗСЗ – левые сдвиги. В то же время, при общем субширотном простирании, кинематика смещений по Средней и Южной ветвям – право- и левосдвиговая соответственно. Можно предположить, что основные деформации происходят по Средней ветви, представленной правым сдвигом, а Южная ветвь реализует локальные напряжения, компенсируя общие правосторонние смещения по всей разломной зоне. Представляется, что на решение этого вопроса может пролить свет оценка вклада каждой ветви в суммарную деформацию разновозрастных геоморфологических уровней, анализ геофизических данных о глубинном строении и сейсмологических определений глубин очагов, что остается делом будущих исследований.

Обратимся к инструментальным данным о современных тектонических деформациях. Данные о механизмах очагов землетрясений немногочисленны. Напряжения сжатия, осредненные по всей совокупности механизмов для Большого Кавказа, ориентированы в целом субмеридионально, вкрест простирания основных разломных зон [Rebetsky, 2020; Tibaldi et al., 2020]. В то же время, при рассмотрении механизмов конкретных сильных и умеренных сейсмических событий выявляется более неоднородное поле деформаций. Так, согласно решению механизма очага Джавского землетрясения с  $M=6.2$ , произошедшего 15.06.1991 на Южном склоне осетинского сектора Большого Кавказа, активизированный при этом короткий сегмент Кахетино-Лечхумского разлома СЗ ориентировки представляет собой левосторонний взбросо-сдвиг [Рогожин и др., 2014]. Аналогичные позднеголоценовые левые сдвиги СЗ-ЗСЗ ориентировки наблюдаются и в Северо-Юрской депрессии, что свидетельствует об общности регионального поля деформаций.

Более детальную картину дают геодезические данные по Осетинскому профилю, пересекающему все основные структуры Большого Кавказа в пределах Горной Осетии, включая и Северо-Юрскую депрессию. В пределах депрессии по этим данным выявляется доминирующая сдвиговая составляющая современных движений со скоростью до 15 мм/год [Милюков и др., 2018; Manevich et al., 2023]. Полученные по этим данным расчетные положения осей сжатия тензора скорости деформаций в пределах депрессии меняют ориентировку с СЗ (к югу) на ЗСЗ (к северу), что характеризует обстановку сжатия с горизонтальной правосдвиговой компонентой [Миронов и др., 2021].

## Выводы

Собраны прямые данные о пространственном положении, кинематике и величине сеймотектонических подвижек по молодым тектоническим разрывам Даргавской и Фиагдонской котловин, имеющие принципиальное значение для построения сеймотектонической модели Северо-Юрской депрессии. Устанавливается тесная взаимосвязь древних поселений с активными разломами. Это позволяет в первом приближении оценивать возраст и величину молодых одноактных смещений в рукотворных сооружениях, которые служат надежным маркером для этих целей. Одним из наиболее важных результатов исследований можно считать установление разломной природы обрыва Скалистого хребта. В пределах Даргавской и Фиагдонской котловин продольные разрывы образуют три основных системы с разной кинематикой смещений. По данным о параметрах сеймотектонических подвижек по отдельным разрывам, в историческое время здесь происходили сильные землетря-



сения с  $M=6.5-6.8$  (Средняя и Южная системы) и  $M=6.8-7.2$  (Северная). Интервал повторяемости сильных землетрясений по разным данным составляет 250–500 лет. Определенная прямыми методами доминирующая правосторонняя взбросо-сдвиговая кинематика смещений для разломных систем Северо-Юрской депрессии соответствует сейсмологическим и геодезическим данным.

## Литература

1. Едемский Д.Е., Прокопович И.В. Применение георадиолокации при выявлении зон разрывных нарушений. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. № 5. – С. 14–21.
2. Корженков А.М., Чшиев В.Т., Ларьков А.С., Овсяченко А.Н., Едемский Д.Е., Аверин А.А., Андреева Н.В. Высокая историческая сейсмичность в Северной Осетии по данным археосейсмологии (на примере поселения Дзивгис). // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2023. – Т. 50. № 2. – С. 76–110.
3. Корженков А.М., Овсяченко А.Н., Едемский Д.Е., Аверин А.А., Бутанаев Ю.В., Заалишвили В.Б., Ларьков А.С., Кашицина О.Ю. Макросейсмическое изучение руин в древнем поселении Хуссар-Хинцаг (долина р. Гизельдон, Северная Осетия). // Геофизические процессы и биосфера. – 2025. – Т. 24. №. 1. – С. 74–93.
4. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. – 483 с.
5. Милуков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М., Николаев А.В. Скорости современных горизонтальных движений в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с тектоникой и глубинным строением земной коры. // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 481. № 3. – С. 291–295.
6. Миронов А.П., Милуков В.К., Стеблов Г.М., Дробышев В.Н., Кусраев А.Г., Хубаев Х.М. Деформации земной коры в Осетинском регионе Большого Кавказа по данным ГНСС-измерений. // Геофизические процессы и биосфера. – 2021. – Т. 20. – №. 4. – С. 122–137.
7. Никитин М.Ю., Никонов А.А., Болотов С.Н., Беляков Г.А. Палеосейсмодислокации в бассейне р. Ардон и их значение для оценки сейсмического потенциала Большого Кавказа. // Доклады Академии наук. – 1993. – Т. 330. № 6. – С. 740–744.
8. Овсяченко А.Н., Едемский Д.Е., Нечаев С.Ю., Корженков А.М., Заалишвили В.Б., Ларьков А.С., Аверин А.А. Исследования очагов сильных землетрясений методами геофизики, палео-, архео- и исторической сейсмологии: Фиагдонская котловина в Северной Осетии. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 65–90.
9. Ольховский Г.П., Тибилов С.М. Составление специализированной геологической основы масштаба 1:50000 для прогнозно-металлогенической карты Горной Осетии. Владикавказ: ГПП «Севосгеологоразведка», 1998. – 491 с.
10. Письменный А.Н., Горбачев С.А., Вертий С.Н. и др. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200000. Изд. 2–е. Серия Кавказская. Листы К–38–IX, XV (Владикавказ). СПб: Изд-во картфабрики ВСЕГЕИ, 2006. – 277 с.
11. Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г., Мараханов А.В., Овсяченко А.Н., Спиридонов А.В., Бурканов Е.Е. О соотношении проявлений вулканизма и землетрясений на Северном Кавказе в голоцене. // Физика Земли. – 2005. – № 3. – С. 33–46.
12. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с.
13. Солоненко В.П. Палеосейсмогеология. // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1973. – № 9. – С. 3–16.
14. Свод памятников истории и культуры Осетии-Алании. Т. 2: Районы Республики Северная Осетия-Алания. / Комитет по охране и использованию объектов культурного наследия Республики Северная Осетия-Алания, Институт истории и археологии Республики

Северная Осетия-Алания. / Ред. колл. Э.Г. Агаева и др. – Владикавказ: ИПП им. В.А. Гасиева, 2021. – 544 с.

15. Тменов В.Х. Средневековые историко-архитектурные памятники Северной Осетии. Орджоникидзе: Ир, 1984. – 344 с.

16. Флоренсов Н.А. Очерки структурной геоморфологии. М.: Наука, 1978. – 283 с.

17. Шевченко В.И. Тектонические дислокации на территории Осетии и механизм их формирования. // В сборнике: Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм формирования. М.: ИФЗ АН СССР, 1962. – С. 42–77.

18. Berkut A.I., Edemsky D.E., Kopeikin V.V., Morozov P.A., Prokopovich I.V., Popov A.V. Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation. // In: 9<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2017. Edinburgh, United Kingdom. 6 p. DOI: 10.1109/IWAGPR.2017.7996052.

19. Burbank D.W., Anderson R.S. Tectonic geomorphology (2<sup>nd</sup> edition). Chichester, Wiley Blackwell, 2012. – 454 p.

20. Manevich A.I., Losev I.V., Avdonina A.M., Shevchuk R.V., Kaftan V.I., Tatarinov V.N. Modeling the horizontal velocity field of the Earth's crust in a regular grid from GNSS measurements. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2023. – Vol. 23. – No. 6. – Art. No. ES6002.

21. McCaillin J.P. (ed.) Paleoseismology. Elsevier, 2<sup>nd</sup> edition, 2009. – 613 p.

22. Rebetsky Y.L. The current state of crustal stresses in the Caucasus according to the unified catalogue of earthquake focal mechanisms. // Geodynamics & Tectonophysics. – 2020. – Vol. 11. – No. 1. – pp. 17–29.

23. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2020. Vol. 188. – Art. No. 104108.

24. Trifonov V.G. Active faults in Eurasia: general remarks. // Tectonophysics. – 2004. – Vol. 380. – pp. 123–130.

25. Vorobieva I.A., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Gvishiani A.D., Zaalishvili V.B., Sergeeva N.A., Nikitina I.M. Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 14. No. 1. – Art. No. 172.

26. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – Vol. 84. No. 4. – pp. 974–1002.

## References

1. Edemsky D.E., Prokopovich I.V. Application of GPR in identifying fault zones. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2024. Vol. 29. No. 5. pp. 14–21. (In Russ.)

2. Korzhenkov A.M., Chshiev V.T., Larkov A.S., Ovsyuchenko A.N., Edemsky D.E., Averin A.A., Andreeva N.V. High historical seismicity in North Ossetia according to archaeoseismology data (using the example of the Dzivgis settlement). *Problems of Engineering Seismology*. 2023. Vol. 50. No. 2. pp. 76–110. (In Russ.)

3. Korzhenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Edemsky D.E., Averin A.A., Butanaev Yu V., Zaalishvili V.B., Larkov A.S., Kashitsyna O.Yu. Macroscopic Study of Ruins in the Ancient Settlement of Khussar-Khintsag (Gizeldon River Valley, North Ossetia). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2025. Vol. 61. No. 7. pp. 834–852. (In Russ.)

4. Milanovsky E.E. Neotectonics of Caucasus. Moscow. Nedra. 1968. 483 p. (In Russ.)

5. Milyukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Drobyshev V.N., Khubaev Kh M., Nikolaev A.V. Velocities of Present-Day Horizontal Movements in the Central Sector of the Greater Caucasus according to GPS Observations and Their Relation to Tectonics and the Deep Structure of the Earth's Crust. *Doklady Earth Sciences*. Vol. 481. No. 1. pp. 879–882. (In Russ.)

6. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblov G.M., Drobyshev V.N., Kusraev A.G., Khubaev Kh.M. Crustal strains in the Ossetian Region of the Greater Caucasus based on GNSS measurements. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. Vol. 57. No. 11. pp. 1498–1513. (In Russ.)
7. Nikitin M.Yu., Nikonov A.A., Bolotov S.N., Belyakov G.A. Paleoseismic dislocations in the river Ardon basin and their significance for assessing the seismic potential of the Greater Caucasus. *Reports of the Academy of Sciences*. 1993. Vol. 330. No. 6. pp. 740–744. (In Russ.)
8. Ovsyuchenko A.N., Edemsky D.E., Nechaev S.Yu., Korzhenkov A.M., Larkov A.S., Averin A.A. Research of sources of strong historical earthquakes using geophysical, paleo-, archeo- and historical seismology: Fiagdon Basin in North Ossetia. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 64–90. (In Russ.)
9. Olkhovsky G.P., Tibilov S.M. Compilation of a specialized geological basis at a scale of 1:50000 for a predictive metallogenic map of Mountain Ossetia. Vladikavkaz. “Sevosgeologorazvedka”. 1998. 491 p. (In Russ.)
10. Pismenny A.N., Gorbachev S.A., Vertiy S.N. et al. State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Ed. 2nd. Caucasian series. Sheets K–38–IX, XV (Vladikavkaz). Saint Petersburg. VSEGEI. 2006. 277 p. (In Russ.)
11. Rogozhin E.A., Gurbanov A.G., Marakhanov A.V., Ovsyuchenko A.N., Spiridonov A.V., Burkanov E.E. On the relationship between volcanic features and earthquakes in the northern Caucasus in the Holocene. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2005. Vol. 41. No. 3. pp. 206–217. (In Russ.)
12. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatiykov A.V. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS. 2014. 256 p. (In Russ.)
13. Solonenko V.P. Paleoseismogeology. *Izvestiya Akademii Nauk USSR. Physics of the Earth*. 1973. No. 9. pp. 3–16. (In Russ.)
14. A register of historical and cultural monuments of Ossetia-Alania. Vol. 2: Districts of the Republic of North Ossetia-Alania. Committee for the Protection and Use of Cultural Heritage Sites of the RNO-Alania, Institute of History and Archaeology of the RNO-Alania. Eds. E.G. Agaeva et al. Vladikavkaz. IPP V.A. Gassiev. 2021. 544 p. (In Russ.)
15. Tmenov V.Kh. Medieval historical and architectural monuments of North Ossetia. Ordzhonikidze. Ir. 1984. 344 p. (In Russ.)
16. Florensov N.A. Essays on structural geomorphology. Moscow. Nauka. 1978. 283 p. (In Russ.)
17. Shevchenko V.I. Tectonic dislocations on the territory of Ossetia and the mechanism of their formation. In: *Folded deformations of the Earth’s crust, their types and mechanism of formation*. Moscow. IPE USSR Academy of Sciences. 1962. pp. 42–77. (In Russ.)
18. Berkut A.I., Edemsky D.E., Kopeikin V.V., Morozov P.A., Prokopovich I.V., Popov A.V. Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation. In: *9<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. 2017. Edinburgh, United Kingdom. 6 p. DOI: 10.1109/IWAGPR.2017.7996052.
19. Burbank D.W., Anderson R.S. *Tectonic geomorphology* (2<sup>nd</sup> edition). Chichester. Wiley Blackwell. 2012. 454 p.
20. Manevich A.I., Losev I.V., Avdonina A.M., Shevchuk R.V., Kaftan V.I., Tatarinov V.N. Modeling the horizontal velocity field of the Earth’s crust in a regular grid from GNSS measurements. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23. No. 6. Art. No. ES6002.
21. McCaillin J.P. (ed.) *Paleoseismology*. Elsevier. 2<sup>nd</sup> edition. 2009. 613 p.
22. Rebetsky Y.L. The current state of crustal stresses in the Caucasus according to the unified catalogue of earthquake focal mechanisms. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. Vol. 11. No. 1. pp. 17–29.

23. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188. Art. No. 104108.
24. Trifonov V.G. Active faults in Eurasia: general remarks. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 380. pp. 123–130.
25. Vorobieva I.A., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Gvishiani A.D., Zaalishvili V.B., Sergeeva N.A., Nikitina I.M. Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 14. No. 1. Art. No. 172.
26. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84. No. 4. pp. 974–1002.



УДК 550.34

DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

Оригинальная статья

## Спектры реакции колебаний грунта и макросейсмическая интенсивность землетрясений: некоторые статистические соотношения

Ю.К. Чернов 

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

Статья поступила: 16.10.2025, доработана: 28.11.2025, принята к публикации: 01.12.2025

**Резюме: Цель исследований.** Получение новых данных о взаимосвязях между макросейсмическими и физическими характеристиками сильных движений грунта при землетрясениях и улучшение на этой основе способов прогнозирования возможных сейсмических воздействий в сейсмоактивных районах. **Актуальность работы.** Территория РФ по уровню сейсмической опасности разделена на зоны с различной макросейсмической интенсивностью (балльностью) сотрясений. Основанные же на этих данных расчеты на сейсмостойкость используют не сами макросейсмические баллы, а поставленные им в соответствие физические характеристики колебаний грунта – амплитуды и спектры реакции. Поэтому вопрос адекватности этих соответствий всегда имел первостепенное значение. Еще одна причина перманентной актуальности проводимых в данном направлении исследований – это то, что получаемые в их процессе данные являются одним из главных источников фундаментальных знаний о природе землетрясений и об их воздействии на окружающую среду и общество. **Объект исследования.** Макросейсмическая интенсивность сотрясений и спектры реакции колебаний грунта при землетрясениях и количественные соотношения между ними. **Методы исследования.** Комплексный анализ эмпирических и расчетных данных об уровнях спектральных ускорений колебаний грунта (SA) на различных фиксированных частотах (f) при землетрясениях разной силы (I) и построение на этой основе вероятностных моделей связи между ними при землетрясениях разных магнитуд (M) и удаленностей (D). **Результаты исследования.** Для каждой из 18-ти спектральных составляющих логарифмически равномерно распределенных по частотам в диапазоне 0,28–22 Гц, получены вероятностные оценки SA при различных сочетаниях M, D и I. Построены соответствующие вероятностные модели SA(M,D,I,f), посредством анализа которых выявлены частоты и соответствующие им уровни SA, не зависящие от M и D и определяющиеся только балльностью I. Эти частоты, свои для каждого значения I названы «ответственными» за макросейсмический эффект данной силы. Предложена методика определения макросейсмической интенсивности I по спектру реакции SA(f), позволяющая получать более точные оценки, чем традиционные методики оценок по единичным параметрам колебаний (амплитудам, периодам и др.).

**Ключевые слова:** землетрясения, макросейсмическая интенсивность землетрясений, спектры реакции колебаний грунта, сейсмическая опасность, сейсмические воздействия.

**Для цитирования:** Чернов Ю.К. Спектры реакции колебаний грунта и макросейсмическая интенсивность землетрясений: некоторые статистические соотношения. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 97–111. DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

Original paper

## Ground motion response spectra and macroseismic earthquake intensity: some statistical ratios

Yu.K. Chernov 

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

Received: 16.10.2025, revised: 28.11.2025, accepted: 01.12.2025

**Abstract: Aim.** Obtaining new data on the interrelations between macroseismic and physical characteristics of strong ground motions during earthquakes and improving methods for predicting possible seismic impacts in seismically active areas based on this. **Relevance.** According to the level of seismic hazard, the territory of the Russian Federation is divided into zones with different macroseismic intensity (in points) of earthquakes. Calculations based on these data for seismic resistance do not use the macroseismic intensity points themselves, but the corresponding physical characteristics of ground motions, such as amplitudes and reaction spectra. Therefore, the question of the adequacy of these compliances has always been of primary importance. Another reason for the permanent relevance of research conducted in this area is that the data obtained in their process is one of the main sources of fundamental knowledge about the nature of earthquakes and their impact on the environment and society. **Object.** The macroseismic intensity of earthquakes and the response spectra of ground motions during earthquakes and the quantitative relationships between them. **Methods.** A comprehensive analysis of empirical and calculated data on the levels of spectral ground motions accelerations (SA) at various fixed frequencies (f) in earthquakes of different intensities (I) and the construction of probabilistic models of the relationship between them in earthquakes of different magnitudes (M) and distances (D) on this basis. **Results.** For each of the 18 spectral components, logarithmically uniformly distributed over frequencies in the range 0.28–22 Hz, probabilistic estimates of SA were obtained for various combinations of M, D, and I. The corresponding probabilistic models SA(M,D,I,f) are constructed, through the analysis of which the frequencies and relevant levels of SA are identified, independent of M and D and determined only by the intensity I. These frequencies, which are different for each value of I, are called “responsible” for the macroseismic effect of this intensity. A method for determining the macroseismic intensity I from the SA(f) reaction spectrum is offered, which makes it possible to obtain more accurate estimates than traditional methods for estimating single oscillation parameters (amplitudes, periods, etc.).

**Keywords:** earthquakes; macroseismic earthquake intensity; ground motion response spectra; seismic hazard, seismic impacts.

**For citation:** Chernov Yu.K. Ground motion response spectra and macroseismic earthquake intensity: some statistical ratios. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2025. 15(4): 97–111. DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

### Введение

В сейсмологии для оценки воздействия землетрясений на окружающую среду и общество используются характеристики двух видов. Первый – это «сила» или макросейсмическая интенсивность землетрясений, измеряемая в баллах макро-

сейсмической шкалы (см., например, [Медведев, 1962; 1968]). Второй – физические параметры движений грунта во время землетрясений, такие, как амплитуды, спектры, временные функции колебаний и др. (см., например, [Чернов, 1989]). Первые, известные еще с древних времен базируются на описании и последующем объединении разнообразных проявлений и эффектов землетрясений по степени их «силы» и опасности в отдельные группы, которым приписаны определенные количественные показатели – баллы соответствующим образом построенной шкалы. Вторые стали применяться значительно позже – после появления специальных сейсмических приборов, способных с необходимой для практических нужд точностью регистрировать физические характеристики движений грунта во время землетрясений. Этот второй способ оценки сейсмических воздействий имеет определенные преимущества, так как дает возможность получать данные, необходимые для проведения расчетов на сейсмостойкость и, вообще, на количественном уровне судить о геофизических процессах, происходящих во время землетрясений. Но и первый в определенной степени «описательный» вид оценок также не теряет актуальности. Так, например, согласно современным строительным нормативам, территория Российской Федерации по уровню сейсмической опасности разделена на зоны с различной макросейсмической интенсивностью (балльностью) сотрясений (см. [Комплект ..., 1999]). В то же время, основанные на этих данных расчеты на сейсмостойкость используют не сами макросейсмические баллы, а поставленные им в соответствие физические характеристики колебаний грунта – амплитуды и спектры реакции. В этих условиях вопрос адекватности этих соответствий имел и имеет первостепенное значение. Еще одна причина перманентной актуальности проводимых в данном направлении исследований – это то, что получаемые в их процессе данные являются одним из главных источников фундаментальных знаний о природе землетрясений и об их воздействии на окружающую среду и общество и, соответственно, одним из важных факторов, способствующих совершенствованию способов защиты от данного стихийного бедствия.

Исходя из вышеизложенного, многими исследователями в разное время рассматривались корреляции между наблюдаемыми макросейсмическими эффектами землетрясений и инструментально зарегистрированными параметрами движений грунта (см., например, [Медведев, 1962; Сейсмическая ..., 1975; Сейсмическое ..., 1977; Паутиан и др., 1989; Штейнберг и др., 1993; Atkinson, Sonley, 2000; Yaghmaei-Sabagh et al., 2011; Worden et al., 2012; Sokolov, 2013; Caprio et al., 2015; Nemati, 2015; Du et al., 2019; Заалишвили и др., 2024а,б]). Так, в работе [Чернов, 1989] исследовались статистические связи между амплитудами, периодами, длительностями, временем нарастания, спектрами, формой колебательных ускорений, скоростей и смещений грунта (как по отдельности, так и в разных сочетаниях) с одной стороны и балльностью сотрясений с другой. Полученные соотношения сравнивались между собой с целью выявления вариантов с наиболее тесной корреляцией. Было показано, что наиболее тесные связи наблюдаются между макросейсмическими интенсивностями сотрясений и уровнями спектральной плотности Фурье на отдельных частотах, своих для каждого уровня балльности. На основе этих закономерностей разработаны вероятностные модели для оценки макросейсмической балльности землетрясений по спектру Фурье колебаний грунта. Последующее применение этих моделей в различных сейсмоактивных районах мира с разными сейсмогеологическими условиями показало их эффективность.

Учитывая вышеописанный положительный опыт, представляется перспективным аналогичным образом рассмотреть вопрос о связи балльности сотрясений теперь уже со спектрами реакции колебаний грунта, которые в массовом порядке приводятся в современных мировых базах данных по сильным движениям. Вариант решения данной задачи приводится ниже.

### Информационная база и методика исследований

В основу исследования положены вероятностные оценки спектров реакции ускорений колебаний грунтов, которые можно ожидать при землетрясениях разных магнитуд ( $M$ ) и макросейсмических интенсивностей ( $I$ ). Для оценок спектров реакции использованы разработанные нами ранее и описанные в работе [Чернов, 2024a] вероятностные модели спектров Фурье ускорений колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разных магнитуд и расстояний до очага ( $D$ ). При этом оценки спектров реакции получались путем пересчета модельных оценок вышеуказанных спектров Фурье. Для пересчетов использовались соотношения между спектрами реакции ускорений колебаний грунта (с затуханием 5 %) и соответствующими спектрами Фурье из [Чернов, 2024б]:

$$\lg SA(f) = a (\lg |S|(f))^2 + b \lg |S|(f) + c \quad (1)$$

где:

$$a = 0,0720(\lg f)^5 - 0,1020(\lg f)^4 - 0,0718(\lg f)^3 + 0,0614(\lg f)^2 + 0,0469 \lg f + 0,0060$$

$$b = 0,4910(\lg f)^5 - 0,6323(\lg f)^4 - 0,0120(\lg f)^3 + 0,1827(\lg f)^2 + 0,0008 \lg f + 0,7992 \quad (2)$$

$$c = 0,2599(\lg f)^3 - 0,1285(\lg f)^2 + 0,6366 \lg f + 0,9868$$

В выражениях (1) и (2)  $|S|$  и  $SA$  – уровни спектральной плотности Фурье и уровни спектральных ускорений на различных частотах ( $f$ ) даны в см/с и см/с/с соответственно,  $f$  в Гц. Выражения (1) и (2) справедливы для  $f \approx 0,28$ –22 Гц и  $|S| \approx 0,1$ –500 см/с. Значения  $|S|(f)$  и производные от них  $SA(f)$ , также, как и используемые в работе пиковые ускорения  $PGA$  являются среднегеометрическими значениями между максимальными уровнями этих параметров на двух горизонтальных составляющих записи.

Для производства расчетов спектры Фурье и соответственно спектры реакции представлены в виде набора из 18-ти спектральных составляющих, логарифмически равномерно распределенных по частотам в инженерном диапазоне 0,28–22 Гц. Непосредственно в результате расчетов сделаны оценки спектральной плотности Фурье и спектральных ускорений, выполненные для каждой из этих спектральных составляющих. Оценки спектров сделаны отдельно для каждой магнитуды землетрясения в диапазоне  $M=3$ –8 и для таких расстояний до очага, на которых можно ожидать того или иного конкретного значения макросейсмической интенсивности землетрясения данной магнитуды в диапазоне  $I=3$ –9 баллов MSK. Для определения этих расстояний использованы зависимости  $I(M, D)$  из [Чернов, 2024a]. Все оценки сделаны отдельно для «мягких» и «твердых» грунтов. В таблице 1 приведены принятые в настоящем исследовании оценки расстояний до очага, для которых рассчитаны спектры Фурье и соответствующие спектры реакции ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях с разными  $M$  и  $I$ .



Таблица 1 / Table 1

**Оценки наиболее вероятных расстояний до очага (D), на которых с наибольшей вероятностью могут наблюдаться сотрясения различной интенсивности (балльности MSK) при землетрясениях магнитуд (M) в условиях «мягких» и «твердых» грунтов /**  
**Estimates of the most probable distances to the source (D), at which motions of varying intensity (MSK scores) are most likely to occur during earthquakes of magnitude (M) in conditions of “soft” and “hard” soils**

| M                                                           | Грунт /<br>The ground | D, км, <i>km</i> |      |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                             |                       | 9MSK             | 8MSK | 7MSK  | 6MSK  | 5MSK  | 4MSK  | 3MSK  |
| 8                                                           | Мягк. /<br>soft       | 31,6             | 49,0 | 114,8 | 169,8 | 229,1 | 354,8 | 530,9 |
|                                                             | Тверд. /<br>hard      | 7,9              | 30,2 | 62,4  | 100,0 | 179,1 | 173,8 | 375,8 |
| 7                                                           | Мягк. /<br>soft       | 6,3              | 20,9 | 49,5  | 75,0  | 144,9 | 213,8 | 410,2 |
|                                                             | Тверд. /<br>hard      | 5,0              | 9,1  | 26,4  | 39,8  | 79,6  | 166,0 | 247,2 |
| 6                                                           | Мягк. /<br>soft       | 3,2              | 5,9  | 6,2   | 30,0  | 63,5  | 112,2 | 188,4 |
|                                                             | Тверд. /<br>hard      |                  | 3,2  | 3,2   | 16,3  | 33,5  | 63,4  | 101,2 |
| 5                                                           | Мягк. /<br>soft       |                  | 2,0  | 5,0   | 12,9  | 26,3  | 25,2  | 85,5  |
|                                                             | Тверд. /<br>hard      |                  |      | 2,5   | 8,3   | 6,6   | 27,5  | 47,3  |
| 4                                                           | Мягк. /<br>soft       |                  |      | 1,3   | 4,0   | 10,0  | 18,7  | 26,6  |
|                                                             | Тверд. /<br>hard      |                  |      |       | 2,0   | 6,3   | 10,7  | 20,0  |
| 3                                                           | Мягк. /<br>soft       |                  |      |       |       | 5,0   | 8,3   | 15,1  |
|                                                             | Тверд. /<br>hard      |                  |      |       |       | 2,0   | 3,5   | 6,9   |
| Среднегеометрическое значение /<br>The average metric value |                       | 7,6              | 10,1 | 11,3  | 21,5  | 26,3  | 44,6  | 81,5  |

В соответствии с используемыми в расчетах моделями принято, что оцениваемые уровни спектров реакции SA(M, D, f, I) являются случайными величинами, имеющими лог. нормальное распределение при всех рассматриваемых M, D, f и I. Оценивались наиболее вероятные значения и стандартные отклонения значений lgSA(M, D, f, I).

Дополнительно к вышеописанным прямым расчетным данным методом экстраполяции сделаны оценки SA(I, f) для I=10–12MSK.

### Результаты и обсуждения

На рисунке 1 приведены примеры полученных вероятных спектров реакции ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд, способных вызвать сотрясения с вероятной макросейсмической интенсивностью  $I=9\text{MSK}$ ,  $7\text{MSK}$  и  $5\text{MSK}$ .

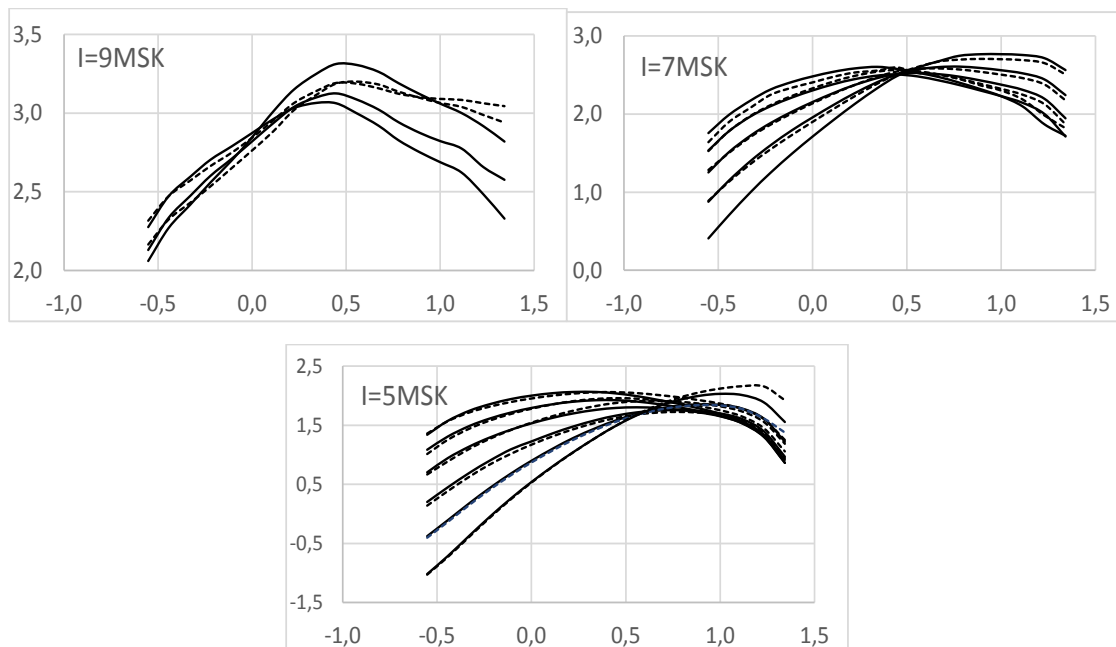


Рис. 1. Примеры наиболее вероятных значений логарифмов спектральных ускорений «мягких» (сплошные линии) и «твердых» (пунктир) грунтов для различных спектральных составляющих при землетрясениях разных магнитуд (цифры около кривых) и интенсивностей сотрясений.

Оси ординат – значения  $\lg SA$ , где  $SA$  в  $\text{см/с/с}$ , а оси абсцисс –  $\lg f$ , где  $f$  в  $\text{Гц}$  /

Fig. 1. Examples of the most probable values of the logarithms of spectral accelerations of “soft” (solid lines) and “hard” (dotted lines) soils for various spectral components in earthquakes of different magnitudes (numbers near the curves) and earthquake intensities. The ordinate axes are  $\lg SA$  values, where  $SA$  is in  $\text{cm/s/s}$ , and the abscissa axes are  $\lg f$ , where  $f$  is in  $\text{Hz}$

Аналогичные построения сделаны и для землетрясений с макросейсмической балльностью  $I=8\text{MSK}$ ,  $6\text{MSK}$ ,  $4\text{MSK}$  и  $3\text{MSK}$ . При этом в соответствии с используемыми зависимостями  $I(M, D)$  и данными таблицы 1 принято: интенсивность землетрясений  $I=9$  баллов  $\text{MSK}$  может наблюдаться при магнитудах  $M=8, 7$  и  $6$  в условиях «мягких» грунтов и  $M=8$  и  $7$  в условиях «твердых» грунтов;  $I=8\text{MSK}$  при  $M=8, 7, 6$  и  $5$  для «мягких» грунтов и  $M=8, 7$  и  $6$  для «твердых» грунтов;  $I=7\text{MSK}$  при  $M=8, 7, 6, 5$  и  $4$  для «мягких» грунтов и  $M=8, 7, 6$  и  $5$  для «твердых» грунтов;  $I=6\text{MSK}$  при  $M=8, 7, 6, 5, 4$  и  $3$  для «мягких» грунтов и  $M=8, 7, 6, 5$  и  $4$  для «твердых» грунтов;  $I=5\text{MSK}$  при  $M=8, 7, 6, 5, 4$  и  $3$  для «мягких» грунтов и  $M=8, 7, 6, 5$  и  $4$  для «твердых» грунтов;  $I=4\text{MSK}$  и  $I=3\text{MSK}$  при  $M=8, 7, 6, 5, 4$  и  $3$  для «мягких» и «твердых» грунтов.

Графики спектров на рисунке 1 и оценки, полученные для других интенсивностей сотрясений, показывают, что в общем спектре колебаний существуют частоты, свои для каждого уровня балльности, на которых интенсивности спектральных ускорений при землетрясениях разных магнитуд резко сближаются и их разброс становится существенно меньшим, чем на остальных частотах. Поскольку имен-

но эти частоты значительно теснее других связаны с интенсивностями сотрясений, то, по аналогии с подобными исследованиями в отношении спектра Фурье (см. [Чернов, 1989]), в данном исследовании они также названы «ответственными» за макросейсмический эффект данной силы ( $I=i$ ) –  $f_i$ . «Ответственные» частоты возрастают при уменьшении макросейсмической интенсивности  $I$ .

В численном выражении значения  $f_i$  приведены в таблице 2. В этой же таблице даны наиболее вероятные значения уровней спектральных ускорений колебаний грунта при землетрясениях разных  $M$ , соответствующих данной интенсивности сотрясений –  $SA_{fi}$ . В таблице 2 приводятся и другие характеристики, рассчитанные как наиболее вероятные значения для совокупностей спектров реакции при землетрясениях разных  $M$ , соответствующих разным фиксированным значениям  $I$ . Это максимальные спектральные ускорения ( $SA_{max}$ ) и частоты, на которых наблюдаются  $SA_{max} - f_{SA_{max}}$ . Для дальнейшего анализа в эту же таблицу включены и оценки вероятных пиковых ускорений (PGA), из [Опасные ..., 2022], ранее полученные нами обобщением 25-ти известных в мире зависимостей  $PGA(I)$ , а также соотношения  $SA_{max}/PGA$ . Здесь же приведены результаты выполненных с использованием выражений (1) и (2) пересчетов величин  $SA_{fi}$  в спектральные плотности Фурье ( $lg|S|_{fi}^*$ ), а также наши аналогичные по смыслу оценки ( $lg|S|_{fi}$ ), выполненные ранее путем прямых сопоставлений эмпирических данных о спектрах Фурье и соответствующих балльности сотрясений (см. выше).

Таблица 2 / Table 2

**Осредненные характеристики совокупностей спектров реакции ускорений «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд, соответствующих разным интенсивностям сотрясений и аналогичные оценки пиковых амплитуд и спектральных плотностей ускорений колебаний грунта.**

**$SA_{max}$ ,  $SA_{fi}$  и PGA в см/с/с,  $|S|_{fi}^*$  и  $|S|_{fi}$  в см/с,  $f_i$  и  $f_{SA_{max}}$  в Гц /**  
**Averaged characteristics of the totality of the acceleration response spectra of “soft” and “hard” soils in earthquakes of different magnitudes corresponding to different earthquake intensities and similar estimates of peak amplitudes and spectral densities of ground motion accelerations.  $SA_{max}$ ,  $SA_{fi}$  and PGA in cm/s/s,  $|S|_{fi}^*$  and  $|S|_{fi}$  in cm/s,  $f_i$  and  $f_{SA_{max}}$  in Hz**

| Характеристики спектров и амплитуд колебаний грунта /<br>Characteristics of ground motion spectra and amplitudes | Макросейсмическая интенсивность сотрясений /<br>Macroseismic intensity of shaking |       |       |       |       |        |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
|                                                                                                                  | 9MSK                                                                              | 8MSK  | 7MSK  | 6MSK  | 5MSK  | 4MSK   | 3MSK   |
| $SA_{fi}$                                                                                                        | 676                                                                               | 501   | 339   | 159   | 70    | 35     | 18     |
| $f_i$                                                                                                            | 1,0                                                                               | 1,67  | 3,6   | 4,7   | 6     | 7,8    | 10     |
| $SA_{max}$                                                                                                       | 1500                                                                              | 700   | 357   | 159   | 70    | 36     | 18     |
| $f_{SA_{max}}$                                                                                                   | 2,8                                                                               | 3,6   | 3,6   | 4,7   | 6     | 7,8    | 7,8    |
| $lg S _{fi}^*$                                                                                                   | 2,267                                                                             | 1,872 | 1,371 | 0,905 | 0,394 | -0,118 | -0,612 |
| $lg S _{fi}$                                                                                                     | 2,250                                                                             | 1,860 | 1,360 | 0,930 | 0,460 | -0,140 | -0,660 |
| PGA                                                                                                              | 593                                                                               | 285   | 132   | 58,2  | 25,2  | 12,3   | 5,6    |
| $SA_{max}/PGA$                                                                                                   | 2,53                                                                              | 2,46  | 2,70  | 2,73  | 2,78  | 2,93   | 3,21   |

В графическом виде вышесказанное демонстрируется рисунками 2 и 3.

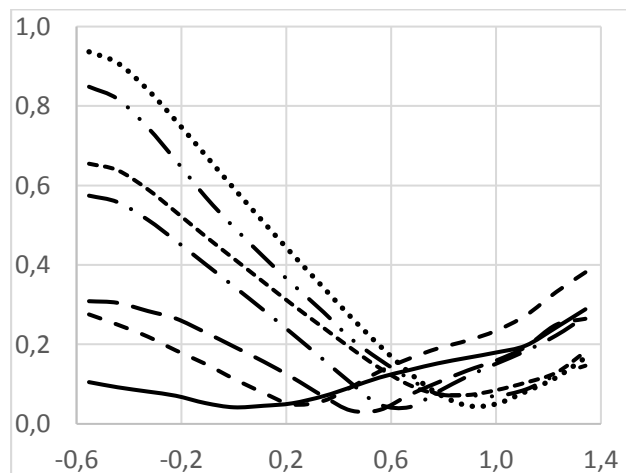


Рис. 2. Стандартные отклонения наиболее вероятных значений  $\lg SA$  (ось ординат) в зависимости от логарифма частоты спектральной составляющей (ось абсцисс), рассчитанные по совокупностям спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд ( $M$ ), отнесенных к разным интенсивностям сотрясений ( $I$ ). Сплошная линия, средний пунктир, длинный пунктир, пунктир с точкой, короткий пунктир, пунктир с двумя точками и точечная линия – оценки для землетрясений с  $I = 9, 8, 7, 6, 5, 4$  и 3 баллов MSK соответственно /

Fig. 2. The standard deviations of the most probable  $\lg SA$  values (ordinate axis) as a function of the logarithm of the frequency of the spectral component (abscissa axis), calculated from the totality of the motion spectra of “soft” and “hard” soils in earthquakes of different magnitudes ( $M$ ), related to different earthquake intensities ( $I$ ). Solid line, medium dotted line, long dotted line, dotted line with a stipple, short dotted line, dotted line with two stipples and stipple line – estimates for earthquakes with  $I = 9, 8, 7, 6, 5, 4$  and 3 MSK points, respectively

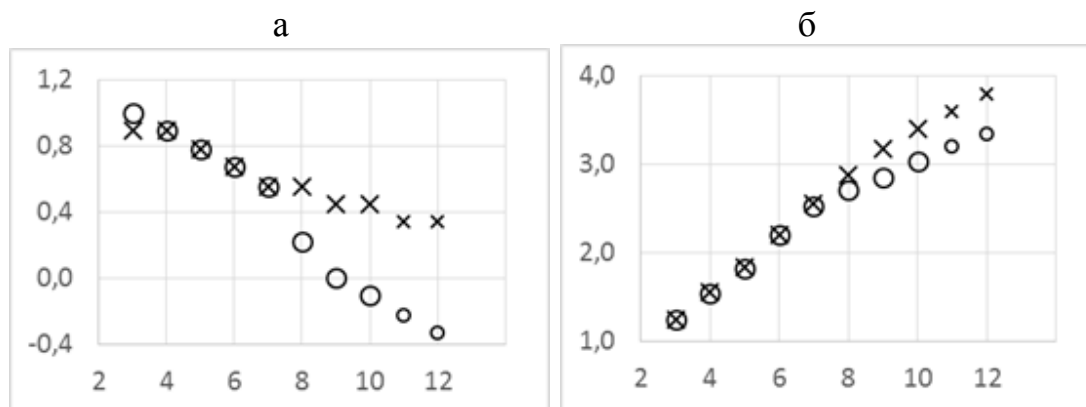


Рис. 3. Характеристики спектров реакции колебаний грунта при землетрясениях разных интенсивностей ( $I$ ): а –  $f_i$  (кружки) и  $f_{SA_{max}}$  (крестики); б –  $SA_{f_i}$  (кружки) и  $SA_{max}$  (крестики).

Оси ординат – логарифмы сравниваемых параметров, где частоты в Гц, спектральные ускорения в см/с/с. Оси абсцисс – IMSK. Большие и малые значки – оценки по данным из таблицы 2 и экстраполяции соответственно /

Fig. 3. Characteristics of the response spectra of ground motions during earthquakes of different intensities ( $I$ ): а –  $f_i$  (circles) and  $f_{SA_{max}}$  (crosses); б –  $SA_{f_i}$  (circles) and  $SA_{max}$  (crosses). The ordinate axes are the logarithms of the compared parameters, where the frequencies are in Hz and the spectral accelerations are in cm/s/s. The abscissa axes – IMSK. The large and small icons are estimates based on data from Table 2 and extrapolation, respectively



Тестирование параметров разработанных моделей  $SA(f, I)$  на внутреннюю и внешнюю согласованность свидетельствует об их реалистичности и надежности. Так, приведенные в таблице 2 и на рисунке 4 модельные оценки  $SA_{\max}/PGA$  настоящего исследования близки к аналогичным эмпирическим оценкам из [Чернов, 2024б]. Значения «ответственных» частот для спектров реакции и для спектров Фурье (см. [Чернов, 1989; 2024а]) практически совпадают. Модельные ( $|S|_{fi}^*$ ) и эмпирические ( $|S|_{fi}$ ) оценки также близки. Коэффициент регрессии  $\lg|S|_{fi}^*$  на  $\lg|S|_{fi}$  равный 0,9902 и достоверность соответствующей линейной аппроксимации равная 0,9963 также говорят об их статистическом совпадении.

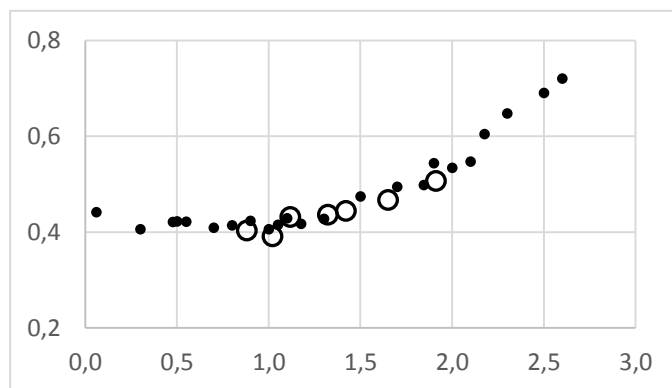


Рис. 4. Сравнение модельных оценок соотношений  $SA_{\max}/PGA$  настоящего исследования (большие пустые кружки) и эмпирических оценок из [Чернов, 2024б] (малые заливные кружки), рассчитанных для разных расстояний до очага ( $D$ ). Ось абсцисс –  $\lg D$ , где  $D$  в км; ось ординат –  $\lg(SA_{\max}/PGA)$  /

Fig. 4. Comparison of model estimates of the  $SA_{\max}/PGA$  ratios of the present study (large empty circles) and empirical estimates from [Chernov, 2024b] (small filled circles) calculated for different distances to the source ( $D$ ). The abscissa axis is  $\lg D$ , where  $D$  is in km; the ordinate axis is  $\lg(SA_{\max}/PGA)$

Таким образом, описанная выше вероятностная зависимость  $I$  от  $SA_{fi}$  обладает подходящими качествами для того, чтобы на ее основе производить оценки макросейсмической интенсивности землетрясений по спектрам реакции колебаний грунта. Для реализации этой возможности разработана соответствующая расчетная модель – функция распределения вероятностей. При построении модели принято, что макросейсмический эффект землетрясения формируется главным образом колебаниями грунта на частотах  $f_i$  и вкладом остальных частот спектра можно пренебречь. Тогда для непревышения балльности ( $I=i$ ) необходимо условие, чтобы наблюдаемые спектральные ускорения на частоте  $f_i$  не превышали уровня приписанного этой балльности ( $SA_{fi}$ ). Это условие необходимое, но недостаточное. Можно показать, что необходимым и достаточным условием непревышения балльности  $I=i$  является условие непревышения наблюдаемым спектром реакции на частоте  $f_i$  уровня  $SA_{fi}$ , а также уровней спектральных ускорений, приписанных сотрясениям большей силы ( $I=j>i$ ) на других частотах, «ответственных» за макросейсмический эффект  $I=j>i$ .

Таким образом, случайное событие – непревышение интенсивности сотрясений  $I=i$  равнозначно совмещению случайных событий: непревышению отдельными спектральными составляющими уровней  $SA$ , приписанных макросейсмической интенсивности  $I=i, i+1, i+2, \dots, i+12$ . В этом случае функция распределения может быть представлена в виде:

$$P[I \leq i] = \prod_{j=i}^{12} \left(1 - \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \int_{x_{\min}}^{x_j} e^{-\frac{(x-a_j)^2}{2\sigma_j^2}} dx\right) \quad (3)$$

Здесь  $a_j$  и  $\sigma_j$  – среднее значение (математическое ожидание) и стандарт величины  $x = \lg SA_{fi}$ ;  $x_j$  – значение логарифма наблюдаемых спектральных ускорений на частоте  $f_j$ ;  $x_{\min}$  – достаточно малая величина.

Для проверки эффективности предложенной модели, с применением выражения (3), произведены расчёты вероятной балльности сотрясений для выборки из 136 событий (землетрясений) в диапазоне  $M=7,7-2,5$ ,  $D=5-250$  км и  $I=10-3$  MSK, для которых имелись спектры реакции ускорений и пиковые ускорения, инструментально зарегистрированные на обеих горизонтальных составляющих записи в сочетании с реально наблюдаемой макросейсмической интенсивностью сотрясений. Используемые в расчетах значения  $SA_{fi}$  приведены в таблице 2. Значения стандартных отклонений с учетом данных из [Чернов, 2024а,б] для всех значений  $\lg SA_{fi}$  приняты равными 0,20.

На рисунке 5 в графическом виде приведены результаты теста, заключающегося в сопоставлении реально наблюдаемых интенсивностей сотрясений ( $I_{\text{наб}}$ ) и полученных с помощью выражения (3) расчетных оценок наиболее вероятных значений балльности ( $I_{SA}$ ). Для сравнения здесь также даны оценки интенсивностей сотрясений ( $I_{PGA}$ ), полученные пересчетом реально зарегистрированных уровней PGA с использованием упомянутых выше традиционных соотношений  $I(PGA)$ .

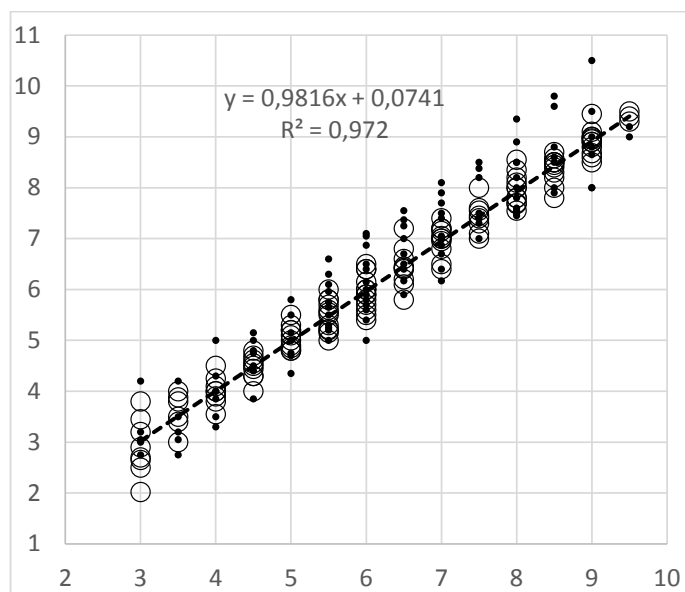


Рис. 5. Сопоставление реально наблюдаемых интенсивностей сотрясений ( $I_{\text{наб}}$ ) с расчетными оценками  $I_{SA}$  (большие пустые кружки) и  $I_{PGA}$  (малые заливные кружки) (пояснения в тексте).

Пунктир – график регрессии  $I_{SA}$  на  $I_{\text{наб}}$  (аналитическое выражение на поле рисунка).

Ось абсцисс –  $I_{\text{наб}}$  в баллах MSK, ось ординат –  $I_{SA}$  и  $I_{PGA}$  в баллах MSK /

Fig. 5. Comparison of the observed in reality motions intensities ( $I_{\text{obs}}$ ) with the calculated estimates of  $I_{SA}$  (large empty circles) and  $I_{PGA}$  (small filled circles) (explanations in the text). The dotted line is the  $I_{SA}$  regression graph for  $I_{\text{obs}}$  (analytical expression in the field of the figure). The abscissa axis is  $I_{\text{obs}}$  in MSK scores, the ordinate axis is  $I_{SA}$  and  $I_{PGA}$  in MSK scores

Данные рисунка 5 (включающие, в том числе, близкий к единице коэффициент регрессии  $I_{SA}$  на  $I_{\text{наб}}$ , степень достоверности аппроксимации и тесноту связи) сви-

детельствуют о высокой степени соответствия модельных определений реальным наблюдениям. На рисунке также видно, что оценки  $I_{PGA}$  по точности значительно уступают определениям  $I_{SA}$ . Это наглядно иллюстрирует рисунок 6, где приводятся стандартные отклонения индивидуальных оценок  $I_{SA}$  и  $I_{PGA}$  (рис. 5), отнесенных к различным уровням  $I_{наб}$ . Так, например, видно, что стандартные отклонения оценок  $I_{PGA}$  в среднем в 1,76 раза выше, чем аналогичный показатель для  $I_{SA}$ .

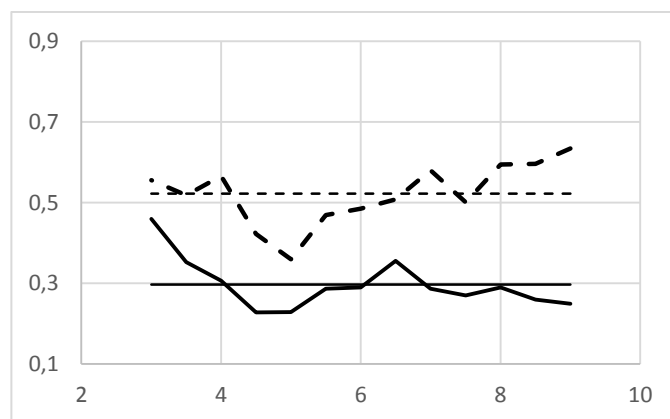


Рис. 6. Стандартные отклонения расчетных значений  $I_{SA}$  (сплошные линии) и  $I_{PGA}$  (пунктир) относительно разных уровней интенсивности сотрясений при реальных землетрясениях ( $I_{наб}$ ). Толстые ломаные линии – оценки для отдельных значений  $I_{наб}$ , тонкие прямые линии – средние значения по всему диапазону  $I_{наб}$ . Ось абсцисс – интенсивности  $I_{наб}$  в баллах MSK; ось ординат – стандартные отклонения  $I_{SA}$  и  $I_{PGA}$  в баллах MSK.

Fig. 6. Standard deviations of the calculated  $I_{SA}$  (solid lines) and  $I_{PGA}$  (dotted line) values relative to different levels of earthquake intensity in real earthquakes ( $I_{obs}$ ). Thick broken lines are estimates for individual  $I_{obs}$  values, thin straight lines are averages over the entire  $I_{obs}$  range, the abscissa axis is the intensity of  $I_{obs}$  in MSK scores; the ordinate axis is the standard deviations of  $I_{SA}$  and  $I_{PGA}$  in MSK scores.

Принимая во внимание, что статистические соотношения  $SA_{ff}(I)$  оказались близкими к аналогичным оценкам, для спектров Фурье, сделано предположение, что для обоих этих случаев применима общая физическая интерпретация. Подробное ее описание дано в [Чернов, 1989]. Здесь приведем основные тезисы.

В шкале MSK, как и в большинстве других шкал сейсмической интенсивности используются три группы макросейсмических признаков, характеризующие сейсмические движения разной природы и масштаба. Первая группа, связанная с сотрясениями небольшой интенсивности (2–5 баллов), включает в основном реакцию людей, поведение относительно небольших предметов, различные мелкие повреждения. Такие признаки характерны для короткопериодных сейсмических воздействий. Во второй группе признаков (интенсивность сотрясений 6–9 баллов) в основном используются реакции более крупных объектов (зданий, сооружений и их отдельных частей), которые уже не могут происходить без участия более длиннопериодных колебаний. Самые же сильные макросейсмические эффекты – перемещения геоморфологических элементов, образование крупных обвалов, разрывов и т.п. (третья группа признаков), сопровождающие сотрясения силой более 9 баллов – невозможны без участия ещё более низкочастотных сейсмических воздействий. То есть наблюдаемое в наших опытах понижение «ответственных» частот при росте  $I$  объясняется устройством самих макросейсмических шкал. Таким образом, разные уровни интенсивности землетрясений (как их определяют макросейсмические

шкалы) порождаются сейсмическими движениями разного масштаба (точнее разными пропорциями этих движений).

Аналогичная логика применима и к землетрясениям, относящимся к средней, наиболее важной с практической точки зрения, части макросейсмических шкал ( $I=6-9$  MSK). Наблюдаемое здесь снижение  $f_i$  при росте  $I$  также можно связать с реакцией объектов (зданий и сооружений), служащей индикатором той или иной интенсивности сотрясений. Так, например, при 6-балльных землетрясениях обычно наблюдаются повреждения мелких деталей (трещины в углах, простенках и т.п.), которые могут быть вызваны короткопериодными колебаниями. При более сильных 7–8-балльных землетрясениях вероятны более крупные повреждения – обрушение стен, перекрытий и т.д., связанные (при условии параллельной «подготовки» объекта более высокочастотными составляющими общего спектра колебаний) с более длиннопериодными воздействиями достаточной интенсивности. При еще более сильных землетрясениях происходит полное разрушение конструкций под воздействием кроме уже упомянутых высокочастотных и среднечастотных сейсмических колебаний еще и достигших достаточной интенсивности более длиннопериодных движений.

Описанная схема нарастания макросейсмического эффекта не противоречит излагаемым нами ранее представлениям об изменении свойств (например, увеличении периодов собственных колебаний) самих подвергающихся сейсмическим воздействиям объектов. Такие изменения происходят из-за того, что в изначально «целом» здании или сооружении, обладающем преимущественно свойствами упругого тела, по мере возрастания сейсмических нагрузок, появляются сначала небольшие, а потом все возрастающие дефекты, из-за чего деформации объекта становятся все больше не пропорциональными напряжениям – появляются «пластические шарниры». В этих шарнирах для дальнейшего накопления деформаций (т.е. макросейсмических дефектов более высокого уровня) уже недостаточно просто повышать напряжения (ускорения), а нужно также «закачивать» в них все больше энергии, т.е. повышать скорости колебаний. А интенсивные скорости сейсмических колебаний грунта при землетрясениях, как известно, имеют более длительные периоды, чем интенсивные ускорения.

Таким образом, повышение уровня макросейсмических эффектов можно представить как сочетание роста макросейсмических дефектов одного (более низкого) масштабного уровня, происходящего под воздействием возрастающей интенсивности относительно высокочастотных колебаний, и последующего перехода на другой (более высокий) масштабный уровень макросейсмических дефектов под воздействием достигших достаточной интенсивности относительно низкочастотных колебаний.

Наряду с описанным сходством, модели  $SA(f, I)$  и  $|S|(f, I)$  имеют и существенные отличия. Так (см. табл. 2 и рис. 3) при  $I=3-7$  MSK значения  $f_i$  и  $f_{SA_{max}}$ , а также соответствующие этим частотам уровни  $SA_{fi}$  и  $SA_{max}$  практически совпадают. При  $I>7$  MSK по мере роста  $I$  частоты  $f_{SA_{max}}$  начинают все больше превышать частоты  $f_i$ . Также ведут себя и уровни спектров  $SA_{max}$  по отношению к  $SA_{fi}$ . Частоты же, на которых наблюдаются максимальные уровни спектральной плотности Фурье, наоборот, близки к «ответственным» частотам при  $I>7$  MSK. По мере же уменьшения  $I$  эти частоты все больше расходятся (в сторону уменьшения) с «ответственными» частотами и при  $I=3$  MSK становятся примерно в 2,5 раза меньшими, чем соответствующие значения  $f_i$ . При интенсивностях  $I>7$  MSK максимальные уровни



$|S|$  ( $|S|_{\max}$ ) в отличие от уровней  $SA_{\max}$  близки к значениям  $|S|$  на «ответственных» частотах ( $|S|_{fi}$ ). При  $I \leq 7$  MSK по мере уменьшения  $I$  уровни  $|S|_{\max}$  также в отличие от значений  $SA_{\max}$  начинают все больше отличаться (в сторону увеличения) от уровней  $|S|_{fi}$  и при  $I=3$  MSK становятся примерно в 2,5 раза большими, чем соответствующие значения  $|S|_{fi}$ .

Оценивая результаты настоящего исследования с практической точки зрения следует обратить внимание также и на то, что спектры ускорений реакции колебаний грунта при одних и тех же значениях балльности сотрясений в зависимости от  $M$  и  $D$  могут иметь существенно разную форму и разные уровни  $SA(f)$ . Форма спектров зависит также и от уровня  $I$ . Эти вариации уровней спектральных ускорений могут достигать нескольких сотен и более процентов (см. рис. 1 и табл. 2). В то же время в российских строительных нормативах, а также в нормативах некоторых других стран для расчетов на сейсмостойкость используются спектры реакции (произведения нормативных или эффективных ускорений на коэффициенты динамичности) форма которых стандартна и одинакова для всех уровней  $I$  (есть только небольшое различие формы для разных типов грунтов). Очевидно, что расчеты, основанные на таких нормативных спектрах, могут содержать значительные ошибки.

### Выводы

1. В общем спектре реакции колебаний грунта существуют «ответственные» частоты, не зависящие от  $M$  и  $D$  и свои для каждого уровня  $I$ , на которых значения  $SA$  значительно более тесно связаны с  $I$ , чем спектральные ускорения на других частотах.

2. Разработанная на основе установленных статистических соотношений между  $SA(f)$  и  $I$  модель (функция распределения вероятностей) позволяет оценивать макросейсмическую балльность землетрясений по спектру реакции более точно, чем с помощью других традиционно используемых для этих целей параметров колебаний грунта.

3. Установленная значительная вариабельность спектров реакции колебаний грунта при одной и той же балльности сотрясений ставит вопрос о совершенствовании отечественных строительных нормативов в данном направлении.

### Литература

1. 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. – 2024а. – Т. 14. № 1. – С. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002.
2. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных. // Геология и Геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 2. – С. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004.
3. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. / Гл. редакторы В.Н. Страхов, В.И. Уломов. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.
4. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат. 1962. – 284 с.
5. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности. // Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1968. – С. 158–162.

6. Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии: коллективная монография. / Труды VIII Международной конференции. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – 477 с.
7. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Доцев Н.Т., Саргсян Н.М. Макросейсмическая магнитуда. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1989. – Вып. 30. «Оценка эффекта сильных землетрясений». – С. 98–110.
8. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. – 279 с.
9. Сейсмическое микрорайонирование. / Отв. редактор С.В. Медведев. – М.: Наука, 1977. – 248 с.
10. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. Ташкент: ФАН», 1989. – 295 с.
11. Чернов Ю.К. Эмпирические модели для вероятностных оценок спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024a. – Т. 14. № 2. – С. 90–106. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007.
12. Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024b. – Т. 14. № 4. – С. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010.
13. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1993. – Вып. 34. – С. 5–94.
14. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical relationships between modified Mercalli intensity, and response spectra. // BSSA. – 2000. – Vol. 90(2). – pp. 533–544.
15. Caprio M., Tarigan B., Worden B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A Global relationship and evaluation of regional dependency. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2015. – Vol. 105. No. 3. – pp. 1476–1490. DOI: 10.1785/0120140286.
16. Du K., Ding B., Luo H., Sun J. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and macroseismic intensity in Western China. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2019. – Vol. 109. No. 1. – pp. 284–297. DOI: 10.1785/0120180216.
17. Nemati M. Relationships between modified Mercalli intensity and engineering ground-motion of the earthquakes in Persia. // Journal of Earthquake Engineering. – 2015. DOI: 10.1080/13632469.2015.1104751.
18. Sokolov V. Three techniques for estimation of Instrumental Intensity: a comparison. // In: Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13). 2013. Jeju, Korea, pp. 574–591.
19. Worden C.B., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A., Wald D.J. Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2012. – Vol. 102. No. 1. – pp. 204–221.
20. Yaghmaei-Sabegh S., Tsang H.H., Lam N.T.K. Conversion between peak ground motion parameters and modified Mercalli intensity values. // Journal of Earthquake Engineering. – 2011. – Vol. 15. No. 7. – pp. 1138–1155.

## References

1. 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*. 2024a. Vol. 14. No. 1. pp. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002. (In Russ.)
2. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geocological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024b. Vol. 14. No. 2. pp. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004. (In Russ.)
3. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas. Eds. V.N.

Strakhov, V.I. Ulomov. Moscow. OIPE RAS. 1999. 57 p. (In Russ.)

4. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (In Russ.)

5. Medvedev S.V. International scale of seismic intensity. Seismic zoning of the territory of the USSR. Moscow. Nauka. 1968. pp. 158–162. (In Russ.)

6. Hazardous natural and anthropogenic processes in mountainous regions: models, systems, technologies: collective monograph. In Proc. of the VIII Int. Conf. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. 477 p. (In Russ.)

7. Rautian T.G., Khalturin V.I., Dotsev N.T., Sargsyan N.M. Macroseismic magnitude. Problems of Engineering Seismology. 1989. Issue 30. Assessment of the effect of strong earthquakes. pp. 98–110. (In Russ.)

8. Seismic scale and methods of measuring seismic intensity. Moscow. Nauka. 1975. 279 p. (In Russ.)

9. Seismic microzonationg. Ed. S.V. Medvedev. Moscow. Nauka. 1977. 248 p. (In Russ.)

10. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic hazard of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 295 p. (In Russ.)

11. Chernov Yu.K. Empirical models for probabilistic estimates of the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes. Geology and Geophysics of Russian South. 2024a. Vol. 14. No. 2. pp. 90–106. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007. (In Russ.)

12. Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. Geology and Geophysics of Russian South. 2024b. Vol. 14. No. 4. pp. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010. (In Russ.)

13. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods of seismic impact assessment (manual). Problems of Engineering Seismology. 1993. Issue 34. pp. 5–94. (In Russ.)

14. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical relationships between modified Mercalli intensity, and response spectra. BSSA. 2000. Vol. 90(2). pp. 533–544.

15. Caprio M., Tarigan B., Worden B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICES): A Global relationship and evaluation of regional dependency. Bulletin of the Seismological Society of America. 2015. Vol. 105. No. 3. pp. 1476–1490. DOI: 10.1785/0120140286.

16. Du K., Ding B., Luo H., Sun J. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and macroseismic intensity in Western China. Bulletin of the Seismological Society of America. 2019. Vol. 109. No. 1. pp. 284–297. DOI: 10.1785/0120180216.

17. Nemati M. Relationships between modified Mercalli intensity and engineering ground-motion of the earthquakes in Persia. Journal of Earthquake Engineering. 2015. DOI: 10.1080/13632469.2015.1104751.

18. Sokolov V. Three techniques for estimation of Instrumental Intensity: a comparison. In: Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13). 2013. Jeju. Korea. pp. 574–591.

19. Worden C.B., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A., Wald D.J. Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California. Bulletin of the Seismological Society of America. 2012. Vol. 102. No. 1. pp. 204–221.

20. Yaghmaei-Sabegh S., Tsang H.H., Lam N.T.K. Conversion between peak ground motion parameters and modified Mercalli intensity values. Journal of Earthquake Engineering. 2011. Vol. 15. No. 7. pp. 1138–1155.

УДК: 550.8

DOI: 10.46698/h5824-2216-9804-y

Оригинальная статья

## Применение метода дистанционной флюидоиндексации для прогноза и поисков эндогенного оруденения

С.Г. Парада<sup>1</sup>, Д.Б. Давыденко<sup>2</sup>, К.Ю. Гамбург<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: segripa@rambler.ru;

<sup>2</sup> Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: maurmar@yandex.ru

Статья поступила: 17.10.2025, доработана: 27.11.2025, принята к публикации: 01.12.2025

**Резюме:** Актуальность обусловлена необходимостью разработки новых методов прогноза и поисков, не выходящих на земную поверхность рудных полезных ископаемых, особенно в труднодоступных районах. **Цель.** Определить возможность использования метода дистанционной флюидоиндексации (МДФ), разработанного для обнаружения углеводородных скоплений, в районах проявления эндогенного оруденения металлов. **Материал и методы.** Основу МДФ составляют авторские алгоритмы математических преобразований спектральных космических снимков, приводящих к избавлению от ландшафтных помех и усилению полезного сигнала от эндогенных рудных объектов путем суммирования аномальных эффектов, полученных в различных спектральных диапазонах. Значения яркости в каждой зоне спектра рассматриваются в качестве отдельных факторов, сумма которых связана с интенсивностью насыщения почвенно-растительного слоя углеводородными газами (легкими и (или) тяжелыми). Степень насыщения обозначается индексом флюидонасыщения легкими или тяжелыми углеводородами (ИФЛ или ИФТ). Многофакторность получаемых материалов обеспечивает возможность решения задачи выделения эндогенных аномалий на фоне ландшафтных помех. Используются цифровые снимки с американского спутника Landsat 7, сделанные в разные годы. **Результаты.** Полученные аномалии ИФЛ в исследуемых районах, согласно результатам поисковых работ и металлогенических исследований, интерпретируются как обусловленные ареалами эндогенной флюидизации верхних горизонтов литосферы, связанных с возникновением и эволюцией рудно-магматических систем. Применение технологии МДФ позволило установить признаки современной флюидоактивности юрских рудно-магматических систем Донецкого складчатого сооружения (ДСС) и связанных с ними золоторудных минерализаций. Показано, что появление метановых аномалий, обнаруженных с помощью МДФ, обусловлено взаимодействием водорода с углеродом угольных пластов в условиях высоких температур. Применение МДФ в пределах Тырныаузского рудного узла позволило установить признаки современной флюидоактивности плиоцен-зоплейстоценовой рудно-магматической системы. Показано, что контур наиболее обширной и наиболее интенсивной аномалии ИФЛ совпадает с проекцией гипоцентральной области, выявленного по геофизическим данным магматического очага. Именно на пути водородсодержащего флюидопотока, при взаимодействии с карбонатными породами в условиях высоких температур, сформировалось наибольшее количество шеелитовых руд. При термическом разложении карбонатов углекислота взаимодействовала с водородом, образуя метан. Таким образом, подтверждена возможность использования МДФ для прогноза и поисков эндогенного оруденения.

**Ключевые слова:** поиски полезных ископаемых, золото, спектральные космические снимки, метод дистанционной флюидоиндексации, водород, метан, Донбасс, Тырныауз.

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

**Для цитирования:** Парада С.Г., Давыденко Д.Б., Гамбург К.Ю. Применение метода дистанционной флюидоиндексации для прогноза и поисков эндогенного оруденения. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 112–121. DOI: 10.46698/h5824-2216-9804-y



DOI: 10.46698/h5824-2216-9804-y

Original paper

# Application of the remote fluid indexing method for forecasting and prospecting for endogenous mineralization

S.G. Parada<sup>1</sup>, D.B. Davydenko<sup>2</sup>, K.Yu. Gamburg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz, 362002, Russian Federation,  
e-mail: segripa@rambler.ru;

<sup>2</sup>Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,  
Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation, e-mail: maurmar@yandex.ru

Received: 17.10.2025, revised: 27.11.2025, accepted: 01.12.2025

**Abstract:** The relevance is due to the need to develop new methods for forecasting and prospecting concealed (blind) ore deposits, especially in hard-to-reach regions. **Aim.** To determine the possibility of using the remote fluid indexing (RFI) method, developed to detect hydrocarbon accumulations in areas of endogenous metal mineralization. **Materials and methods.** The core of the RFI method is based on the author's algorithms for mathematical transformations of spectral satellite images. These algorithms aim to eliminate landscape noise and amplify the useful signal from endogenous ore objects by summing anomalous effects obtained in various spectral ranges. The brightness values in each zone of the spectrum are considered as separate factors, the sum of which is related to the intensity of saturation of the soil and vegetation layer with hydrocarbon gases (light and (or) heavy). The degree of saturation is indicated by the index of fluid saturation with light or heavy hydrocarbons (IFL or IFH). The multifactorial nature of the obtained materials makes it possible to solve the problem of identifying endogenous anomalies against the background of landscape interference. Digital images from the American Landsat 7 satellite taken in different years are used. **Results.** The obtained IFL anomalies in the studied areas, according to the results of prospecting and metallogenic studies, are interpreted as being caused by areas of endogenous fluidization of the upper horizons of the lithosphere associated with the emergence and evolution of ore-magmatic systems. The use of RFI technology has made it possible to establish signs of modern fluid activity of the Jurassic ore-magmatic systems of the Donetsk Folded Structure (DFS) and associated gold mineralization. It is shown that the appearance of methane anomalies detected by RFI is due to the interaction of hydrogen with carbon from coal seams at high temperatures. The use of RFI within the Tyrnyauz ore node revealed signs of modern fluid activity of the Pliocene-Eopleistocene ore-magmatic system. It is shown that the contour of the most extensive and most intense IFL anomaly coincides with the projection of the hypocentral region identified by the geophysical data of the magmatic hearth. It was on the path of the hydrogen-containing fluid flow, when interacting with carbonate rocks at high temperatures, that the largest amount of scheelite ores was formed. During the thermal decomposition of carbonates, carbonic acid reacted with hydrogen to form methane. Thus, the feasibility of using the RFI method for forecasting and prospecting endogenous mineralization has been confirmed.

**Keywords:** mineral prospecting, gold, spectrozonal satellite images, remote fluid indexing method, hydrogen, methane, Donbass, Tyrnyauz.

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

**For citation:** Parada S.G., Davydenko D.B., Hamburg K.Yu. Application of the remote fluid indexing method for forecasting and prospecting for endogenous mineralization. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2025. 15(4): 112–121. DOI: 10.46698/h5824-2216-9804-y

## Введение

На поисковое значение природных газов в рудных месторождениях исследователи стали обращать внимание с начала прошлого века. Проявления метана отмечались в железных, свинцовых, апатитовых, золотых и полиметаллических рудниках, а также при разработке некоторых россыпных месторождений. Общеизвестно, что многие эндогенные месторождения тяготеют к зонам повышенной флюидизации земной коры. По представлениям петрологов, дегазация ядра и мантии Земли может приводить к выносу металлов вместе с потоками водорода. Предполагается, что именно сосредоточенные потоки водорода, несущие в своем составе металлы, приводят к зарождению и эволюции рудно-магматических систем, появлению рудных районов, рудных узлов и рудных полей [Letnikov, 2001; Летников, 2006; Sun et al., 2012; Шестопалов, Макаренко, 2013, 2014].

Поскольку водород весьма подвижен, то следы его самого в пределах этих рудных объектов, скорее всего не будут обнаружены. Однако, в геодинамической обстановке сжатия земной коры создаются условия, препятствующие потере водорода из восходящих флюидных потоков, вследствие чего они приобретают способность генерировать углеводороды ( $8\text{H}_2 + 2\text{CO} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{C}$ ) и создавать при охлаждении нефтяные и газовые залежи [Маракушев, Русинов, 2005; Маракушев, Маракушев, 2008]. В иных геодинамических обстановках в случае потока через углеродсодержащую среду водород может взаимодействовать с углеродом и при определенных термодинамических и (или) физико-химических условиях будет образовываться метан и другие углеводородные соединения, менее подвижные, чем водород. Поэтому в пределах рудных районов, рудных узлов и рудных полей, где развиты углеродсодержащие и (или) карбонатные породы следует ожидать проявления углеводородных (прежде всего метановых) аномалий. В таком случае появляется теоретическая основа применения методов прогнозирования и поисков рудных объектов, разработанных для прогноза и поисков углеводородного сырья.

Одним из таких методов является метод дистанционной флюидоиндексации (МДФ), опыт применения которого изложен в публикациях [Давыденко, Финкельштейн, 2004; Матишов и др., 2010; и др.].

## Материал и методы

МДФ, используя комплекс математических преобразований спектрзональных космических снимков, ориентирован на гашение ландшафтных помех и выявление оптического эффекта, обусловленного углеводородными аномалиями. Значения яркости в каждой зоне спектра рассматриваются нами в качестве отдельных факторов. Многофакторность получаемых материалов обеспечивает возможность решения поставленной задачи выделения эндогенных аномалий на фоне ландшафтных помех.

В качестве исходных данных использованы цифровые космические снимки с американского спутника Landsat 7, выполненные в семи зонах спектра в разные годы. Математическая обработка спектрзональных спутниковых снимков осуществлялась в среде ГИС ИНТЕГРО, разработанной ВНИИ ГЕОСИСТЕМ для обработки исходной геофизической информации и разделения её на составляющие разного порядка.

Технология МДФ подразделяется на два основных блока. Первый предназначен для решения задачи гашения ландшафтных помех, обусловленных экзогенными факторами, второй – для выделения собственно эндогенных аномалий после ис-

ключения «ландшафтных» помех. Схема решения первой задачи достаточно сложна и зависит от конкретных ландшафтных особенностей исследуемой площади.

Процедура снятия помех на примере базовой модели состоит в следующем. Пусть две площадки засняты в соседних зонах спектра. Значения разности фототона этих двух снимков (в одних и тех же точках площади) в случае отсутствия углеводородной аномалии (УВА), продуцируемой углеводородными газами, на первой площадке существенно меньше (близки к некоторой константе или ниже ее), чем в случае наличия УВА в пределах второй площадки, где значения разности выше этой константы. Это и обуславливает появление аномальных значений индекса флюидонасыщения во второй точке. Эта модель является основным элементом вычислительных модулей, комбинируемых (с учетом многофакторности используемой информации) для создания поля поправок – «ландшафтной маски».

По результатам фильтрации «ландшафтных» помех получаем массивы данных, в которых вклад эндогенных факторов в соответствующих спектральных зонах более значим. Однако в этом массиве еще сохраняются остаточные «ландшафтные» помехи (шум). Дальнейшее гашение шума и усиление полезного сигнала (второй этап преобразования исходной информации) осуществляется с привлечением формальных статистических методов, используемых в геофизике для выделения аномалий на уровне помех. Вычисляемый окончательно параметр назван индексом флюидонасыщения – ИФ. При прогнозировании залежей углеводородов он рассчитывается отдельно для газовых (легких) фракций (ИФЛ) и отдельно для жидких (тяжелых) фракций (ИФТ). То же самое можно делать при прогнозе рудных образований.

## Результаты и обсуждение

В результате исследований нефтегазоносных районов Юга России, с целью прогноза углеводородного сырья на основе МДФ, проявились относительно крупные аномалии лёгких углеводородов на участках Донецкого складчатого сооружения (ДСС), в пределах которых нет, и не может быть залежей углеводородов. Объяснения такому феномену в то время не было найдено. К настоящему времени проведено сопоставление выявленных аномалий с результатами поисковых работ на золото в ДСС (рис. 1).

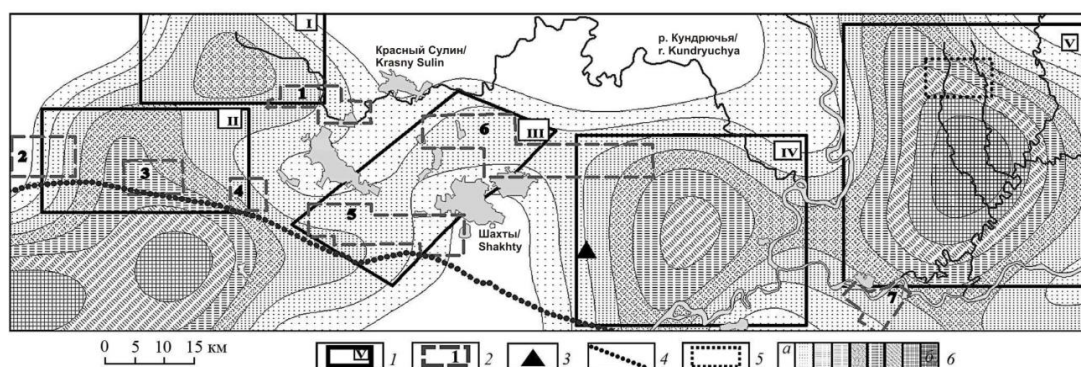


Рис. 1. Ареалы эндогенной флюидизации на площади Донецкого складчатого сооружения:  
 1 – ареалы эндогенной флюидизации: I – Галутинский, II – Барило-Крепинский, III – Кадамовский, IV – Керчикский, V – Россошанский; 2 – площади поисковых и геологоразведочных работ, в пределах которых выявлены рудопроявления золота: 1 – Галутинская, 2 – Тузловская, 3 – Барило-Крепинская, 4 – Болдыревская, 5 – Аютинская, 6 – Кадамовская, 7 – Кондаковская; 3 – Керчикское рудопроявление; 4 – южная граница «открытого» Донбасса; 5 – контуры Северо-Кондаковской поисковой площади; 6 – шкала интенсивности аномалий флюидонасыщения (а – минимальные, б – максимальные значения)/

*Fig. 1. Areas of endogenous fluidization on the area of the Donetsk folded structure: 1 – areas of endogenous fluidization: I – Galutinsky, II – Barilo-Krepinsky, III – Kadamovsky, IV – Kerchiksky, V – Rossoshansky; 2 – areas of prospecting and exploration within which gold ore occurrences were detected: 1 – Galutinskaya, 2 – Tuzlovskaya, 3 – Barilo-Krepinskaya, 4 – Boldyrevskaya, 5 – Ayutinskaya, 6 – Kadamovskaya, 7 – Kondakovskaya; 3 – Kerchik ore occurrence; 4 – southern border of the “open” Donbass; 5 – contours of the North Kondakovskaya search area; 6 – scale of intensity of fluid saturation anomalies (a – minimum, b – maximum values)*

В результате, в контурах флюидных аномалий оказались магматические породы, ареалы гидротермально-метасоматических преобразований, рудопроявления и пункты минерализации золота, свинца, цинка и др. металлов, т. е., потенциальные рудные узлы, представленные в ретроспективе рудно-магматическими системами [Парада, Гамбург, 2023]. В связи с чем, выявленные аномалии флюидонасыщения стали рассматриваться нами как ареалы эндогенной флюидизации. Справедливость такой интерпретации подтверждается обнаружением подобных метановых аномалий в районах действующих и уснувших вулканов, в частности на Эльбрусе [Гурбанов и др., 2011]. С помощью МДФ нами выявлена современная флюидоактивность также в районе неоген-четвертичной Тырныаузской рудно-магматической системы, представленной в настоящее время Тырныаузским рудным узлом.

Тырныаузский рудный узел включает собственно Тырныаузское W-Мо месторождение, Малотырныаузское Sb месторождение, золоторудное месторождение имени Б.К. Михайлова, рудопроявления Sn, Au, Cu. Территория охватывает восточную часть структурно-формационной зоны (СФЗ) Передового хребта, с юга захватывает часть СФЗ Главного хребта, с севера – часть Шаукамнысыртской СФЗ. Геологические образования представлены метаморфическими комплексами протерозоя (PR<sub>2</sub>), палеозойскими терригенным (D<sub>1</sub>), вулканогенным (D<sub>2</sub>), карбонатным (D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>) комплексами и молассой (C<sub>1</sub>), а также интрузивными комплексами PR<sub>2</sub>, PZ<sub>2</sub> и PZ<sub>3</sub>, MZ и KZ [Пэк, 1962; Родзянко, 1973].

Основу Тырныаузского рудного узла составляет тырныаузский плиоцен-эоплейстоценовый комплекс малых интрузий гипабиссальных гранитоидов. В его составе выделяются несколько разорванных во времени фаз: первая – дайки, штоки лейкократовых плагиогранитов, вторая – эльджуртинские граниты, третья – неки, дайки гранит-порфиров и риолитов [Ляхович, 1976; Бубнов и др., 2011; Soloviev et al., 2021]. По наличию ксенолитов гранодиоритов в эльджуртинских гранитах предполагается, что формирование неointрузий комплекса началось с внедрения магмы гранодиоритового состава, во внешний магматический очаг, где и произошло становление крупного интрузивного массива, который не вскрыт эрозией. Со становлением этого массива, скорее всего, связано формирование ореола ороговикования, рудоносных скарнов и роговиков. Наличие подобного интрузивного массива связывается с отрицательной аномалией силы тяжести, выявленной нами по результатам оцифровки и переинтерпретации данных гравитационных съемок. Изометричная в плане аномалия имеет диаметр эпицентральной части около 5 км и в её контурах располагается Тырныаузский рудный узел. По результатам микросейсмического зондирования [Rogozhin et al., 2015] на глубинном вертикальном разрезе Эльбрус – Тырныауз проявились флюидонасыщенные трещиноватые слои, магматические каналы, магматические камеры. Непосредственно под центральной частью рудного узла присутствуют зоны пониженных скоростей. Зона, расположенная в диапазоне глубин 7–12 км отождествлена с близповерхностной магматической камерой [Milyukov et al., 2018].



В пределах изученной с помощью технологии МДФ площади Тырныаузского рудного узла выделено 10 аномалий ИФЛ разного размера и разной интенсивности (рис. 2).

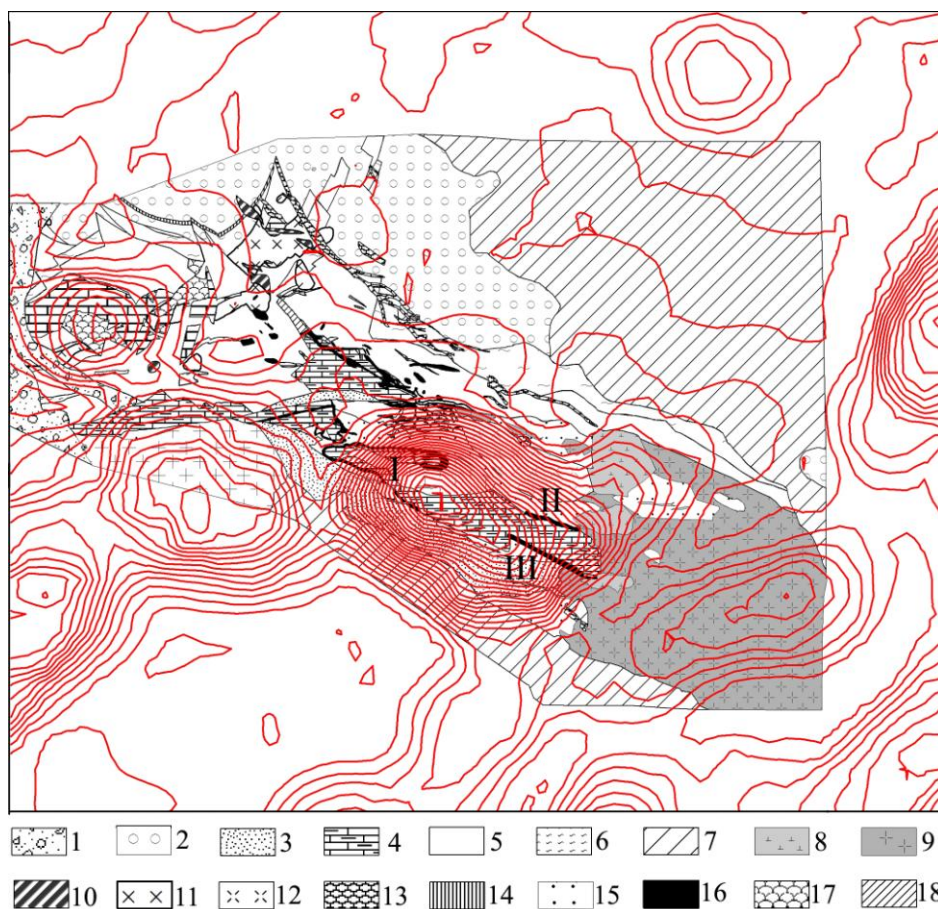


Рис. 2. Положение аномалий индекса флюидонасыщения легкими углеводородными газами (красные изолинии) относительно геологических комплексов и рудных скарнов Тырныаузского рудного узла: 1 – четвертичные отложения; 2 – нижнекаменноугольная моласса (гравелиты, конгломераты, песчаники); 3 – юрские глинисто-алевритовые сланцы, ороговикованные; 4 – верхнедевонско-нижнекаменноугольные известняки, глинистые известняки, мраморизованные; 5 – среднедевонские вулканиты (андезиты, лавы, туфы); 6 – нижнедевонские филлиты и филлитовидные сланцы; 7 – протерозойские кристаллические сланцы; 8–10 – тырныаузский плиоцен-эоплейстоценовый комплекс малых интрузий гипабиссальных гранитоидов: 8 – риолиты, 9 – эльджуртинские граниты, 10 – лейкократовые и аплитовидные граниты; 11 – позднепалеозойские кварцевые диориты; 12 – среднепалеозойские трондьемиты; 13 – палеозойские серпентиниты; 14 – милониты; 15 – биотитовые роговики; 16 – скарны (в том числе рудоносные: I, II, III – главные рудные скарны Тырныаузского вольфрам-молибденового месторождения); 17 – кварц-карбонатные метасоматиты по ультраосновным породам; 18 – золотоносные метасоматиты/

Fig. 2. The position of anomalies in the index of fluid saturation with light hydrocarbon gases (red isolines) relative to geological complexes and ore skarns of the Tyrnyauz ore node: 1 – Quaternary deposits; 2 – Lower Carboniferous molasse (gravelites, conglomerates, sandstones); 3 – Jurassic clay-siltstone shales, horny; 4 – Upper Devonian-Lower carboniferous limestones, clayey limestones, marbled; 5 – Middle Devonian volcanics (andesites, lavas, tuffs); 6 – Lower Devonian phyllites and phyllite-like shales; 7 – Proterozoic crystalline shales; 8-10 – Tyrnyauz Pliocene–Eopleistocene complex of small intrusions of hypabyssal granitoids: 8 – rhyolites, 9 – Eljurtia granites, 10 – Leucocratic and aplitic granites; 11 – Late Paleozoic quartz diorites; 12 – Middle Paleozoic trondjemites; 13 – Paleozoic serpentinites; 14 – mylonites; 15 – biotite hornstones; 16 – skarny (in including ore-bearing rocks: I, II, III – the main ore rocks of the Tyrnyauz tungsten–molybdenum deposit); 17 – quartz–carbonate metasomatites from ultrabasic rocks; 18 – gold-bearing metasomatites

Доминирует одна аномалия, – самая обширная (6 км<sup>2</sup>) и самая интенсивная, при том, что размеры и интенсивность остальных аномалий в 2 и более раз меньше. Эта аномалия ИФЛ приурочена к эпицентру минимума силы тяжести, связываемого с очагом неинтрузий тырнаузского комплекса. Она также совпадает с выходом известняков верхнепалеозойского карбонатного комплекса. И своей центральной зоной совпадает с наиболее богатыми залежами шеелитовых руд Тырнаузского месторождения. Описываемая аномалия в своей юго-восточной части усложняется вытянутостью в северо-восточном направлении, скорее всего, в соответствии с наличием вытянутого в том же направлении штока эоплейстоценовых липаритов – представляющих наиболее позднюю фазу тырнаузского неинтрузивного комплекса.

Из остальных девяти аномалий только одна совпадает с выходом эльджуртинских гранитов тырнаузского неинтрузивного комплекса, две аномалии располагаются в поле позднепалеозойских гранитов, одна – известняков. В эпицентре еще одной аномалии располагается рудопоявление золота. В целом, можно сделать вывод, что аномалии ИФЛ не имеют связи непосредственно с выходами на дневную поверхность неинтрузий, а обусловлены потоками водородсодержащих флюидов непосредственно из магматического очага. При взаимодействии с карбонатными породами в условиях повышенных температур образуется метан, который и фиксируется с помощью МДФ.

### Заключение

Применение технологии МДФ позволило установить признаки современной флюидоактивности юрских рудно-магматических систем Донецкого складчатого сооружения (ДСС) и тырнаузской плиоцен-эоплейстоценовой рудно-магматической системы СФЗ Передового хребта, выраженных аномалиями индекса флюидонасыщения легкими углеводородами (ИФЛ).

В контурах выявленных аномалий ИФЛ ДСС располагаются эндогенные потенциально золоторудные узлы, формирование которых связано с зарождением и эволюцией юрских рудно-магматических систем на пути глубинных водородсодержащих флюидопотоков. Появление метановых аномалий, обнаруженных с помощью МДФ, обусловлено взаимодействием водорода с углеродом угольных пластов в условиях высоких температур.

В пределах Тырнаузского рудного узла контур наиболее обширной и наиболее интенсивной аномалии ИФЛ совпадает с проекцией гипоцентральной области, выявленного по геофизическим данным магматического очага. Именно на пути водородсодержащего флюидопотока, при взаимодействии его с карбонатными породами в условиях высоких температур, сформировалось наибольшее количество шеелитовых руд. Высвобождающаяся при термическом разложении карбонатов углекислота взаимодействовала с водородом, образуя метан.

Таким образом, технология МДФ, разработанная для прогноза и поисков углеводородного сырья, может быть использована для прогноза и поисков эндогенного оруденения.

### Литература

1. Бубнов С.Н., Докучаев А.Я., Гольцман Ю.В. N-Q магматизм Большого Кавказа: геодинамическая позиция, геохимическая и металлогеническая специализация, источники расплавов. // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2011. – № 57. – С. 73–75.

2. Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Цуканова Л.Е., Лексин А.Б., Газеев В.М., Мохов А.В., Горностаева Т.А., Жариков А.В., Шмонов В.М., Докучаев А.Я., Горбачева С.А., Шевченко А.В. Необычные виды дегазации из расплавов периферических магматических камер «спящего» вулкана Эльбрус (Россия): геохимические и минералогические особенности. // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 4. – С. 3–20.

3. Давыденко Д.Б., Финкельштейн М.Я. Прогнозирование нефтегазоносности по многоспектральным космоснимкам в среде ГИС ИНТЕГРО. // Геоинформатика. – 2004. – № 1. – С. 41–49.

4. Летников Ф.А. Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза. // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. № 12. – С. 1296–1307.

5. Ляхович В.В. Связь оруденения с магматизмом. (Тырныауз). М.: Наука, 1976. – 336 с.

6. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Образование нефтяных и газовых месторождений. // Литология и полезные ископаемые. – 2008. – № 5. – С. 505–521. Маракушев А.А., Русинов В.Л. Природа золотоносности черносланцевых толщ. // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 401. № 4. – С. 515–520.

7. Матишов Г.Г., Парада С.Г., Давыденко Д.Б. Выбор рудоперспективных площадей по результатам дистанционной флюидоиндексации как фактор рационального недропользования в условиях горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2010. – № 3(5). – С. 57–62.

8. 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.

9. Пэк А.В. Геологическое строение рудного поля и месторождения Тырныауз. Труды ИГЕМ. Вып. 56. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 168 с.

10. Родзянко Н.Г. Редкометальные скарны Тырныауза. / М-во цвет. металлургии СССР. Тырныауз. горнометаллург. комбинат. – М.: Недра, 1973. – 215 с.

11. Шестопалов В.М., Макаренко А.Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В.И.Вернадского о «газовом дыхании» земли. Статья 1. Поверхностные и приповерхностные проявления аномальной дегазации. // Геологический журнал. – 2013. – № 3. – С. 7–25.

12. Шестопалов В.М., Макаренко А.Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В.И.Вернадского о «газовом дыхании» земли. Статья 2. Глубинные процессы дегазации недр. // Геологический журнал. – 2014. – № 3(348). – С. 7–27.

13. Letnikov F.A. Ultradeep fluid systems of the earth and problems of ore formation. // Geology of Ore Deposits. – 2001. – Vol. 43. No. 4. – pp. 259–273.

14. Milyukov V., Rogozhin E., Gorbatiykov A., Mironov A., Myasnikov A., Stepanova M. Contemporary State of the Elbrus Volcanic Center (The Northern Caucasus). // Pure and Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 175. No. 5. – pp. 1889–1907.

15. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. // Doklady Earth Sciences. – 2015. – Vol. 462. No. 1. – pp. 543–545.

16. Soloviev S.G., Bortnikov N.S., Kryazhev S.G., Semenova D.V., Kalinin Y.A., Kryazhev V.S., Emkuzhev M.S. U–Pb isotope age of zircon (LA–ICP–MS method) from magmatic rocks and some aspects of the genesis of the Tyrnyauz Mo–W deposit (North



Caucasus). // *Geology of Ore Deposits*. – 2021. – Vol. 63. No. 5. – pp. 409–430. DOI: 10.1134/S1075701521050056.

17. Sun Y., Wu S., Dong D. et al. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea. // *Marine Geology*. – 2012. – Vol. 311–314. – pp. 32–40.

## References

1. Bubnov S.N., Dokuchaev A.Ya., Goltsman Yu.V. N-Q magmatism of the Greater Caucasus: geodynamic position, geochemical and metallogenic specialization, sources of melts. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011. No. 57. pp. 73–75. (In Russ.)

2. Gurbanov A.G., Bogatkov O.A., Karamurzov B.S., Tsukanova L.E., Leksin A.B., Gazeev V.M., Mokhov A.V., Gornostaeva T.A., Zharikov A.V., Shmonov V.M., Dokuchaev A.Ya., Gorbacheva S.A., Shevchenko A.V. Unusual types of degassing from melts of peripheral magma chambers of the “dormant” Elbrus volcano (Russia): geochemical and mineralogical features. *Volcanology and Seismology*. 2011. No. 4. pp. 3–20. (In Russ.)

3. Davydenko D.B., Finkelstein M.Ya. Forecasting oil and gas potential using multispectral satellite images in the GIS INTEGRO environment. *Geoinformatics*. 2004. No. 1. pp. 41–49. (In Russ.)

4. Letnikov F.A. Fluid regime of endogenous processes and problems of ore genesis. *Geology and Geophysics*. 2006. Vol. 47. No. 12. pp. 1296–1307. (In Russ.)

5. Lyakhovich V.V. The connection between mineralization and magmatism. (Tyrynaw). Moscow. Nauka. 1976. 336 p. (In Russ.)

6. Marakushev A.A., Marakushev S.A. Formation of oil and gas deposits. *Lithology and Minerals*. 2008. No. 5. pp. 505–521. (In Russ.)

7. Marakushev A.A., Rusinov V.L. The nature of gold-bearing black shale strata. *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 401. No. 4. pp. 515–520. (In Russ.)

8. Matishov G.G., Parada S.G., Davydenko D.B. The choice of ore-promising areas based on the results of remote fluid indexation as a factor of rational subsurface use in mountainous areas. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2010. No. 3(5). pp. 57–62. (In Russ.)

9. 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.)

10. Pek A.V. Geological structure of the ore field and deposit of Tyrnauz. *Proceedings of the IGEM*. Issue 56. Moscow. Earth Sciences USSR. 1962. 168 p. (In Russ.)

11. Rodzianko N.G. Rare metal skarns of Tyrnauz. Ministry of Nonferrous Metallurgy of the USSR. Tyrnauz Mining and Metallurgical Combine. Moscow. Nedra. 1973. 215 p. (In Russ.)

12. Shestopalov V.M., Makarenko A.N. On some research results developing V.I. Vernadsky’s idea of the Earth’s “gas breathing.” Article 1. Surface and near-surface manifestations of abnormal degassing. *Geological Journal*. 2013. No. 3. pp. 7–25. (In Russ.)

13. Shestopalov V.M., Makarenko A.N. On some results of research developing V.I. Vernadsky’s idea of the Earth’s “gas breathing.” Article 2. Deep processes of degassing of the subsoil. *Geological Journal*. 2014. No. 3(348). pp. 7–27. (In Russ.)



14. Letnikov F.A. Ultradeep fluid systems of the earth and problems of ore formation. *Geology of Ore Deposits*. 2001. Vol. 43. No. 4. pp. 259–273.
15. Milyukov V., Rogozhin E., Gorbaticov A., Mironov A., Myasnikov A., Stepanova M. Contemporary State of the Elbrus Volcanic Center (The Northern Caucasus). *Pure and Applied Geophysics*. 2018. Vol. 175. No. 5. pp. 1889–1907.
16. Rogozhin E.A., Gorbaticov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 462. No. 1. pp. 543–545.
17. Soloviev S.G., Bortnikov N.S., Kryazhev S.G., Semenova D.V., Kalinin Y.A., Kryazhev V.S., Emkuzhev M.S. U–Pb isotope age of zircon (LA–ICP–MS method) from magmatic rocks and some aspects of the genesis of the Tyrnyauz Mo–W deposit (North Caucasus). *Geology of Ore Deposits*. 2021. Vol. 63. No. 5. pp. 409–430. DOI: 10.1134/S1075701521050056.
18. Sun Y., Wu S., Dong D. et al. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea. *Marine Geology*. 2012. Vol. 311–314. pp. 32–40.

УДК 622.279.7

DOI: 10.46698/h2826-1326-4005-h

Оригинальная статья

## Механизм разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюида

Э.Р. Гасумов<sup>1,2</sup>, Р.А. Гасумов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ 1073, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25, e-mail: e.gasumov@gmail.com;

<sup>2</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, AZ 1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 34;

<sup>3</sup> Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Статья поступила: 16.10.2025, доработана: 17.11.2025, принята к публикации: 19.11.2025

**Резюме: Актуальность работы.** В статье рассмотрены результаты исследования влияния геолого-технологических параметров на структуру пластов-коллекторов при эксплуатации газовых месторождений и подземных хранилищ газа. Приведены результаты исследования по аналитическому моделированию процессов разрушения коллекторов в условиях фильтрации флюидов. Изучен механизм образования пристенного слоя воды с включением в него микропузырьков газа, то есть слоя микрогазовой эмульсии на поверхностях пор и каналов пласта-коллектора. Рассмотрены условия существования и проявления различных режимов вытеснения. Обоснована необходимость учета многокомпонентного состава пористой среды для решения реальных задач, что возможно путём усложнения функции распределения структурных неоднородностей. **Целью исследования** является изучение механизма процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов при разработке месторождений углеводородов и эксплуатации подземных хранилищ газа. **Метод теоретического уровня.** Материалы исследования по механизмам процессов разрушения пород-коллекторов продуктивного пласта в условиях фильтрации флюидов включают: результаты ранее выполненных исследований в данной области, моделирование процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов. Методы исследования основаны на общенаучных методах, в том числе аналитического и численного моделирования. **Результаты исследований.** Определён механизм процессов разрушения коллекторов продуктивного пласта в условиях фильтрации флюидов. Установлено, что изменение динамических градиентов давления при резких и частых сменах режимов работы скважин сопровождается процессами образования новых трещин в массиве пород – как при хрупком разрушении, так и в области пластической деформации.

**Ключевые слова:** газ, пласт, ПЗП, углеводороды, разрушение пласта, фильтрация жидкости, процессы, микрогазовые эмульсии.

**Для цитирования:** Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Механизм разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюида. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 122–136. DOI: 10.46698/h2826-1326-4005-h

DOI: 10.46698/h2826-1326-4005-h

Original paper

# The mechanism of productive reservoir destruction under fluid filtration conditions

**E.R. Gasumov<sup>1,2</sup>, R.A. Gasumov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Azerbaijan Technical University, 25 H. Javid Ave., Baku AZ 1073,  
Azerbaijan, e-mail: e.gasumov@gmail.com;

<sup>2</sup> Azerbaijan State Oil and Industry University, 34 Azadlig Ave.,  
Baku AZ 1010, Azerbaijan;

<sup>3</sup> North Caucasian Federal University, 1 Pushkina Str., Stavropol 355017,  
Russian Federation, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Received: 16.10.2025, revised: 17.11.2025, accepted: 19.11.2025

**Abstract: Relevance.** This article presents the results of a study examining the influence of geological and technological parameters on reservoir structure during the operation of gas fields and underground gas storage facilities. It provides the results of analytical modeling of reservoir destruction processes under fluid filtration conditions. The study examines the mechanism of formation of a near-wall water layer containing gas micro-bubbles, i.e., a layer of microgas emulsion on the surfaces of reservoir pores and channels. The conditions for the existence and manifestation of various displacement regimes are considered. The need to consider the multicomponent composition of a porous medium for solving real-world problems is substantiated, which is possible by complicating the distribution function of structural heterogeneities. **The aim** of the study is to investigate the mechanism of productive reservoir destruction processes under fluid filtration conditions during the development of hydrocarbon fields and the operation of underground gas storage facilities. **The research materials** on the mechanisms of reservoir rock failure in productive formations under fluid flow conditions include the results of previous studies in this area and modeling of reservoir failure processes under fluid flow conditions. The research methods are based on general scientific approaches, including analytical and numerical modeling. **Results.** The mechanism of reservoir destruction processes in productive formations under fluid filtration conditions has been determined. It was defined that changes in dynamic pressure gradients during abrupt and frequent changes in well operating modes are found to be accompanied by the formation of new cracks in the rock mass – occurring both during brittle fracture and in the region of plastic deformation.

**Keywords:** gas, reservoir, bottomhole formation zone, hydrocarbons, reservoir destruction, fluid filtration, processes, microgas emulsions.

**For citation:** Gasumov E.R., Gasumov R.A. The mechanism of productive reservoir destruction under fluid filtration conditions. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 122–136. DOI: 10.46698/h2826-1326-4005-h

## Введение

При разработке месторождений УВ происходит изменение структуры пласта-коллектора под воздействием различных факторов: геологических, технологических, технических, физико-химических и др., влияние которых является основной причиной разрушения пласта-коллектора и сопровождается следующими процессами [Гасумов, Гасумов, 2025]: происходит необратимая деформация коллекторов

из-за снижения пластового давления, и в последствии нелинейности процессов фильтрации жидкостей в продуктивных отложениях создаются условия для возникновения упругих волн; при разработке месторождений УВ и ПХГ в коллекторах продуктивных пластов в условиях фильтрации флюидов происходит разрушение в результате деформаций и изменения напряжённо-деформированного состояния породы, что оказывает отрицательное влияние на их фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС); скопление твёрдых частиц в поровом пространстве из-за отрыва частиц от матрицы и их перехода в подвижное состояние сопровождается накоплением частиц, которые уменьшают проницаемость и увеличивают фильтрационные нагрузки на матрицу.

Изучение процессов разрушения пород-коллекторов продуктивных пластов в условиях фильтрации флюидов имеет особое значение для разработки нефтегазовых месторождений (НГМ) и подземных хранилищ газа (ПХГ). Объектом исследования являются коллекторы углеводородов, представленные терригенными и карбонатными разностями с гранулярным и трещинным типами пористости, а также призабойная зона пласта-коллектора, находящаяся под воздействием флюидов и деформационных процессов, что является важнейшей задачей разработки НГМ и эксплуатации ПХГ.

В связи с этим изучение механизмов и закономерностей разрушения продуктивных пластов-коллекторов в условиях фильтрации флюидов становится актуальной задачей, требующей учета и регулирования техногенных изменений природных свойств коллекторов при освоении залежей УВ. Для решения этих задач необходимо выявить закономерности изменения ФЕС продуктивных пластов-коллекторов в процессе падения пластового давления, разработать аналитические и численные методы прогнозирования изменений свойств коллекторов в результате проявления механико-химических явлений при сопряженном воздействии изменяющегося напряжённого состояния коллектора с фильтрацией флюида.

### Методы исследования

Материалы исследования механизмов процессов разрушения пород-коллекторов продуктивного пласта в условиях фильтрации флюидов включают результаты ранее выполненных исследований в данной области, а также моделирование процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов. Методы исследования основаны на общенаучных подходах, в том числе на методах аналитического и численного моделирования. При моделировании процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов учитываются обратимые и необратимые деформации, а также дилатансионное разрушение породы-коллектора.

### Математические модели и критерии

Для изучения процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов могут быть использованы математические модели деформируемой флюидонасыщенной пористой среды. Для моделирования процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов используются различные подходы (рис. 1) [Гасумов, Гасумов, 2023б; Dimaki et al., 2016].



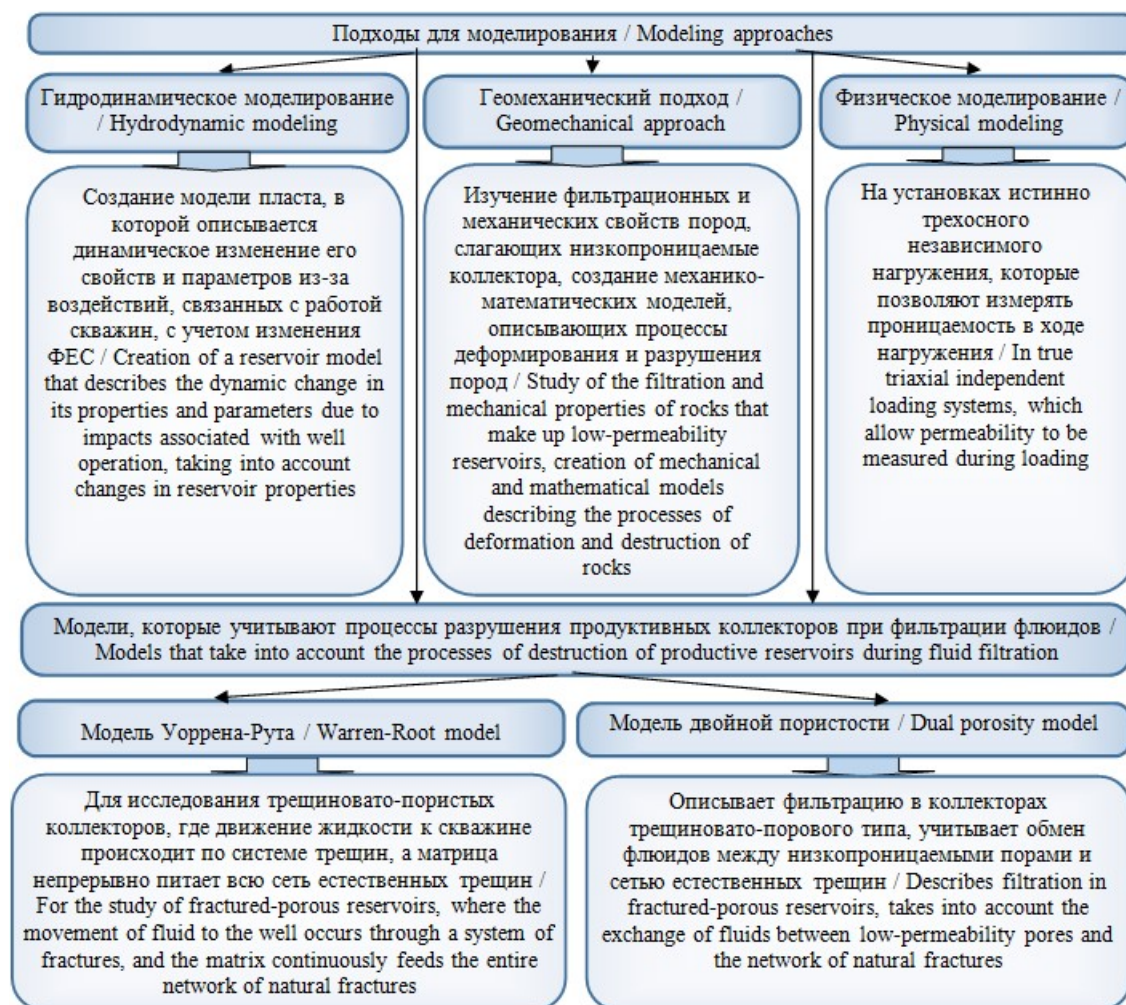


Рис. 1. Моделирование процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов /

Fig. 1. Modeling of the processes of destruction of productive reservoirs under conditions of fluid filtration

Для моделирования процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов используется применение математических моделей, учитывающих взаимное влияние фильтрации флюида и процессов деформации и разрушения пород-коллекторов [Barkov, Khimulia, 2023; Гасумов, Гасумов, 2023а; Lie, 2019], в том числе таких подходов, как: промышленные симуляторы для моделирования сложных пластов и различных систем; программные продукты с открытым исходным кодом для моделирования нефтяных резервуаров, поддерживающие различные численные схемы, а также структурированные и неструктурированные сетки; “PyMRST” – библиотека, которая позволяет моделировать двухфазное течение флюидов, учитывать геологические особенности месторождений и оптимизировать работу скважин. Использование гидродинамических симуляторов позволяет учитывать изменение ФЕС пласта при изменении давления флюида, а также специальные геомеханические эффекты [Бобренёва и др., 2018; Гасумов, Гасумов, 2023б; Гасумов, Гасумов, 2023а].

Для оценки процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов могут использоваться следующие критерии: критическая скорость

течения, при превышении которой можно ожидать разрушения породы и перехода твёрдых частиц во флюидизированное состояние; форма кривых восстановления давления – при разрушении скелета пласта на стадии восстановления появляются участки резкого снижения и более быстрого восстановления забойного давления [Узянбаев и др., 2024; Nassan, 2019]. При численном моделировании учитываются обратимые и необратимые деформации, а также дилатансионное разрушение породы-коллектора [Гильманова и др., 2020; Индрупский и др., 2022].

### Результаты работы и их обсуждение

Проведённый анализ показывает, что моделирование процессов разрушения продуктивных коллекторов в условиях фильтрации флюидов направлено на изучение деформаций и разрушения породы-коллектора, вызванных отбором или закачкой флюида при эксплуатации месторождений УВ, что влияет на ФЕС пласта-коллектора и продуктивность скважин [Гасумов, Гасумов, 2025; Химуля, Барков, 2023]. В поровой системе продуктивного декомпрессируемого пласта создаются условия для диспергирования газа в пластовых водах и сорбции или десорбции его на свободных поверхностях минерального скелета пласта-коллектора [Гасумов, Гасумов, 2023а, 2023; Кадет и др., 2025]. Содержание растворенного газа в различных видах пластовых вод (свободной, остаточной, рыхлосвязанной) может быть рассчитано по теоретическим формулам [Гужель, 2021; Ермак и др., 2023]. Однако кроме растворенного газа газонасыщенность пластовых вод определяется также содержанием диспергированного газа. Пористая среда коллектора является идеальным диспергатором газа и особенно при высоких скоростях истечения, что характерно для прифильтровой зоны скважин. По мере удаления от скважины интенсивность диспергирования должна снижаться в связи с уменьшением линейной скорости фильтрации газа и постепенной сменой режимов истечения (струйного, промежуточного, пузырькового). Размеры, количество и объем газовой дисперсной фазы (образующихся пузырьков) определяется в основном геометрическими размерами отверстий и их расположением, т.е. размерами межпоровых сужений и каналов, скоростью истечения, а также свойствами воды и твёрдой фазы скелета пласта. В этом процессе образуются довольно крупные дисперсии (диаметр пузырьков от  $10^{-2}$  до 1,0 мм) [Ермак и др., 2023].

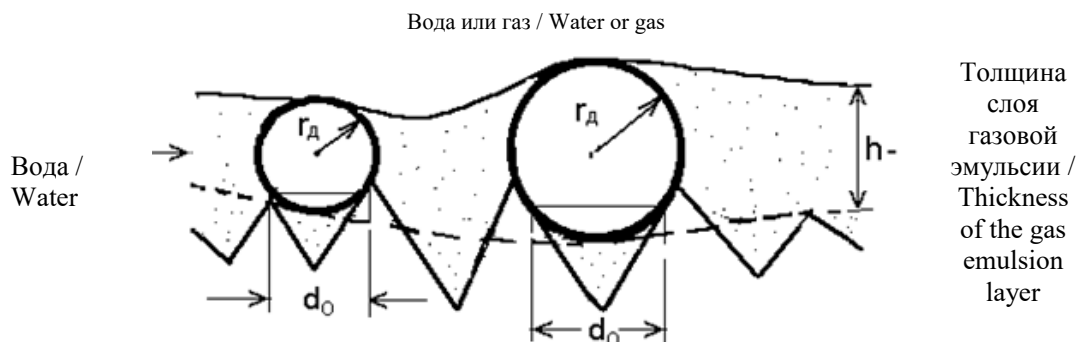
Газовые эмульсии, образуются за счёт выделения газовой фазы из жидкой вследствие её пересыщения, имеют наибольшую дисперсность и широкий диапазон изменения размеров образующихся пузырьков (от  $10^{-6}$  до  $10^{-1}$  мм), причём наиболее мелкие пузырьки выделяются из растворов малорастворимых газов, таких как метан, этан, и др. В условиях разработки залежей, при снижении давления в газированной метаном свободной пластовой и (или) остаточной воде немедленно начинается образование газовой дисперсной фазы. При остановке скважины или смене режима снижение депрессии приводит к частичному растворению и кавитационному схлопыванию отдельных пузырьков газа, с определённым диаметром, не обеспечивающим устойчивое состояние газовой эмульсии. При этом возникает целый «рой» зародышей-микропузырьков газа, из которых при возобновлении отбора возникают новые пузырьки, размеры которых зависят от избыточного газосодержания и числа центров выделения [Ананьев и др., 2021; Lie, 2019].

Выделение дисперсной газовой фазы происходит обычно на плохо смачиваемых участках твёрдой поверхности, на ее дефектах и частично в объёме жидкости на загрязняющих частицах. Получаемые газовые эмульсии, вследствие малого размера пузырьков, достаточно стабильны, но могут существовать очень длительное время. Самым очевидным местом, где могут задерживаться пузырьки газа в воде, это микроскопические и субмикроскопические трещины и выступы на стенках пор, каналов и трещин коллекторской пластовой системы. Ядра нерастворённого газа могут существовать также в виде пустых гидрофобных (имеется в виду стенки) трещин и пор. Опираясь на литературные источники, можно предположить, что мелкие ядра (пузырьки) эмульсии газа не растворяются потому, что пузырьки окружены оболочками из органических молекул, которых всегда достаточно в пластовых водах нефтегазоносных горизонтов. Это органические кислоты, соли этих кислот, и др., в том числе и природные поверхностно-активные вещества, а также и привнесённые синтетические ПАВ, применяемые при различных обработках пласта, капремонтах и т.д.

Для оценки объёма порового пространства, которое может быть занято слоем газовой эмульсии, покрывающей поверхность фильтрационных открытых пор и каналов, рассмотрим механизм размещения и удерживания пузырьков газа на поверхности твёрдой фазы (скелета коллектора). Это необходимо для определения толщины слоя газовой эмульсии на стенках пор и каналов, слоя, который при ламинарном течении является пристенным слоем с существенно большей вязкостью, чем фильтрующиеся в порах вода и газ. Этот слой как бы играет роль твёрдой стенки, вдоль которой течет основной поток, и сам остаётся неподвижным. Кроме того, в пристенном слое должно наблюдаться повышенное содержание механических микрочастиц породы.

Образование слоя газовой эмульсии на стенках, фильтрующих (и нефилтрующих) пор и каналов в пористой среде коллектора ведёт к снижению динамически полезной ёмкости коллектора. При увеличении депрессии на пласт приводит к увеличению скорости фильтрации флюидов и особенно в ПЗП, происходит расширение масштабов образования микрогазовых эмульсий и, соответственно, новое утолщение пристенных слоёв. Таким образом, со временем, по-видимому, достигается предельная толщина пристенного слоя воды, когда дальнейшее дегазирование остаточной (плёночной и контактной) воды уже не ведёт к наращиванию числа и размеров микропузырьков, «армирующих» пристенный слой воды. Определяют указанный рост числа и размеров микропузырьков в пристенном слое воды, прежде всего особенности поверхности пор и каналов и ее физико-химические параметры, а также предельная газоёмкость воды по диспергированному газу, зависящая от ее минерализации, состава растворенных солей и термодинамических параметров системы. Представляет интерес механизм образования пристенного слоя воды с включением в него микропузырьков газа, т.е. слоя микрогазовой эмульсии на поверхностях пор и каналов пласта-коллектора.

Толщина слоя газовой эмульсии, на стенке заполненной водой, определяется диаметрами удерживаемых силами адгезии газовых пузырьков. С ростом объема (диаметра) пузырька увеличивается подъемная архимедова сила  $F_b$ , которая стремится оторвать его от стенки. Максимальный диаметр удерживаемых на поверхности твердой фазы пузырьков зависит от размеров дефектов (лунок) на стенке поры (рис. 2) [Гасумов, Гасумов, 2023б; Lie, 2019].



$r_d = r_b$  – радиус пузырька;  $d_0 = d_b$  – увеличение объема (диаметра) пузырька /  
 $r_d = r_b$  – bubble radius;  $d_0 = d_b$  – increase in the volume (diameter) of the bubble

Рис. 2. Схема удержания и размещения пузырьков газа на поверхности поры, заполненной водой или газом /

Fig. 2. Diagram of retention and placement of gas bubbles on the surface of a pore filled with water or gas

Электронные микрофотографии образцов-песчаников показывают, что размеры (радиусы) дефектов-лунок на стенках пор и каналов изменяются в очень широком диапазоне. Для дальнейших оценочных расчётов принимаем радиусы дефектов-лунок  $r_c$ , в которых удерживаются пузырьки газа, равными  $10^{-12}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-6}$  м.

Сила всплывания пузырька  $F_b$  зависит от объема пузырька  $V_b$  и разности плотностей жидкости и газа  $\rho_l g = r_l - r_g$

$$F_b = Dr_{lg} \times V_b \quad (1)$$

Для пузырька, имеющего форму сферы с радиусом  $r_b$ , подъемная сила равна:

$$F_b = (4/3)\pi Dr_{lg} g r_b^3 \quad (2)$$

где,  $g$  – ускорение свободного падения.

Сила, удерживающая пузырек в лунке пропорциональна поверхностной энергии на границе раздела воды и газа и периметру лунки радиусом  $r_c$ :

$$F_c = -2\pi \delta_{lg} r_c \quad (3)$$

где  $\delta_{lg}$  – поверхностное натяжение.

Условие удержания пузырька на стенке поры от всплывания – равенство этих двух сил.

$$(4/3)\pi Dr_{lg} g r_b^3 = 2\pi \delta_{lg} r_c \quad (4)$$

Решив уравнение (1) относительно радиуса удерживаемого пузырька, получим:

$$r_b = (3r_c \delta_{lg} / 2Dr_{lg} g)^{-3} \quad (5)$$

Входящие в уравнение (5) величины можно определить, используя номограмму, составленную Т. Schowalter (в 1979 г.) и измененную V. Evik (в 1987 г.).

В качестве примера ниже приведены результаты расчётов величины максимального радиуса микропузырьков, удерживаемых на дефектах пор и каналов для пластовых условий Щелковского ПХГ, где поверхностное натяжение  $\delta_{lg} = 6,310 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$ , а разность плотностей пластовой воды и газа  $Dr_{lg} = 1017 \text{ кг/м}^3$ . Подставляя данные в последнюю формулу (5) при указанных выше значениях  $r_c$ , получим соответствующие размеры  $r_b$  удерживаемых на стенках пор и каналов пузырьков газа. Таким образом, на дефектах с радиусом  $1,0 \times 10^{-6} \text{ мкм}$ , могут удерживаться от всплыва-



ния пузырьки с максимальным радиусом 1,0 мкм. Дефекты с большими радиусами удерживают уже пузырьки, способные перекрывать не только сужения пор и каналов, но и заполнять большую часть их объёма (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Зависимости радиуса удерживаемого пузырька от поверхностного натяжения, плотности воды и газа, радиуса формы сферы пузырька /**  
**Dependencies of the radius of a retained bubble on surface tension, water**  
**and gas density, and the radius of the bubble's sphere**

| Радиус удерживаемого пузырька ( $r_b$ ), м / Radius of the retained bubble ( $r_b$ ), m | Поверхностное натяжение ( $\delta_{lg}$ ), Н/м / Surface tension ( $\delta_{lg}$ ), N/m | Разности плотностей жидкости и газа ( $Dr_{lg}$ ), кг/м <sup>3</sup> / Difference in density of liquid and gas ( $Dr_{lg}$ ), kg/m <sup>3</sup> | Радиус удерживаемого пузырька ( $r_c$ ), м / Radius of the retained bubble ( $r_c$ ), m |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $1,0 \times 10^{-6}$                                                                    | $6,3 \times 10^{-2}$                                                                    | 1017                                                                                                                                            | $98,2 \times 10^{-6}$                                                                   |
| $1,0 \times 10^{-9}$                                                                    |                                                                                         |                                                                                                                                                 | $9,8 \times 10^{-6}$                                                                    |
| $1,0 \times 10^{-12}$                                                                   |                                                                                         |                                                                                                                                                 | $0,98 \times 10^{-6}$                                                                   |

Исследование показывает, что силы сцепления пузырьков с твёрдой поверхностью стенок пор и каналов настолько велики, что позволяют им удерживаться в сужениях каналов фильтрации в неподвижном состоянии при градиентах давления в 2 МПа/м. Согласно ранее проведённым исследованиям, при уменьшении размеров пузырьков газа, диспергированного и находящегося во взвешенном в воде состоянии, до наименьшего узкого сечения канала, газовая эмульсия при движении в потоке «садится» на зерно и не сдвигается напором водяного потока [Гужель, 2021; Gutierrez, Lewis, 2002]. При этом пузырьки могут прилипнуть к любым стенкам фильтрующих пор и каналов, формируя пристенный слой. Объем такого пристенного слоя в поровом пространстве коллектора зависит от площади его распространения и толщины, так как составной его частью являются «зажатые» между пузырьками прилипшего к стенкам газа порции (участки) пластовой остаточной воды.

Минимальный объем «газоэмульсионного» пристенного слоя будет определяться только газовой фазой, если на поверхности породы пузырьки газа будут располагаться спорадически. Этот суммарный объем всех пузырьков газа, прикрепленных к стенкам пор и каналов, будет зависеть от величины предельной газоемкости пластовых вод за счёт диспергированного газа  $V_d$  в конкретных пластовых условиях (исходный объем дисперсной газовой фазы в единице объёма поровой воды) и доли поверхности порового пространства пласта-коллектора, которую занимает прилипшая к ней дисперсная газовая фаза.

В общем случае объем пристенного «газоэмульсионного» слоя определяется как произведение доли удельной поверхности коллектора, занятого газовой эмульсией, и толщины пристенного слоя. Последняя может быть принята примерно равной среднему диаметру пузырьков газа  $d_d$ . Однако в природных пластовых условиях на стенках пор и каналов коллектора в основном адсорбируется вода, составляющая остаточную водонасыщенность, и лишь определённая часть поверхности остаётся незаполненной пленками воды, т.е. гидрофобной. Частично гидрофобизированную внутривидовую поверхность в естественном состоянии имеют образцы пород, отобранные из нефтегазоносных пластов. Как было отмечено выше, адгезия пузырьков газа происходит именно на гидрофобных участках удельной поверхности пород, т.е. на незаполненных водой активных центрах поверхности. Наличие таких участков

в коллекторе подтверждается обнаружением гидрофобной части в алевролитовой фракции продуктов разрушения пласта, выносимых из скважин вместе с газом и водой. Проведённые на глинистых песчаниках палеоцена Западного Предкавказья исследования по изучению механизма адсорбции воды показали, что 20–25 % общей поверхности пор и каналов породы-коллектора остаются незаполненными водой и, по-видимому, такие гидрофобные участки занимают островное положение, так как водная плёнка становится электропроводной.

Таким образом, в наших расчётах можно принять долю удельной поверхности породы-коллектора, заполненной пузырьками газа, как минимум равной 20 %. Доля гидрофобизированных участков со временем должна увеличиваться из-за сорбции углеводородов породами пласта-коллектора, а также за счёт привнесения искусственных ПАВ в пластовую систему при капитальных ремонтах и других операциях в скважинах.

Известно, что свободная газовая фаза, выделившаяся из воды при изменении термобарических условий или введённая в воду посредством механического диспергирования, до определённого объёма находится в виде малоподвижной газовой эмульсии. Величина газоёмкости вод за счёт дисперсной газовой фазы определяется пластовыми условиями (температурой, давлением, минеральным составом и др.) и в общем случае может быть рассчитана по формуле:

$$V_b = (273,15 P_{res} / ZT) \cdot [(\theta / (1 - \theta))] \quad (6)$$

где  $P_{res}$  – пластовое давление;  $Z$  – коэффициент сжимаемости газа в пластовых условиях;  $T$  – пластовая температура;  $\theta$  – доля дисперсной газовой фазы в объёме порового пространства при пластовых условиях, по данным принята равной 5 %.

Рассчитанная по вышеприведённой формуле газоёмкость пластовых вод Щелковского ПХГ по диспергированному газу составляет 5,35 нм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. В пластовых условиях эта дисперсная газовая фаза будет занимать объём в 0,049 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. В условиях пласта-коллектора эксплуатирующейся залежи газа, открытую пористость по характеру заполнения ее флюидами можно разделить на три составных «части»: заполненную остаточной водой, заполненную остаточным газом, и «часть», представляющую собой динамическую полезную ёмкость, по которой и происходит фильтрация газа и вытесняющей его воды. Газовая эмульсия, располагающаяся на стенах пор и каналов, составляющих открытую пористость коллектора, и, соответственно, входящая в состав эмульсии дисперсная газовая фаза остаётся неподвижной при процессах взаимовытеснения воды и газа. Поэтому удельное содержание дисперсной газовой фазы в неподвижной эмульсии, располагающейся в динамически полезной ёмкости коллектора, в пластовых условиях будет составлять 4,9 % объёмных, т.е. равняться предельной газоёмкости пластовых вод по диспергированному газу.

Прежде чем определять объём пристенного газо-эмульсионного слоя в поровой системе пласта-коллектора, целесообразно проверить достоверность оценки предельной газоёмкости пластовой воды, исходя из критических параметров существования дисперсной газовой фазы, а именно: критического радиуса зародыша-пузырька  $\sim 3 \cdot 10^{-9}$  м, максимально возможного их количества в единице объёма  $\sim 10^{20}$  ед./м<sup>3</sup>. При объёме дисперсной газовой фазы, удерживаемой пластовой водой щигровского горизонта определённом в 0,049 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, средний радиус образующихся пузырьков составил  $5 \times 10^{-8}$  м. Это несколько больше критического радиуса, что сви-

детельствует о достаточной достоверности (реальности) рассчитанной предельной газоёмкости щигровских пластовых вод по дисперсной газовой фазе.

Объем пристенного газоземulsionного слоя, в случае спорадического расположения пузырьков газа на стенках породы, будет минимальным и определяется как произведение величины поверхности, занятой пузырьками, и толщины слоя эмульсии. В рассматриваемом случае толщина газоземulsionного слоя равна удвоенному среднему радиусу пузырьков  $r_b \approx 10^{-6}$  м, удерживаемых на минимальных дефектах стенок ( $r_c \approx 10^{-12}$  м), а занятая ими поверхность  $\sim 20\% S_{hm}$ .

Удельная поверхность (суммарная поверхность пор и каналов в пределах открытой пористости) щигровского пласта-коллектора определенная по нескольким вариантам формулы Козени-Кармана, варьируется в пределах 38000 – 83000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Для последующих расчетов принимаем среднее значение  $S_{hm} \approx 60000$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Тогда объем пристенного газоземulsionного слоя, фактически это объем прикрепленной к стенкам породы дисперсной газовой фазы, составит:

$$V_{gel} = 2r_c \cdot 0,2 S_{hm} \quad (7)$$

При принятых для расчётов значениях параметров удельный объем газоземulsionного слоя на стенках открытых пор и каналов будет равен  $2,4 \times 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, или 2,4 %. Анализ кривых относительной фазовой проницаемости показывает, что коэффициент остаточного газонасыщения  $\beta_{rgs}$  для широкого класса пластов-коллекторов меняется в узких пределах (от 10 до 30 %). В то же время многочисленные исследования и промысловая практика дают более высокие значения  $\beta_{rgs}$  (30–60 %). Такие различия в значениях  $\beta_{rgs}$  указывают на то, что в обводнённой (переходной) зоне существуют значительные объёмы газа при ненулевых значениях автомобильной фазовой проницаемости. Неполнота вытеснения газа в переходной зоне связана с динамическим проявлением капиллярных сил, которые стремятся свести к минимуму поверхность смачивающей и несмачивающей фаз. Разность давлений в фазах представляет собой капиллярное давление, направленное в сторону менее смачивающей фазы. Согласно обобщённому закону Дарси пористая среда и одна из фаз в процессе нестационарной двухфазной фильтрации, движение каждой из фаз происходит под действием «своего» фазового давления, а проницаемость фиктивной пористой среды определяется «своей» фазовой проницаемостью [Barkov, Khimulia, 2023; Бобренёва и др., 2018]. Соотношение капиллярных и внешних гидродинамических сил определяет условия вытеснения газа водой и контролирует объёмы заземлённых (остаточных) фаз. Такой режим вытеснения реализуется, прежде всего, в окрестности добывающей скважины и, возможно, в некоторых зонах пласта-коллектора, в которых гидродинамический перепад давлений очень высок. Зоны существования прорывного режима вытеснения газа имеют место в окрестностях эксплуатационных скважин перед их обводнением, т.е. на участках пласта, где скорость передвижения фронта вытеснения (ГВК), обусловленная гидродинамическим перепадом давления, превышает скорость капиллярной пропитки.

В указанных зонах при высоких скоростях продвижения воды и в условиях развития по разрезу и площади пласта-коллектора, анизотропии ФЕС, происходят процессы диспергирования: воды в газе при прорыве её через пережимы пор (естественные диспергаторы); газа в воде с образованием газовой микроэмульсии. Это происходит благодаря эжектированию газа из мелких и средних по размерам газонасыщенных пор в крупные поры и каналы уже, заполненные прорывающейся

с высокой скоростью водой. Однако необходимо ещё раз отметить, что основным объём диспергированного газа и, причём наиболее устойчивая микропузырьковая эмульсия образуется за счёт выделения растворенного газа в свободную фазу из газонасыщенной пластовой воды при создании в системе депрессии.

Таким образом, при прорывном режиме вытеснения на фронте (в зоне) вытеснения образуется двухфазная дисперсная система. Формирование на фронте вытеснения дисперсной двухфазной зоны определённой толщины является одним из существенных факторов увеличения вязкости вытесняющего агента. По существу, это пенная система, вязкость которой в зависимости от степени аэрации, т.е. количества и размеров пузырьков диспергированного газа, может превышать вязкость вытесняющей воды на порядок и более. Поскольку этот процесс может происходить лишь при достижении прорывного режима вытеснения, он, по-видимому, будет протекать лишь вблизи эксплуатационных скважин или группы скважин, создающих глубокую депрессионную воронку с высокими перепадами гидродинамического давления. Таким образом, создаются условия для временного блокирования притоков газа зонами существования пенных систем.

После прекращения существования условий, необходимых и достаточных для формирования и сохранения пенных систем в пределах участка пласта, такие системы могут разрушаться за счёт кавитационного схлопывания пузырьков газа, тем самым резко усиливая процесс разрушения пласта-коллектора. В период жизни пенных систем на заблокированных ими участках пласта происходит падение пластового давления и соответственно дебита скважин. При этом проявление эффекта повышения фильтрационных сопротивлений на отдельных участках пласта способствует перераспределению потоков газа в поровом пространстве, преломлению линий тока и др., что ведёт к интенсификации процессов разрушения коллектора.

Особенно разнообразны режимы вытеснения и защемления газа в анизотропных по ФЕС пластах-коллекторах. Причём при развитии такой анизотропии по разрезу и по площади залежи наибольшее разнообразие режимов вытеснения газа водой отмечается в зонах высоких скоростей течения флюидов. Здесь благодаря формированию двухфазных (пенных) систем на фронте вытеснения, а также действию на границах неоднородностей давлений внедрения, прорыва и пережатия и проявляются эффекты блокирования целиков газа, последующее разрушение которых за счёт сегрегации и растворения способствует кавитационному схлопыванию микропузырьков и, соответственно, разрушению пласта.

При снижении флюидного давления в воде, насыщенной предельно газом в зоне контакта воды и газа, и приближении его к давлению насыщения возрастает энтропия флюидной системы, и она теряет своё устойчивое состояние. В объёмах воды в ПЗП (остаточной, конденсационной, пластовой и другого генезиса) в области падения давления ниже давления насыщения воды газом происходит «взрывоподобное» возникновение зародышей свободной газовой среды (пузырьков газа) с минимальными размерами. По справочным данным размеры микропузырьков газа, возникающих при дегазации перенасыщенной воды, имеют размеры порядка 20–40 Å, или  $2,0\text{--}4,0 \times 10^{-9}$  м. Время зарождения и формирования микропузырька газа в перенасыщенной газом воде составляет всего  $1 \times 10^{-12}$  с, т.е. практически «мгновение». Учитывая приведённые данные можно оценить скорость разбегания стенок формирующегося пузырька газа (границы раздела фаз) как отношения пути, проходимого границей раздела за время его движения. При среднем значении раз-



мера образующихся микропузырьков в  $3,0 \times 10^{-9}$  м, скорость движения границы раздела газовой и жидкой фаз составляет  $3,0 \times 10^{-3}$  м/с, т.е. 3 км/с. Передвигающаяся с такой скоростью порция воды способна разрушить практически любые материалы. В породно-флюидальной системе газовых залежей образование с такой скоростью микропузырьков газа в воде, заполняющей микропространство между пластинками глинистых минералов, щели между зёрнами кварца и другие насыщенные водой поры и каналы, разрушает структуру породы на составляющие элементы. Понятно, что массовое «взрывообразное» образование микропузырьков газа из воды любого генезиса, присутствующей в пористой среде пласта, происходит именно в ПЗП, где поддерживается наибольшая депрессия.

Следует особо отметить, что конденсационная вода, осаждающаяся на стенках лифтовых колонн и стекающая, и скапливающаяся в стволе и в ПЗП (в случае недостаточных для ее выноса дебитов газа) насыщается газом до равновесного состояния при данных термодинамических условиях. При установившейся депрессии процесс ее дегазации (образования микрогазовой эмульсии) стабилизируется. Однако, при подтоке к ПЗП пластовой (свободной, остаточной) минерализованной воды, подтягивающейся в виде конусов вдоль стволов скважины по зазорам между колоннами и цементной крепью и самому цементному камню, и смешивании ее с конденсационной вызывает повышение минерализации последней и, соответственно, стимулирует массовое (залповое) образование микропузырьков газа, т.е. кавитационное разрушение коллектора в ПЗП.

### Заключение

Установлено, что фильтрация флюидов может приводить к деформациям и разрушению коллектора продуктивного пласта, которые отрицательно влияют на ФЕС пласта и продуктивность эксплуатационных скважин. В результате интенсивного отбора жидкости при больших депрессиях и отсутствия компенсируемых закачек, в коллекторе возникают упругие волны, которые изменяют свойства пород, что приводит к последующему разрушению.

С момента снижения пластового давления начинается деформация пород матрицы (направление максимальной деформации), которая происходит в сторону наименьшего сопротивления, то есть внутрь трещин, что сопровождается уменьшением начальной раскрытости трещин. Максимальный перепад давления приходится на прискважинную область, поэтому деформации начинаются вблизи стенок скважины с постепенным распространением от ствола вглубь массива.

Математические модели деформируемой флюидонасыщенной пористой среды позволяют учитывать обратимые и необратимые деформации, а также дилатансионное разрушение пород-коллекторов. Установлено, что эксплуатация газоносных пластов повсеместно сопровождается разрушением матрицы породы-коллектора, причём наиболее опасными по своим последствиям являются разрушения, происходящие в ПЗП.

Неизбежными процессами, сопровождающими добычу газа и приводящими к разрушению со временем коллекторов любой прочности, являются процессы формирования и разрушения газовой эмульсии при дегазации пластовых вод любого генезиса. Силы сцепления пузырьков газа с твёрдой поверхностью стенок пор и каналов настолько велики, что позволяет им удерживаться в сужениях пор и каналов фильтрации в неподвижном состоянии при градиентах давления в 2,0 МПа/м.

Выявлены предпосылки создания принципиально новых технических и технологических решений для диагностики состояния ПЗП (оценка наличия и размеров каверн в прифилтровой части пласта), прогнозирования темпов и масштабов разрушения коллектора.

При моделировании работы добывающей скважины показано, что в результате отбора пластового флюида проницаемость изначально однородного коллектора может изменяться необратимо с образованием областей сжатия и дилатансионного разрушения. Для прогнозирования продуктивности скважин, успешности различных геолого-технологических мероприятий необходимо учитывать не только проницаемость и текущий скин-фактор, но и геометрию распределения проводящих трещин.

### Литература

1. Ананьев К.М., Алексеева Е.А., Твердохлебов В.П. Применение кавитационных методов очистки пластовых вод нефтяных месторождений. // *Успехи современного естествознания*. – 2021. – № 5. – С. 45–50.
2. Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Губайдуллин И.М. Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа. // *Сборник трудов IV Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ 2018)*. Самара: Изд-во Новая техника, 2018. – С. 1775–1780.
3. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Математическая модель закачки вязкоупругих составов в продуктивный пласт. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023а. – Т. 334. № 3. – С. 218–228. DOI 10.18799/24131830/2023/3/3791.
4. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Оценка гидродинамических показателей системы скважина-пласт, сформированной на этапе разбуривания эксплуатационного пласта. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023б. – Т. 14. № 4. – С. 108–123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009.
5. Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Сохранение фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов при их временной изоляции. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 180–195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001.
6. Гильманова Н.В., Тарачева Е.С., Сивкова А.В. Прогноз зон наличия капиллярно-защемленной нефти для низкопроницаемых коллекторов при обосновании остаточной нефтенасыщенности различными способами. // *Нефтепромысловое дело*. – 2020. – № 2(614). – С. 12–18. DOI: 10.30713/0207-2351-2020-2(614)-12-18.
7. Гужель Ю.А. Промысловая подготовка нефти и газа. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2021. – 115 с.
8. Ермак А.А., Фонин М.Ф., Гришин П.Ф. Нефтяные дисперсные системы. Новополоцк: Полоцкий государственный университет им. Е. Полоцкой, 2023. – 184 с.
9. Индруцкий И.М., Аникеев Д.П., Закиров Э.С., Алексеева Ю.В. Учет геомеханических эффектов при моделировании процессов разработки месторождений углеводородов. // *Актуальные проблемы нефти и газа*. – 2022. – Вып. 4(39). – С. 75–102.
10. Кадет В.В., Тютяев А.В., Васильев И.В., Кузнецова Е.М., Кузнецов Ю.Г. Исследования и моделирование фильтрации пластовых флюидов в MATLAB. Reservoir Simulation Toolbox. // *Деловой журнал Neftegaz.RU*. – 2025. – № 6(162). – С. 42–48.
11. Узьянбаев Р.М., Бобренева Ю.О., Повещенко Ю.А. и др. Численное моделирование пьезопроводящих процессов в двумерной постановке для трещиновато-пористого пласта. // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН*. – 2024. – № 35. – 17 с. DOI: 10.20948/rprpr-2024-35.
12. Химуля В.В., Барков С.О. Исследование процессов фильтрации и разрушения в породах-коллекторах подземных хранилищ газа с использованием цифрового анализа дан-

ных компьютерной томографии. // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2023. – № 4. – С. 2340502-1–2340502-8.

13. Barkov S., Khimulia V. Study of elastic-strength properties of lowpermeability reservoir rocks in the Verkhnevilyuchanskoye oil and gas field on a true triaxial loading unit. // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2910. No. 1. – pp. 020115.

14. Gutierrez M.S., Lewis R.W. Coupling of fluid flow and deformation in underground formations. // Journal of Engineering Mechanics. – 2002. – Vol. 128(7). – pp. 779–787.

15. Dimaki A.V., Shilko E.V., Astafurov S.V., Psakhie S.G. The influence of fluid filtration on the strength of porous fluidsaturated brittle materials. // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2016. – No. 4. – pp. 220–247.

16. Lie K.A. An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB reservoir simulation toolbox (MRST). // Cambridge University Press, 2019. DOI: 10.1017/9781108591416.

17. Nassan T. H., Amro M. Finite element simulation of multiphase flow in oil reservoirs – comsol multiphysics as fast prototyping tool in reservoir simulation. // Mining Science and Technology. – 2019. – Vol. 4. No. 3. – pp. 220–226.

## References

1. Ananov K.M.1, Alekseeva E.A.1, Tverdokhlebov V.P. Using cavitation for purification of production water of oil fields. Advances in Current Natural Sciences. 2021. No. 5. pp. 45–50. (In Russ.)

2. Bobreneva Yu.O., Mazitov A.A., Gubaydullin I.M. Mathematical modeling of fluid flow processes in the fracture-porous reservoir. In: Proc. of the IV Int. Conf. and Youth School “Information Technology and Nanotechnology” (ITNT 2018). Samara. New Technology. 2018. pp. 1775–1780. (In Russ.)

3. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Mathematical model for injection of viscoelastic compositions into the productive formation. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023. Vol. 334. No. 3. pp. 218–228. DOI 10.18799/24131830/2023/3/3791. (In Russ.)

4. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Estimation of the hydrodynamic perfection of the well-reservoir system at the stage of opening a productive reservoir. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 14. No. 4. pp. 108–123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009. (In Russ.)

5. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Preservation of filtration and capacity properties of productive formations during their temporary isolation. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 180–195. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.56.001. (In Russ.)

6. Gilmanova N.V., Taracheva E.S., Sivkova A.V. Forecast of area of capillary-pressurized oil for low-permeable collectors when justification of residual oil saturation by various ways. Oil Field Engineering. 2020. No. 2(614). pp. 12–18. DOI: 10.30713/0207-2351-2020-2(614)-12-18. (In Russ.)

7. Guzhel Yu.A. Industrial treatment of oil and gas. Blagoveshchensk. Amur State University. 2021. 115 p. (In Russ.)

8. Ermak A.A., Fonin M.F., Grishin P.F. Oil dispersed systems. Novopolotsk. Polotsk State University named after E. Polotsk. 2023. 184 p. (In Russ.)

9. Indrupskiy I.M., Anikeev D.P., Zakirov E.S., Alekseeva Yu.V. Consideration of geomechanical effects in reservoir simulation for hydrocarbon field development. Actual Problems of Oil and Gas. 2022. Issue 4(39). pp. 75–102. (In Russ.)

10. Kadet V.V., Tiutiaev A.V., Vasilev I.V., Kuznetsova E.M., Kuznetsov Yu.G. Research and modeling of formation fluid filtration in MATLAB. Reservoir Simulation Toolbox. Business magazine Neftegaz.RU. 2025. No. 6(162). pp. 42–48. (In Russ.)

11. Uzyanbaev R.M., Bobreneva Yu.O., Poveshchenko Yu.A. et al. Numerical modeling of piezoconducting processes in a two-dimensional setting for a fractured-porous formation. Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences. 2024. No. 35.17 p. (In Russ.)
12. Khimulia V.V., Barkov S.O. Investigation of filtration and destruction processes in reservoir rocks of underground gas storage facilities using digital analysis of computed tomography data. Scientific Notes of the Physics Faculty of Moscow University. 2023. No. 4. pp. 2340502-1–2340502-8. (In Russ.)
13. Barkov S., Khimulia V. Study of elastic-strength properties of lowpermeability reservoir rocks in the Verkhnevilyuchanskoye oil and gas field on a true triaxial loading unit. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2910. No. 1. pp. 020115.
14. Gutierrez M.S., Lewis R.W. Coupling of fluid flow and deformation in underground formations. Journal of Engineering Mechanics. 2002. Vol. 128(7). pp. 779–787.
15. Dimaki A.V., Shilko E.V., Astafurov S.V., Psakhie S.G. The influence of fluid filtration on the strength of porous fluidsaturated brittle materials. PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. No. 4. pp. 220–247.
16. Lie K.A. An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB reservoir simulation toolbox (MRST). Cambridge University Press. 2019. DOI: 10.1017/9781108591416.
17. Nassan T. H., Amro M. Finite element simulation of multiphase flow in oil reservoirs – comsol multiphysics as fast prototyping tool in reservoir simulation. // Mining Science and Technology. 2019. Vol. 4. No. 3. pp. 220–226.



УДК 553.982.239

DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p

Оригинальная статья

## Методика прогноза и поисков карбонатных резервуаров сверхвязкой нефти казанского яруса Мелекесской впадины

Р.А. Мударисова<sup>1,2</sup>, Р.Г. Лукьянова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008,  
г. Казань, ул. Кремлевская, 18, e-mail: rayshania@mail.ru;

<sup>2</sup> Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087,  
г. Казань, ул. Даурская, 28

Статья поступила: 12.05.2025, доработана: 10.11.2025, принята к публикации: 13.11.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Для нефтяных районов Европейской части России характерна тенденция падения темпов добычи традиционных углеводородов (УВ), поэтому поиск и освоение трудноизвлекаемых запасов и нетрадиционных коллекторов становится все серьезнее и актуальнее, а их запасы, к каковым относится сверхвязкая нефть (СВН) служат источником прироста УВ сырья в регионе. В недрах республики Татарстан сосредоточены значительные запасы СВН, приуроченные как к терригенным коллекторам уфимского яруса, так и карбонатным резервуарам казанского яруса пермской системы. Большинство методик поисков и разведки подобного рода УВ сырья разработаны для закономерно размещающихся продуктивных терригенных ловушек уфимского яруса, поэтому залежи СВН казанского яруса долгое время были второстепенными по перспективам их освоения. **Цель исследований.** Разработка методики прогноза и поисков залежей сверхвязкой нефти отложений казанского яруса в пределах Мелекесской впадины и уточнение перспектив нефтеносности. **Методы исследования.** Для решения поставленной цели авторами выполнено комплексирование данных сейсморазведочных работ, ядерного материала и геофизических исследований структурных и поисково-оценочных скважин, а также ареалов распространения залежей традиционной и сверхвязкой нефти с учетом тектонической и палеотектонической позиции региона. **Результаты работы.** Приведенная в статье методика поисков органогенных резервуаров пермской системы Мелекесской впадины Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна основана на выявленной авторами пространственно-генетической связи органогенных и рифовых построек раннеказанского возраста с позднедевонским. Анализ данных позволил авторам разработать критерии нефтеносности отложений казанского яруса в пределах Мелекесской впадины, которые выражаются в наличии рифогенных построек в верхнедевонских отложениях, унаследованности органогенных структур вверх по разрезу, залежей нефти в нижележащих отложениях осадочного чехла, продуктивных высокочемных органогенных и оолитовых разностей в карбонатных породах казанского яруса, изолированных глинистыми породами. Методика позволяет выявить пропущенные залежи СВН казанского яруса, контролируемые карбонатными резервуарами и нарастить запасы углеводородного сырья в пределах Мелекесской впадины.

**Ключевые слова:** сверхвязкая нефть, Мелекесская впадина, ловушка углеводородов, органогенная постройка, сейсморазведочные исследования.

**Благодарности:** Работа выполнена за счет гранта Республики Татарстан, предоставленного молодым ученым и молодежным научным коллективам на проведение научных исследований в наиболее перспективных и значимых для развития Республики Татарстан областях.

**Для цитирования:** Мударисова Р.А., Лукьянова Р.Г. Методика прогноза и поисков карбонатных резервуаров сверхвязкой нефти казанского яруса Мелекесской впадины. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 137–150. DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p

DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p

Original paper

## Searching and exploration methodology for carbonate reservoirs of the Kazanian Stage ultraviscous oil the Melekess Depression

R.A. Mudarisova<sup>1,2</sup>, R.G. Lukyanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kazan (Volga region) Federal University, 18 Kremlevskaya Str., Kazan 420008, Russian Federation, e-mail: rayshania@mail.ru;

<sup>2</sup> Institute for problems of ecology and mineral wealth use, Tatarstan Academy of Sciences, 28 Dauraskaya Str., Kazan 420087, Russian Federation

Received: 12.05.2025, revised: 10.11.2025, accepted: 13.11.2025

**Abstract: Relevance.** For the oil-producing regions of the European part of Russia, a trend of declining production rates of conventional hydrocarbons is characteristic. Consequently, the search for and development of hard-to-recover reserves and unconventional reservoirs is becoming increasingly critical. The reserves of ultraviscous oil, classified among such resources, serve as a source of growth of hydrocarbons raw materials in the region. In the depths of the Republic of Tatarstan, significant reserves of ultraviscous oil are concentrated, confined to both terrigenous reservoirs of the Ufimian Stage and carbonate reservoirs of the Kazanian Stage of the Permian System. Most of the Searching and exploration methodologies of this type of hydrocarbon raw materials have been developed for regularly located productive terrigenous traps of the Ufimian Stage, therefore the deposits of ultraviscous oil of the Kazanian Stage have long been secondary in terms of their development prospects. **Aim.** Development of a searching and exploration methodology deposits of ultraviscous oil in the Kazanian Stage within the Melekess Depression and clarification of oil potential. **Methods.** To achieve this goal, the authors integrated seismic data, geophysical and core material from structural and exploration wells, as well as areas of distribution of traditional and ultraviscous oil deposits, taking into account the tectonic and paleotectonic position of the region. **Results.** The searching methodology for organogenic reservoirs of the Permian System of the Melekess Depression of the Volga-Ural oil and gas basin presented in the article is based on the spatial and genetic relationship of organogenic and reef structures of the Early Kazanian age with the Late Devonian identified by the authors. The data analysis allowed the authors to develop criteria for the oil presence of the Kazanian Stage deposits within the Melekess Depression, which are expressed in the presence of reef structures in the Upper Devonian deposits, the inheritance of organogenic structures up the section, oil deposits in the underlying sedimentary cover deposits, and productive high-capacity organogenic and oolitic varieties in the carbonate rocks of the Kazanian Stage, isolated by clayey rocks. The methodology allows identifying missed deposits of ultraviscous oil of the Kazanian Stage controlled by carbonate reservoirs and increasing hydrocarbon reserves within the Melekess Depression.

**Keywords:** ultraviscous oil, Melekess Depression, hydrocarbon trap, organogenic structure, seismic exploration research.

**Acknowledgements:** *The work was carried out at the expense of a grant from the Republic of Tatarstan, provided to young scientists and youth research teams to conduct scientific research in the most promising and significant areas for the development of the Republic of Tatarstan.*

**For citation:** Mudarisova R.A., Lukyanova R.G. Searching and exploration methodology for carbonate reservoirs of the Kazanian Stage ultraviscous oil the Melekess Depression. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 137–150. DOI: 10.46698/h5492-0913-2863-p

## Введение

Крупные и средние месторождения УВ центральных областей Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна, которые обеспечивают основную добычу нефти, находятся на поздней стадии разработки [Муслимов, 2021]. Поиски и освоение сверхвязкой нефти (СВН), как одного из источников прироста запасов УВ в регионе, представляют собой актуальную задачу для недропользователей.

В отложениях пермской системы на территории республики Татарстан содержатся значительные запасы сверхвязкой нефти, приуроченные как к терригенным коллекторам уфимского яруса, так и карбонатным породам казанского яруса пермской системы. Первостепенным объектом изучения различными методами, начиная с 70-х годов прошлого века по настоящее время, являются залежи СВН в уфимском ярусе, приуроченные в современном тектоническом плане к западному склону Южно-Татарского свода и контролируемые песчаными баровыми телами. На данный момент более десяти залежей находятся в разработке [Успенский и др., 2008; Хисамов и др., 2021, 2022]. Залежи СВН казанского яруса восточного борта Мелекесской впадины, гораздо менее изученные и сложные по геологическому строению, имеют второстепенное значение по запасам и перспективам их поисков и освоения [Мударисова и др., 2025], они изучались, в большой степени, в ходе структурного бурения [Успенский и др., 2008; Хисамов и др., 2022].

Научная новизна работы состоит в том, что установленная авторами ранее пространственно-генетическая связь нижнеказанских органогенных структур с верхнедевонскими позволяет разработать методику прогноза и поисков карбонатных резервуаров сверхвязкой нефти казанского яруса Мелекесской впадины.

Изучение участков, перспективных на поиски залежей и месторождений СВН пермской системы, большинством ученых и специалистов республики Татарстан было основано на исследовании кернового и каротажного материалов, полученных в ходе структурного бурения 70–80-х годов прошлого столетия. Специалистами ПАО «Татнефть» разработана методика геологоразведочных работ на поиски и разведку залежей СВН уфимского яруса Южно-Татарского свода, основанная на доказанном баровом развитии песчаных тел, образующих структурные гряды северо-западного простирания, толщиной более 15 м [Хисамов и др., 2022].

На стадии выявления пермских объектов для постановки поискового бурения в республике Татарстан применяется широкий комплекс геофизических и геохимических методов, среди которых выделяются:

- комплексная интерпретация геофизических методов исследования электро-разведки и магниторазведки для поиска залежей СВН [Швыдкин, 2000; Войтович и др., 2013]. Выполняются построения изолиний потенциалов естественного поля (метод ЕП) и изодинам аномального магнитного поля (метод МП). Качественная интерпретация включает в себя выделение локальных аномальных объектов, определение их геологической природы, линейных размеров, предполагаемых границ скоплений СВН, а аномальные зоны внутри контура определяют положение купольных частей структур;

- высокоточная гравиразведка [Слепак, 2022], в результате которой анализируются данные о плотностных особенностях пород, являющихся физико-геологической основой интерпретации аномального гравитационного поля. Гравитационные аномалии, создаваемые органогенными структурами, могут являться поисковыми признаками скопления СВН;

– геохимическая съемка для определения степени герметичности покрышки залежи СВН. Выполняется построение карт изолиний (изогаз) по содержанию газов, в том числе и углеводородных, а также карт содержания микроэлементов, которые кратно превышают фоновые концентрации. Максимальные значения изогаз показывают зону негерметичности покрышки над залежью СВН [Хисамов и др., 2022];

– комплексные работы в неглубоких скважинах, включающие в себя малоглубинную модификацию МОГТ-2D, электротомографию и газометрическую съемку. Данные опытные исследования позволяют получить временные разрезы, по которым можно выделить надежные отражающие границы в отложениях пермской системы [Хисамов и др., 2022];

– геофизический комплекс для определения границ геологических слоев верхней части разреза с помощью импульсного электромагнитного радиолокатора подповерхностного зондирования, георадар «ЛОЗА», разработанный сотрудниками ВНИИСМИ (г. Москва). Результатом обработки георадиолокационных данных являются временные разрезы (радарограммы), на которых отображается волновая картина с особенностями строения участков исследования. На радарограммах возможно выделение особенностей геологического строения пластов, нефтенасыщенных толщин, углового и стратиграфического несогласий по типу отраженных границ. Стратиграфическая привязка отражающих границ к реальным геологическим границам осуществляется на основе сопоставления с данными отбора керн и материалов интерпретации ГИС в скважинах. По результатам выполняется построение структурных карт по выдержанным отраженным границам электромагнитного импульса, с выделением нефтенасыщенной толщины залежи СВН (Способ картирования структурных поднятий в верхней части осадочного чехла и прогнозирования сверхвязких нефтей. Патент RU2551261C1. 2015. Хисамов Р.С., Динмухамедов Р.Ш., Войтович С.Е., Чернышова М.Г., Дергунов И.В.).

Территория Мелекесской впадины обладает высокими перспективами выявления залежей СВН, на восточном борту которой самым крупным месторождением в нижнеказанском зонально нефтебитуминозном терригенно-карбонатном комплексе является Горское месторождение СВН с карбонатными продуктивными коллекторами. Породы-коллекторы сложены преимущественно двумя литотипами – реликтово-органогенными и оолитовыми известковистыми доломитами и обладают высокими значениями фильтрационно-емкостных свойств и нефтенасыщения. Нефтеносные продуктивные отложения залегают на небольших глубинах до 300 м. Средние значения параметров для обоих литотипов составляют: открытая пористость 16,75 и 19,92%, проницаемость  $130,27 \cdot 10^{-3}$  и  $243,12 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, нефтенасыщенность по массе составляет, соответственно, 4,83 и 6,19% [Мударисова и др., 2025]. Гипергенные изменения Горской залежи сверхвязкой нефти вызвали неравномерное насыщение нефтью, как по площади, так и по разрезу, а также отсутствие четко выраженного водонефтяного контакта, что значительно усложнило геологическое строение карбонатного резервуара.

### Методы исследования

Для выявления скоплений СВН в пределах Мелекесской впадины, авторами проведено комплексное изучение палеотектонического развития территории, условий формирования нижнеказанских ловушек, данных сейсморазведки, лабора-



торные исследования геохимического состава пород коллекторов и покрышек, а также состава и свойств пластовых флюидов на примере Горского месторождения СВН. Так, в работе [Мударисова и др., 2021] впервые выявлены закономерности пространственно-генетической связи органогенных ловушек пермского возраста с более древними структурами рифогенного типа позднедевонского возраста. По палеотектоническим и палеогеографическим реконструкциям, проведенным авторами ранее [Мударисова и др., 2021, 2025], установлена органогенная природа ловушки казанского яруса Горского участка. Генетически, формирование Горской среднепермской структуры связано с циклическим и унаследованным развитием рифогенных и органогенных структур, начиная с позднефранско-фаменского времени, когда на изучаемой территории существовал Усть-Черемшанский внутри-формационный некомпенсированный прогиб Камско-Кинельской системы прогибов (ККСП) (рис. 1).

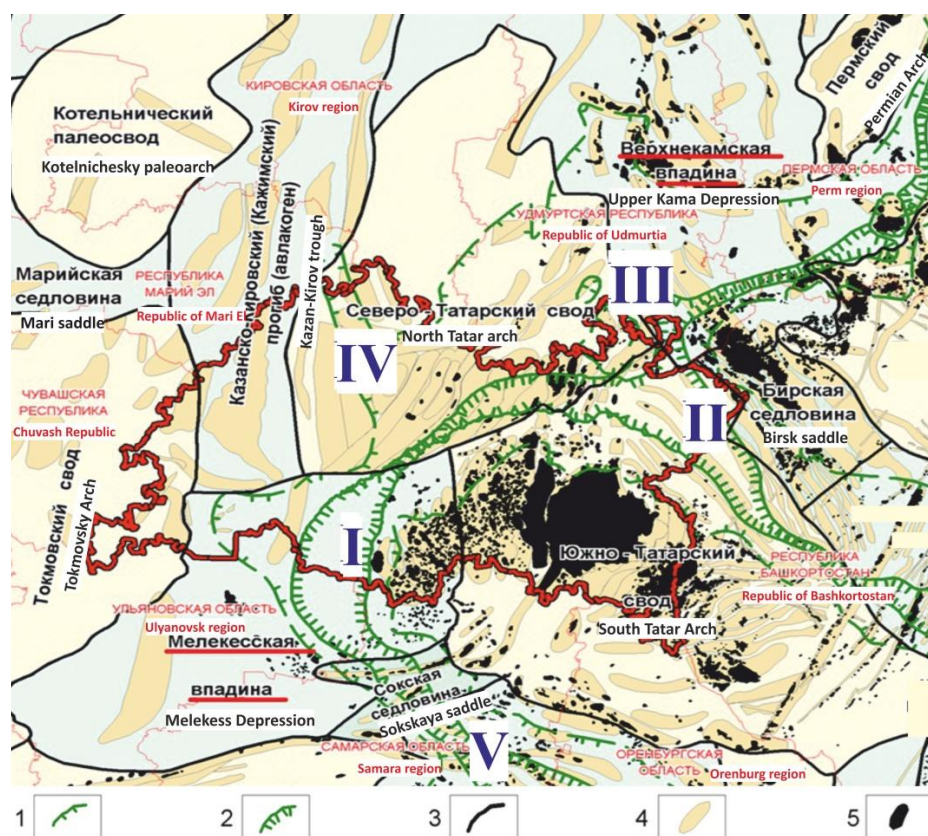


Рис. 1. Современная тектоническая схема Республики Татарстан и сопредельных регионов (по данным ПАО «Татнефть»). Палеопрогибы: I – Усть-Черемшанский, II – Нижнекамский, III – Можгинский, IV – Казанбаишский, V – Муханово-Ероховский. Границы Камско-Кинельской системы палеопрогибов: 1 – внутренней бортовой зоны, 2 – осевой зоны; 3 – современные границы структур первого порядка, 4 – валы, 5 – нефтяные месторождения /

Fig. 1. Modern tectonic map of the Republic of Tatarstan and adjacent regions (according to PJSC Tatneft). Paleo-depressions: I – Ust-Cheremshanskian, II – Nizhnekamskian, III – Mozhginskian, IV – Kazanbashskian, V – Mukhanovo-Erokhovskian. Boundaries of the Kama-Kinelskaya system paleo-depressions: 1 – inner marginal zone, 2 – axial zone; 3 – modern boundaries of first-order structures, 4 – shafts, 5 – oil fields

Исследования с помощью метода изобахического треугольника и графика роста структур в комплексе с анализом сейсмоволновой картины профилей показали, что

над амплитудными рифовыми постройками позднефранского-фаменского возраста, расположенными на палеошельфах Усть-Черемшанского некомпенсированного прогиба отмечается унаследованное развитие органогенных построек вплоть до казанского века. Унаследованные структуры менее контрастны и развивались со смещением по отношению к цокольным органогенным постройкам (рис. 2). Также необходимо отметить, что не все нижнеказанские органогенные тела выделяются в сейсмоволновом поле, что является осложняющим фактором для поисков такого рода ловушек. Поэтому, для прогноза и поисков подобного типа структур помимо вышеперечисленных данных, необходимо учитывать критерии нефтегазоносности изучаемой территории, такие как генетический – анализ ареалов распространения залежей традиционной и сверхвязкой нефти с учетом тектонической и палеотектонической позиции региона, и литолого-фациальный – выявление продуктивных высокочемских органогенных и оолитовых карбонатных пород в отложениях казанского яруса.

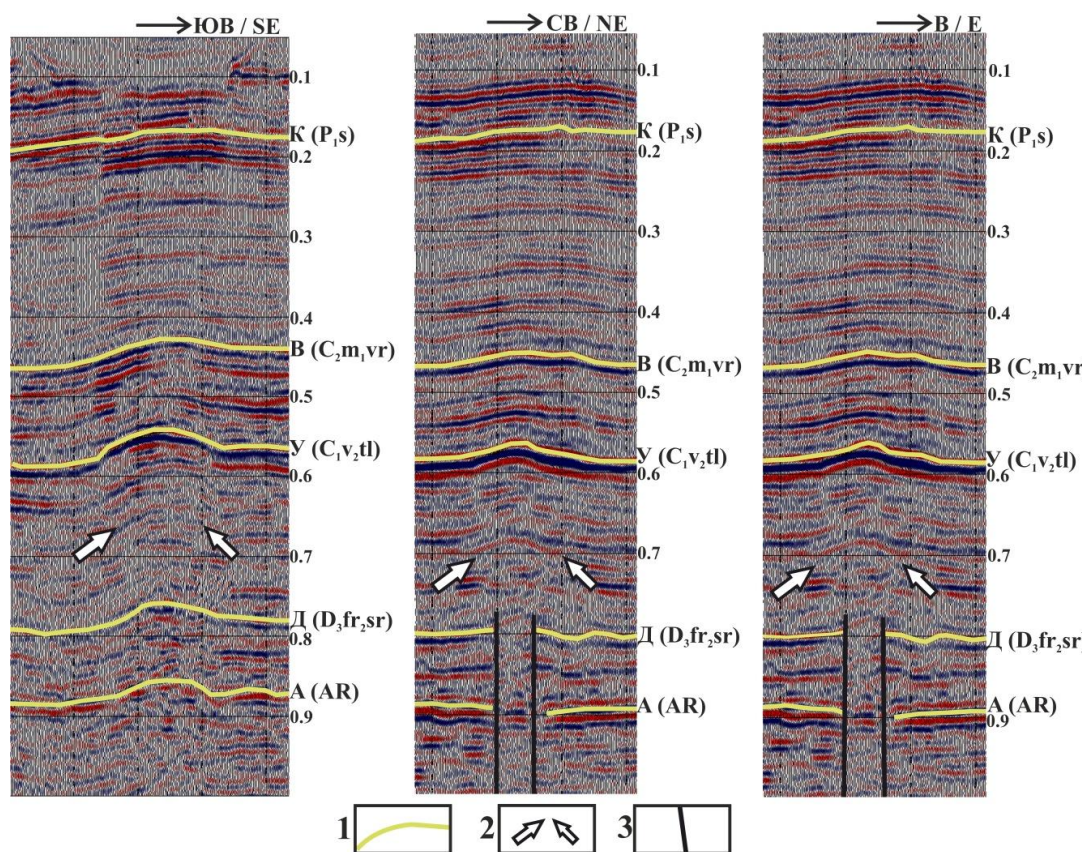


Рис. 2. Фрагменты временных разрезов сейсмопрофилей восточного борта Мелекесской впадины. 1 – границы отражающих горизонтов, 2 – рифогенные постройки, 3 – тектонические нарушения /

Fig. 2. Fragments of time sections of seismic profiles of the Eastern Side of the Melekess Depression.

1 – boundaries of reflecting horizons, 2 – reef structures, 3 – tectonic faults

## Результаты и обсуждение

Изучаемая территория в среднепермское (раннеказанское) время была приурочена к Татарскому палеосводу и, по В.И. Игнатьеву [Игнатьев, 1976], представляла собой зону отложения фаций нормально-соленого моря, с формированием рифовых тел.



По мнению С.С. Эллерна, эволюция рифообразования во времени и в пространстве подчиняется единому историко-геологическому процессу, связана с направленным развитием осадочно-породного бассейна и является периодической в течение одного тектонического цикла [Эллерн, 1980]. Периодичность или цикличность развития характерна для многих геологических объектов, например для углей [Трощенко, 2017].

Месторождения углеводородов, контролируемые рифогенными ловушками пермского возраста широко распространены в нефтегазоносных бассейнах (НГБ) мира: в Пермском НГБ – месторождения Кремнитц, Эбо, Сан-Андреас; в Сычуаньском НГБ – месторождение Юаньба, в Волго-Уральском НГБ – Ишимбайское, Карташевское, Совхозное, Введенское, Кунакбаевское, Уметовское, Антиповское месторождения; в Тимано-Печорском НГБ – Лаявожское, Южно-Хыльчуйское, Ярейюское месторождения; в Прикаспийском НГБ – Карачаганак, Бозоба, Западно-Тепловское, Восточно-Гремячинское месторождения [Залежи ..., 1982; Weidlich, 2002; Kuznetsov, 2018; Журавлева, 2020; Евдокимов, 2020].

Формирование изучаемой Горской структуры Мелекесской впадины продолжалось в течение герцинской эпохи тектогенеза. Также необходимо учитывать и геоморфологическую дифференциацию в период осадконакопления, т.е. продольную миграцию (смещение) рифов в позднефранско-фаменское время во время развития на изучаемой территории Усть-Черемшанского некомпенсированного прогиба. Сформировавшиеся в бортовых зонах прогиба рифогенные постройки располагались на бровке шельфа и отделяли шельф от глубоководной части (рис. 3). В процессе повышения уровня моря рифовые тела мигрировали в сторону бортовых частей Усть-Черемшанского некомпенсированного прогиба, при понижении уровня – в сторону его осевой, наиболее погруженной части, например, аналогично происходило формирование рифов в краевых частях платформы формации Чансин в восточной части Сычуаньского нефтегазоносного бассейна [Tan et al., 2020; Qi et al., 2021].

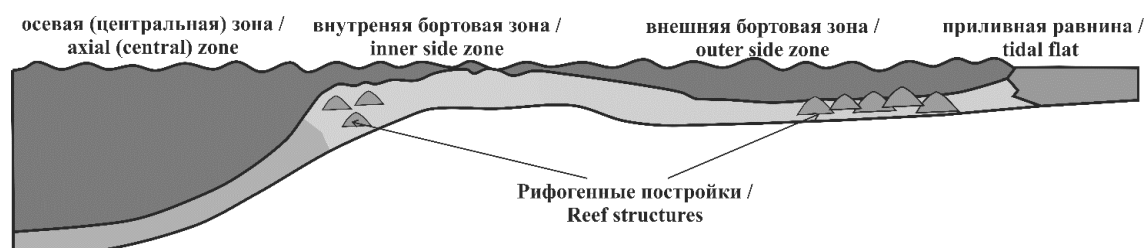


Рис. 3. Схематическая иллюстрация формирования Усть-Черемшанского внутриформационного некомпенсированного прогиба Камско-Кинельской системы /  
Fig. 3. Schematic illustration of the formation of the Ust-Cheremshanskian intraformational uncompensated Depressions of the Kama-Kinel System

Рис. 3. Схематическая иллюстрация формирования Усть-Черемшанского внутриформационного некомпенсированного прогиба Камско-Кинельской системы /  
Fig. 3. Schematic illustration of the formation of the Ust-Cheremshanskian intraformational uncompensated Depressions of the Kama-Kinel System

В разрезе осадочного чехла под Горским месторождением СВН выявлено и находится в разработке Осеннее месторождение нефти с залежами в отложениях турнейского, визейского и башкирского ярусов (рис. 4) [Нефтегазоносность ..., 2007].

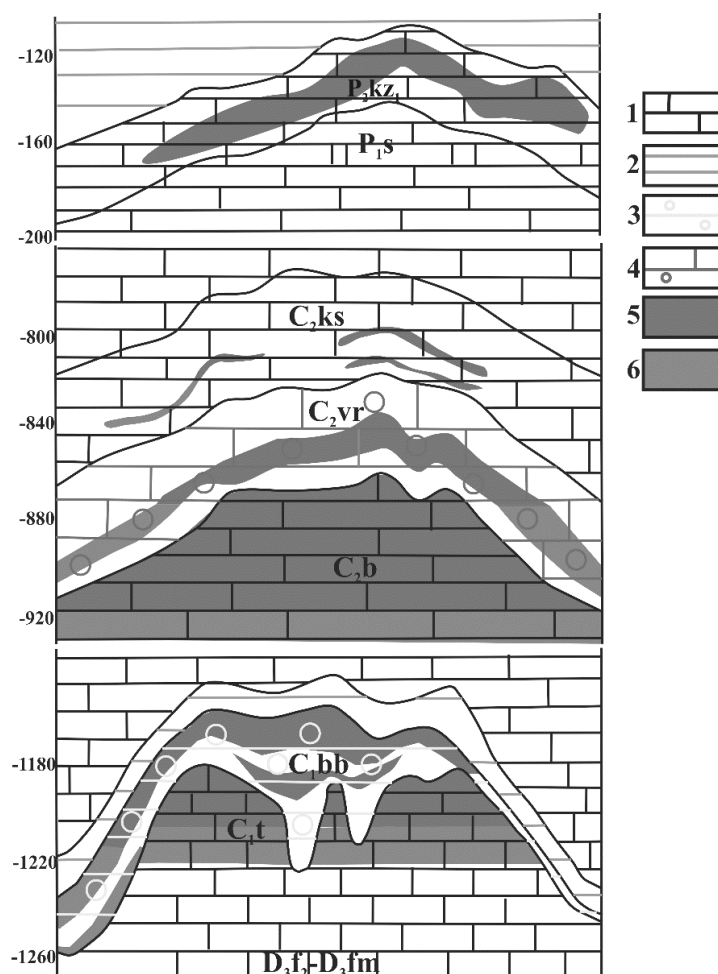


Рис. 4. Положение залежей УВ в продуктивных отложениях каменноугольной и пермской систем на примере месторождений восточного борта Мелекесской впадины.

Породы: 1 – карбонатные, 2 – глинистые, 3 – песчаные, 4 – переслаивание карбонатных с глинистыми, 5 – нефтеносные, 6 – водоносные

Fig. 4. The position of hydrocarbon deposits in productive deposits of the Carboniferous and Permian Systems on the example of deposits on the Eastern Side of the Melekess Depression  
Rocks: 1 – limestones, 2 – clay, 3 – sand, 4 – interbedding of carbonate with clay, 5 – oil-bearing, 6 – water-bearing

Скорость формирования рифов намного выше осадения не рифовых образований. Рифовые и органогенные постройки, из-за разности значений плотности и скорости упругих волн в ансамбле вмещающих пород, четко отображаются на сейсмоволновой картине временных разрезов. В отличие от малоамплитудных антиклинальных ловушек пластового типа, органогенные тела имеют холмообразную форму, выраженный масштаб и размытые боковые границы, например [Kumar, Sain, 2023; Zhao et al., 2024]. Отражение на волновой картине варьируется в зависимости от типа рифа, масштаба и физических свойств резервуара, а также от глубины.

Осадочный чехол и кристаллическое основание республики Татарстан широко изучены сейсморазведочными исследованиями в модификациях МОГТ 2D и МОГТ 3D. Данные работы проводятся для исследования рельефа и строения кристаллического фундамента, тектонических нарушений в теле фундамента и в осадочной тол-



ще, выявления антиклинальных и литологических ловушек нижней и средней частей осадочного чехла, выделения зон эрозионных врезов [Дробинский и др., 2020] и подготовки объектов для глубокого бурения. При этом также осуществляется выделение органогенных построек в отложениях девонской и каменноугольной систем. Выявление рифогенных структур казанского возраста затруднено, во-первых, малой глубиной их залегания, ограничивающей возможности сейсморазведки, во-вторых, сложным строением и слабой контрастностью объектов.

Высокая степень изученности сейсморазведкой территории Мелекесской впадины и генетически связанного с ней Усть-Черемшанского внутриформационного прогиба, позволяет исследователям уверенно выделять рифогенные постройки в верхнедевонских–нижнекаменноугольных отложениях на сеймопрофилях (рис. 2), а в случаях, когда их выделение в отложениях пермской системы затруднено, можно предполагать локализацию органогенных тел, основываясь на описанных выше закономерностях унаследованного характера формирования рифов в пределах осадочного чехла.

Для территории Мелекесской впадины при проведении геологоразведочных работ, направленных на прогнозирование, поиски и разведку скоплений сверхвязкой нефти в карбонатных отложениях казанского возраста, аналогичных Горскому месторождению СВН, необходимо учитывать генетические и литолого-фациальные критерии, а также палеотектонические условия формирования ловушек.

Для разработки методики прогноза и поисков карбонатных резервуаров казанского яруса авторами рассмотрен участок развития органогенных структур в пределах восточного борта Мелекесской впадины, который совпадает с областью распространения фаций нормально-соленого моря по Игнатьеву ( $P_2kz_1$ ) [Игнатьев, 1976] и с бортовой палеошельфовой зоной ( $D_3fr_2-C_1t$ ) Усть-Черемшанского прогиба ККСР. В пределах изучаемого участка авторами проведены сопоставление и анализ следующих данных:

- ареалов распространения залежей нефти и сверхвязкой нефти [Нефтегазоносность ..., 2007; Успенский, Валеева, 2008];
- распространения локальных поднятий, выявленных по сейсморазведочным исследованиям, поисковому и структурному бурению;
- сейсмоволновой картины временных разрезов;
- данных керна структурных скважин.

Всего проанализировано более 60 структур, выделенных сейсморазведочными исследованиями по отражающим горизонтам А, Д, У, В,  $P_1s$ . Из них на 63% структур по сейсмоволновой картине выделяются аномалии типа «риф» в верхнедевонско-нижнекаменноугольных отложениях, а также прослеживается унаследованное развитие органогенных построек по разрезу вплоть до пермских с некоторым смещением по разрезу. К половине изучаемых локальных поднятий приурочены скопления нефти в отложениях каменноугольной системы, а также для одной трети структур характерно наличие сохранившихся гипергенно-преобразованных залежей СВН в казанском ярусе, где по данным керна структурных скважин коллекторы представлены оолитовыми и органогенными породами с нефтепроявлениями (рис. 5).

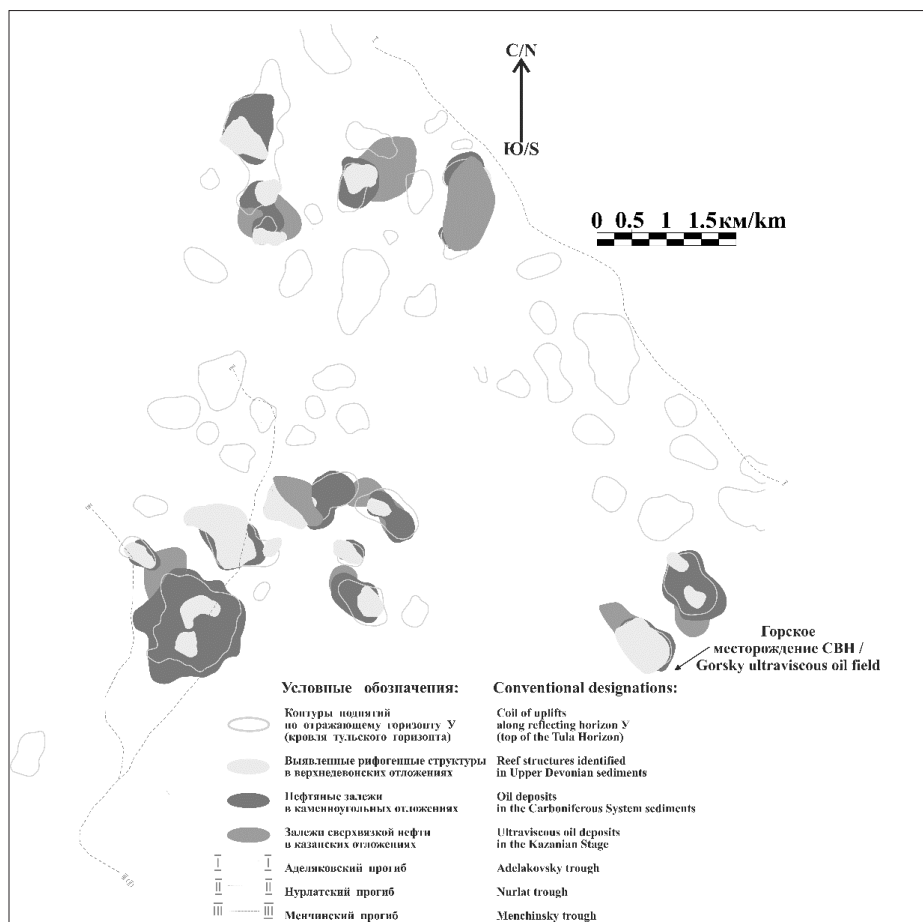


Рис. 5. Сопоставление критериев перспективности изучаемой территории восточного борта Мелекесской впадины (фрагмент) /

Fig. 5. Comparison of the criteria for the prospects of the studied territory of the eastern side of the Melekess Depression (fragment)

С целью прогнозирования залежей сверхвязкой нефти в карбонатных отложениях казанского яруса, авторами сформулированы следующие критерии перспективности территории:

- наличие рифогенных построек, приуроченных к верхнедевонским отложениям;
- унаследованность и смещение органогенных структур вверх по разрезу;
- наличие залежей нефти в отложениях нижнего и среднего отдела карбонатно-гипсовой системы;
- наличие органогенных и оолитовых разностей в карбонатных породах казанского яруса, характеризующихся высокими значениями фильтрационно-емкостных свойств;
- наличие покрывки для залежи СВН, обеспечивающей ее сохранность.

Поднятия, выявленные по отражающим горизонтам верхнепалеозойских отложений, преимущественно относятся к тектоно-седиментационному типу. Разработанные авторами методические приемы направлены на прогнозирование и поиски залежей сверхвязкой нефти в карбонатных коллекторах казанского яруса в пределах Мелекесской впадины. Область развития органогенных построек распространяется в юго-западном, юго-восточном и южном направлениях от изучаемого участка.

## Выводы

Проведен обзор существующих методик прогноза и поисков залежей сверхвязкой нефти, разработанных для терригенных отложений уфимского яруса и не применимых для карбонатных пород казанского яруса пермской системы. Комплексный анализ данных структурного, поискового бурения, сейсморазведочных работ, результатов исследований керна и ГИС на основе тектонической и палеотектонической позиции изучаемого региона позволил авторам установить пространственно-генетическую связь нижнеказанских органогенных структур с верхнедевонскими и разработать критерии нефтеносности отложений казанского яруса в пределах Мелекесской впадины.

Методика прогноза и поисков сверхвязкой нефти в продуктивных карбонатных породах казанского яруса состоит в учете совокупности выявленных авторами пяти критериев нефтегазоносности территории. Перспективными на поиски карбонатных резервуаров являются участки развития унаследованных по разрезу верхнедевонских рифовых структур, при наличии нефтеносности осадочного чехла, а также высокеемких коллекторов и изолирующих их флюидоупоров в нижнеказанских отложениях. Прогнозирование ловушек раннеказанского возраста с использованием разработанной методики позволит оптимизировать геологоразведочные работы на сверхвязкую нефть в пределах Мелекесской впадины, выявить пропущенные залежи СВН и прирастить запасы углеводородов.

## Литература

1. Войтович С.Е., Чернышова М.Г., Гаврилина Л.Г., Гатауллин Р.И., Гринько Ю.А., Дергунов И.В. Развитие геофизических и геохимических методов исследования для геологоразведочных работ поиска и разведки месторождений нефти и газа. // Георесурсы. – 2013. – Т. 1. № 51. – С. 22–26.
2. Дробинский А.А., Гольчикова Н.Н., Камнев П.П. Особенности строения и перспективы нефтегазоносности палеоканала, выявленного по данным МОГТ в восточной части Каракульско-Смушковской зоны поднятий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 3. – С. 114–126. DOI: 10.46698/VNC.2020.13.71.007.
3. Евдокимов Н.В. Особенности строения нижнепермских карбонатных резервуаров севера Печоро-Колвинского авлакогена и их нефтегазоносность. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 3(339). – С. 13–20. DOI: 10.30713/2413-5011-2020-3(339)-13-20.
4. Журавлева Л.М. Палеогеографические типы нижнепермских рифов юго-востока Восточно-Европейской платформы и их нефтегазоносность. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 2(338). – С. 13–18. DOI: 10.30713/2413-5011-2020-2(338)-13-18.
5. Залежи нефти и газа в ловушках неантиклинального типа: альбом-справочник. / Под редакцией В.В. Семенова. – М.: Недра, 1982. – 189 с.
6. Игнатьев В.И. Формирование Волго-Уральской антеклизы в пермский период. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1976. – 256 с.
7. Мударисова Р.А., Лукьянова Р.Г., Валеева С.Е., Успенский Б.В., Петрова Д.И., Мухаматдинов И.И. Моделирование карбонатного резервуара сверхвязкой нефти казанского яруса для определения приоритетных направлений освоения. // Георесурсы. – 2025. – № 27(1). – С. 267–274. DOI: 10.18599/grs.2025.1.12.
8. Мударисова Р.А., Лукьянова Р.Г., Успенский Б.В. Палеотектонические реконструкции условий формирования Горского месторождения сверхвязких нефтей. // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 6. – С. 27–31. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-27-31.

9. Муслимов Р.Х. Опыт Республики Татарстан по рациональному освоению нефтяных богатств недр: былое и думы о будущем. Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2021. – 680 с.
10. Нефтегазоносность Республики Татарстан. Геология и разработка нефтяных месторождений. Т.2. / Под редакцией Р.Х. Муслимова. – Казань: Фэн, 2007. – 524 с.
11. Слепак З.М. Планета Земля. Строение и энергетика планеты. Нефтяная геология, геофизика, экология. Зеленые технологии. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2022. – 177 с.
12. Трощенко В.В. Цикличность угленакопления и геотектоника. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 1. – С. 73–80. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9480.
13. Успенский Б.В., Валеева И.Ф. Геология месторождений природных битумов Республики Татарстан. Казань: ПФ «ГАРТ», 2008. – 347 с.
14. Хисамов Р.С., Базаревская В.Г., Аношин Д.В. Формирование комплексного научно-технического проекта ПАО «Татнефть» в области освоения трудноизвлекаемых запасов. // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 7. – С. 10–13. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-7-10-13
15. Хисамов Р.С., Бачков А.П., Войтович С.Е., Ахметшин А.З., Сухов К.А. Геологические основы поисков и разведки месторождений сверхвязкой нефти в центральной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Казань: Изд-во «Наследие нашего народа», 2022. – 184 с.
16. Швыдкий Э.К. Активные эпигенетические процессы в разрезах над залежами углеводородов и формирование геохимических и геофизических полей. Мониторинг геологической среды: активные эндогенные и экзогенные процессы. // Материалы I Всероссийской конференции. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2000. – С. 371–375.
17. Эллен С.С. О периодичности рифообразования и распространении рифовых образований в осадочно-породных бассейнах платформ. // Осадочные бассейны и их нефтегазоносность. М.: Наука, 1983. – С. 94–104.
18. Kumar P.C., Sain K. Machine learning elucidates the anatomy of buried carbonate reef from seismic reflection data. // Artificial Intelligence in Geosciences. – 2023. – Vol. 4. – pp. 59–67. DOI: 10.1016/j.aiig.2023.04.001.
19. Kuznetsov V.G. Reef construction in the second half of the permian and biotic crisis at the permian-triassic boundary. // Stratigraphy and Geological Correlation. – 2018. – Vol. 26. No. 7. – pp. 755–770.
20. Qi R., Xiayan T., Changhai X., Lianjin Zh., Tianjun H., Shumin L., Kongyun D., Baiyu P. Fine description of ramp-type small bioherms and breakthrough of “two bioherms in one well” in high-yield gas wells: A case study of the Changxing Formation small bioherm group in the eastern Sichuan Basin. // Natural Gas Industry B. – 2021. – Vol. 8. Issue 4. – pp. 384–392. DOI: 10.1016/j.ngib.2021.07.009
21. Tan L., Liu H., Tang Y., Tang Y., Luo B., Zhang Y., Yang Y., Liao Y., Du W., Yang X. Characteristics and mechanism of upper permian reef reservoirs in the eastern Longgang Area, Northeastern Sichuan Basin, China. // Petroleum. – 2020. – Vol. 6. Issue 2. – pp. 130–137. DOI: 10.1016/j.petlm.2019.06.008.
22. Weidlich O. Permian reefs re-examined: extrinsic control mechanisms of gradual and abrupt changes during 40 my of reef evolution. // Geobios. – 2002. – Vol. 35. Suppl. 1. – pp. 287–294. DOI: 10.1016/S0016-6995(02)00066-9.
23. Zhao H., Yi J., Zhang H., Zhao R., Zhang J., Dai J., Lu L., An H. Seismic geological characteristics and gas reservoir distribution of Changxing Formation biological bio-reef reservoir in the Longhuichang-Tieshan area, northeastern Sichuan Basin, China. // Journal of Natural Gas Geoscience. – 2024. – Vol. 9. Issue 2. – pp. 111–122. DOI: 10.1016/j.jnggs.2024.03.004.

## References

1. Voytovich S.E., Chernyshova M.G., Gavrilina L.G., Gataullin R.I., Grinko Yu.A., Dergunov I.V. Development of geophysical and geochemical methods of research for exploration and prospecting of oil and gas fields. Georesources. 2013. Vol. 1. No. 51. pp. 22–26. (In Russ.)



2. Drobinskiy A.A., Golchikova N.N., Kamnev P.P. Structure features and oil and gas prospect of paleochannel revealed with 2d seismic data in the East of Karakulsko-Smushkovskaya Uplift Zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10 No. 3. pp. 114–126. DOI: 10.46698/VNC.2020.13.71.007 (In Russ.)
3. Evdokimov N.V. Some specific features of the structure of the Lower Permian carbonate reservoirs within the Northern part of Pechora-Kolva aulacogen and their oil and gas potential. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2020. No. 3(339). pp. 13–20. DOI: 10.30713/2413-5011-2020-3(339)-13-20. (In Russ.)
4. Zhuravleva L.M. Paleogeographic types of Lower Permian reefs of the East European Platform and their oil and gas potential. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2020. No. 2(338). pp. 13–18. DOI: 10.30713/2413-5011-2020-2(338)-13-18. (In Russ.)
5. Oil and gas deposits in non-anticlinal traps. Reference album. Ed. V.V. Semenov. Moscow. Nedra. 1982. 189 p. (In Russ.)
6. Ignatiev V.I. Formation of the Volga-Ural antecline during the Permian period. Kazan. Kazan University. 1976. 256 p. (In Russ.)
7. Mudarisova R.A., Lukyanova R.G., Valeeva S.E., Uspensky B.V., Petrova D.I., Mukhamatdinov I.I. Modeling of a carbonate reservoir of ultraviscous oil of the Kazanian Stage to determine priority areas for development. *Georesources*. 2025. No. 27(1). pp. 22–26. DOI: 10.18599/grs.2025.1.12. (In Russ.)
8. Mudarisova R.A., Lukyanova R.G., Uspensky B.V. Paleotectonic reconstructions of formation conditions of Gorskoye extra-heavy oil field. *Oil Industry*. 2021. No. 6. pp. 27–31. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-27-31. (In Russ.)
9. Muslimov R.Kh. The Republic of Tatarstan's Experience in Rational Development of Subsoil Oil Resources: The Past and Future Perspectives. Kazan: Fan Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan. 2021. 680 p. (In Russ.)
10. Oil and gas potential of the Republic of Tatarstan. *Geology and development of oil fields*. Vol. 2. Ed. R.Kh. Muslimov. Kazan. Fen. 2007. 524 p. (In Russ.)
11. Slepak Z.M. Planet Earth. Structure and energy of the planet. Oil geology, geophysics, ecology. Green technologies. Kazan. Kazan University. 2022. 177 p. (In Russ.)
12. Troschenko V.V. Cyclicity of coal accumulation: its bearing on the geotectonics. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 3. pp. 73–80. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9480. (In Russ.)
13. Uspensky B.V., Valeeva I.F. Geology of natural bitumen deposits in the Republic of Tatarstan. Kazan. GART. 2008. 347 p. (In Russ.)
14. Khisamov R.S., Bazarevskaya V.G., Anoshin D.V. Tatneft PJSC comprehensive R&D project for development of unconventional reserves. *Oil Industry*. 2021. No. 7. pp. 10–13. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-7-10-13. (In Russ.)
15. Khisamov R.S., Bachkov A.P., Voitovich S.E., Akhmetshin A.Z., Sukhov K.A. Geological foundations for the search and exploration of super-viscous oil deposits in the central part of the Volga-Ural oil and gas province. Kazan. Nasledie nashego naroda. 2022. 184 p. (In Russ.)
16. Shvydkin E.K. Active epigenetic processes in sections above hydrocarbon deposits and formation of geochemical and geophysical fields. Monitoring of the geological environment: active endogenous and exogenous processes. In: *Proceedings of the First All-Russian Conference*. Kazan. Kazan University. 2000. pp. 371–375. (In Russ.)
17. Ellern S.S. On the periodicity of reef formation and the distribution of reef formations in sedimentary-rock basins of platforms. In: *Sedimentary basins and their oil and gas potential*. Moscow. Nauka. 1983. pp. 94–104. (In Russ.)
18. Kumar P.C., Sain K. Machine learning elucidates the anatomy of buried carbonate reef from seismic reflection data. *Artificial Intelligence in Geosciences*. 2023. Vol. 4. pp. 59–67. DOI: 10.1016/j.aiig.2023.04.001.
19. Kuznetsov V.G. Reef construction in the second half of the permian and biotic crisis at the permian-triassic boundary. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2018. Vol. 26. No. 7. pp. 755–770.

20. Qi R., Xiayan T., Changhai X., Lianjin Zh., Tianjun H., Shumin L., Kongyun D., Baiyu P. Fine description of ramp-type small bioherms and breakthrough of “two bioherms in one well” in high-yield gas wells: A case study of the Changxing Formation small bioherm group in the eastern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry B*. 2021. Vol. 8. Issue 4. pp. 384–392. DOI: 10.1016/j.ngib.2021.07.009
21. Tan L., Liu H., Tang Y., Tang Y., Luo B., Zhang Y., Yang Y., Liao Y., Du W., Yang X. Characteristics and mechanism of upper permian reef reservoirs in the eastern Longgang Area, Northeastern Sichuan Basin, China. *Petroleum*. 2020. Vol. 6. Issue 2. pp. 130–137. DOI: 10.1016/j.petlm.2019.06.008.
22. Weidlich O. Permian reefs re-examined: extrinsic control mechanisms of gradual and abrupt changes during 40 my of reef evolution. *Geobios*. 2002. Vol. 35. Suppl. 1. pp. 287–294. DOI: 10.1016/S0016-6995(02)00066-9.
23. Zhao H., Yi J., Zhang H., Zhao R., Zhang J., Dai J., Lu L., An H. Seismic geological characteristics and gas reservoir distribution of Changxing Formation biological bio-reef reservoir in the Longhuichang-Tieshan area, northeastern Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*. 2024. Vol. 9. Issue 2. pp. 111–122. DOI: 10.1016/j.jnggs.2024.03.004.

УДК 911.2:502.1

DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v

Оригинальная статья

## Теоретико-методологические основы и региональные особенности выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных геосистем

З.В. Атаев 

Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Россия,  
367030, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 75, e-mail: zagir05@mail.ru

Статья поступила: 14.10.2025, доработана: 02.12.2025, принята к публикации: 08.12.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Статья посвящена решению фундаментальной проблемы ландшафтоведения – обоснованию самостоятельного таксономического статуса предгорных ландшафтов как особого класса геосистем, что остается предметом научной дискуссии. **Цель исследования:** комплексный анализ пространственно-временной организации предгорных ландшафтов на основе синтеза классических и современных подходов для разработки универсальных диагностических критериев их выделения и оценки их роли в устойчивом развитии горно-равнинных территорий. **Методы исследования.** На основе сравнительно-географического метода проведен комплексный анализ эволюции теоретических представлений и региональных особенностей предгорных ландшафтов различных горных систем мира. Исследование охватывает Северный Кавказ, адыры Тянь-Шаня, японскую Сатояму, Альпы, Карпаты, Анды, Гималаи и другие регионы. **Результаты.** Доказана универсальность триадной парадигмы («горы-предгорья-равнины») для различных физико-географических условий. Выявлены диагностические критерии выделения предгорных ландшафтов, включая морфометрические, литолого-геоморфологические, климатические и функциональные параметры. На основе оригинальных исследований автора раскрыта специфика пространственно-временной экотонности предгорных ландшафтов Северо-Восточного Кавказа. Разработана система диагностических признаков для объективного выделения предгорных ландшафтов. Показано прикладное значение выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных таксонов. Обоснована необходимость учета экотонной природы предгорий для ландшафтного планирования, рационального природопользования и разработки адаптивных стратегий управления горно-равнинными территориями в условиях глобальных изменений.

**Ключевые слова:** предгорные ландшафты, геосистема, парадинамический комплекс, географический экотон, триадная парадигма, диагностические критерии, устойчивое развитие.

**Благодарности:** Работа подготовлена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов 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. Теоретико-методологические основы и региональные особенности выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных геосистем. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v

DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v

Original paper

## Theoretical and methodological foundations and regional specifics of delineating foothill landscapes as independent geosystems

Z.V. Ataev 

Daghestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences,  
75 M. Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, e-mail: zagir05@mail.ru

Received: 14.10.2025, revised: 02.12.2025, accepted: 08.12.2025

**Abstract: Relevance.** The article deals with the solving a fundamental problem in landscape science – substantiating the independent taxonomic status of foothill landscapes as a distinct class of geosystems, which remains a subject of scientific debate. **Aim.** A comprehensive analysis of the spatial and temporal organization of foothill landscapes based on the synthesis of classical and modern approaches to develop universal diagnostic criteria for their identification and assessment of their role in the sustainable development of mountainous and lowland territories. **Methods.** Based on the comparative geographical method, a comprehensive analysis of the evolution of theoretical concepts and regional specifics of foothill landscapes in various mountain systems of the world was conducted. The study covers the North Caucasus, the adyrs of the Tien Shan, the Japanese Satoyama, the Alps, the Carpathians, the Andes, the Himalayas, and other regions. **Results.** The universality of the triadic paradigm (“mountains-foothills-plains”) for various physical-geographical conditions is proven. Diagnostic criteria for delineating foothill landscapes have been identified, including morphometric, lithological-geomorphological, climatic, and functional parameters. Based on the author’s original research, the spatio-temporal ecotone character of the foothill landscapes of the North-Eastern Caucasus is revealed. A system of diagnostic features has been developed for the objective identification of foothill landscapes. The applied significance of distinguishing foothill landscapes as independent taxonomic units is shown. The necessity of taking into account the ecotonic nature of foothills for landscape planning, rational use of natural resources and the development of adaptive strategies for managing mountainous and lowland territories in the context of global changes is substantiated.

**Keywords:** foothill landscapes, geosystem, paradinamic complex, geographical ecotone, triadic paradigm, diagnostic criteria, sustainable development.

**Acknowledgements:** *The work is presented within the framework of a major scientific project “Dynamics of the geoeological state of the river basins of the Northeastern Caucasus, Azerbaijan and Iran in the context of climate change and increasing anthropogenic pressure” (Agreement No. 075-15-2024-644).*

**For citation:** Ataev Z.V. Theoretical and methodological foundations and regional specifics of delineating foothill landscapes as independent geosystems. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2025. 15(4): 151–168. DOI: 10.46698/o0195-2486-7930-v

### Введение

Актуальность проблемы таксономического статуса предгорных ландшафтов имеет фундаментальное междисциплинарное значение, находясь на стыке теоретического ландшафтоведения, физической географии и прикладных аспектов территориального планирования. Предгорные территории, формирующие критически важные контактные зоны между контрастными геосистемами гор и равнин, представляют собой уникальные природные образования, характеризующиеся интен-



сивными вещественно-энергетическими потоками, нелинейной динамикой природных процессов и повышенной чувствительностью как к естественным флуктуациям среды, так и к антропогенному воздействию [Максютов, 1981; Hansen, di Castri, 1992]. Эти территории выступают в роли своеобразных «буферных систем», где происходит трансформация и перераспределение латеральных потоков вещества и энергии, что обуславливает их ключевую роль в функционировании горно-равнинных парадинамических комплексов.

История вопроса насчитывает более чем столетний период научной дискуссии о принципах выделения и таксономическом ранге предгорий, которая продолжает оставаться одной из центральных в современной физической географии [Николаев, 2003; Преображенский и др., 1988]. Эволюция научных представлений демонстрирует переход от упрощенных дихотомических моделей, рассматривавших предгорья либо как подкласс горных [Гвоздецкий, 1963], либо как модификацию равнинных ландшафтов [Исаченко, 1991], к более сложным триадным концепциям, обосновывающим их самостоятельный таксономический статус [Атаев, 2018]. Тем не менее, отсутствие консенсуса в методологических подходах к выделению этих переходных зон существенно затрудняет разработку единой классификационной системы ландшафтов и решение практических задач оптимизации природопользования.

Междисциплинарный контекст исследования предгорных ландшафтов значительно расширился в последние десятилетия благодаря развитию учения о геосистемах [Сочава, 1978], концепции парадинамических комплексов [Мильков, 1986] и теории барьерных ландшафтов [Максютов, 1981]. В рамках этой парадигмы в современной географии и экологии предгорья рассматриваются как классические географические экотоны. Эти динамичные переходные зоны характеризуются эмерджентными свойствами, которые возникают в результате нелинейного взаимодействия смежных геосистем и не сводятся к простой сумме их характеристик [Forman, 1995]. Таким образом, ключевой особенностью предгорий являются специфические процессы и закономерности, формирующиеся именно в условиях переходного режима, что и определяет необходимость их изучения как целостных самостоятельных образований.

Сравнительно-географический аспект приобретает особую значимость в контексте выявления универсальных закономерностей и региональной специфики структуры и функционирования предгорных ландшафтов различных горных систем мира. Анализ разнообразия их региональных проявлений – от аридных «адыров» и «прилавков» Средней Азии до влажно-тропического «пъедмонта» Анд, от антропогенно-трансформированной «Сатоямы» Японии до рекреационно-освоенных «Форальпен» Альп – позволяет разработать комплексные диагностические критерии выделения этих переходных зон [Костенко, 1999; Шальнев, 2004]. Существующее терминологическое разнообразие, отражающее исторически сложившиеся национальные научные школы, требует систематизации и интеграции в единую концептуальную схему.

Научная новизна настоящего исследования заключается в комплексном анализе пространственно-временной организации предгорных ландшафтов на основе синтеза классических теоретических подходов отечественного ландшафтоведения с современными методами количественного анализа и сравнительно-географическими обобщениями. Особое внимание уделяется разработке универсальных диагно-

стических критериев выделения предгорных экотонов и оценке их роли в устойчивом развитии горно-равнинных территорий.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов для решения прикладных задач рационального природопользования, оптимизации территориального планирования и разработки адаптивных стратегий управления природно-хозяйственными системами в условиях современных глобальных изменений.

### Методы исследования

Методологическую основу настоящего исследования составил системный подход, интегрированный с ключевыми теориями отечественного ландшафтоведения. В его рамках предгорная территория рассматривалась как целостная, структурно организованная и динамичная система. Такой взгляд обусловил выбор методов, направленных на выявление и анализ именно эмерджентных свойств, то есть тех, которые не могут быть выведены путем простого суммирования характеристик отдельных компонентов ландшафта. Теоретический фундамент опирается на: учение о геосистемах В.Б. Сочавы (1978), задающее рамки для анализа иерархической организации природно-территориальных комплексов; концепцию парадинамических комплексов Ф.Н. Милькова (1986), акцентирующую роль латеральных вещественно-энергетических потоков; и теорию барьерных ландшафтов Ф.А. Максютова (1981), раскрывающую механизмы ландшафтной дифференциации под влиянием орографических барьеров. Синтез этих теоретических конструкций обеспечил комплексное понимание предгорных ландшафтов как специфических геосистем, возникающих на контакте гор и равнин [Karrouzoglou et al., 2020].

Для достижения поставленных задач был применен комплекс взаимодополняющих методов, адаптированных к специфике объекта исследования. Ведущую роль играл сравнительно-географический метод, который позволил провести сопоставительный анализ генезиса, структуры и динамики предгорных ландшафтов в различных физико-географических условиях (от аридных предгорий Тянь-Шаня до гумидных предгорий Анд и антропогенно-трансформированных ландшафтов японской Сатоямы). Этот метод дал возможность выявить инвариантные, системообразующие черты предгорных экотонов, а также их уникальные, регионально-обусловленные характеристики [Ortiz-Colin, Hulshof, 2024].

Историко-генетический анализ был направлен на реконструкцию эволюции научных представлений о предгорьях, прослеживание трансформации подходов от дихотомических моделей к триадной парадигме. Это позволило не только систематизировать накопленный теоретический багаж, но и понять логику развития научной мысли, выявить преемственность идей и методологические разрывы в изучении проблемы.

Для объективной количественной оценки пространственной организации предгорных ландшафтов был задействован морфометрический анализ рельефа [Спирidonov, 1970; Симонов, 1998]. В его рамках проводилась цифровая обработка данных о гипсометрии (построение и анализ цифровых моделей рельефа), крутизне и экспозиции склонов (для оценки инсоляционной и циркуляционной асимметрии), а также густоте расчленения (как индикатора интенсивности новейших и современных рельефообразующих процессов). Этот комплекс параметров обеспечил формализованную основу для проведения границ и выделения морфологических типов предгорий.

Оценка временной динамики и устойчивости предгорных геосистем осуществлялась с помощью статистического анализа многолетних временных рядов климатических параметров. Анализировались не только среднееголетние значения температур и осадков, но и их вариативность, тренды, а также экстремальные показатели, что позволило количественно охарактеризовать высокую временную неоднородность климатических условий, являющуюся одним из ключевых атрибутов экотона.

Важнейшим инструментом интеграции разнородных данных и пространственного анализа выступили картографический метод, геоинформационные системы (ГИС) и технологии. На основе разновременных топографических, тематических и дистанционных материалов были созданы серии специализированных карт (морфометрических, ландшафтных, карт современных процессов), что позволило перейти от точечных характеристик к пространственным обобщениям, выявить закономерности территориальной дифференциации и осуществить пространственный синтез результатов исследования. Использование ГИС-пакетов обеспечило возможность многокритериального анализа и комплексного картографического моделирования структуры предгорных ландшафтов.

Таким образом, примененный методологический комплекс, сочетающий теоретические обобщения с инструментальными количественными методами и пространственным анализом, обеспечил решение поставленных исследовательских задач на современном научном уровне.

## Результаты исследования

### Эволюция научных представлений: от дихотомии к триадной парадигме

Исторический анализ развития научных взглядов на проблему классификации предгорных ландшафтов демонстрирует последовательную смену методологических парадигм, отражающую общую эволюцию географического мышления от описательного к системному. На начальных этапах становления ландшафтоведения как науки сформировались два альтернативных подхода, условно обозначаемых как дихотомическая модель. Данная модель, укорененная в традиционном геоморфологическом детерминизме, рассматривала предгорные территории исключительно как подчиненный периферийный элемент одной из двух соседних макрогеосистем — либо гор, либо равнин.

Сторонники отнесения предгорий к горным ландшафтам (А.Г. Исаченко, Н.А. Гвоздецкий и др.) выстраивали свою аргументацию на принципах орографического и тектонического единства [Исаченко, 1991]. Они подчеркивали, что предгорья представляют собой непосредственное морфологическое продолжение горных систем, составляя с ними единый структурный каркас, и демонстрируют зачатки высотной дифференциации ландшафтов, что рассматривалось как неотъемлемый атрибут горных территорий. В рамках этого подхода предгорья часто выделялись в качестве нижнего структурного яруса горных стран.

Альтернативная позиция, наиболее последовательно разработанная Ф.Н. Мильковым (ранние работы), обосновывала принадлежность предгорий к равнинным ландшафтам через призму концепции «предвосхождения» [Мильков, 1986]. Согласно этой концепции, ландшафтообразующее влияние горных сооружений начинает проявляться значительно раньше их фактического орографического выражения, вызывая модификацию зональных условий на прилегающих равнинных террито-

риях. Таким образом, предгорные ландшафты интерпретировались не как нижний высотный пояс гор, а как зональные равнинные ландшафты, трансформированные барьерным эффектом соседних горных систем.

Ограниченность дихотомического подхода, не способного адекватно объяснить системную целостность, функциональное своеобразие и пространственно-временную динамику предгорных территорий, стимулировала становление принципиально новой триадной парадигмы («горы–предгорья–равнины»). Теоретический фундамент этой парадигмы составил синтез трех ключевых учений отечественного ландшафтоведения: учения В.Б. Сочавы о геосистемах [Сочава, 1978], разработавшего методологию исследования природных территориальных комплексов как целостных образований; концепции Ф.Н. Милькова о парадинамических комплексах [Мильков, 1986], раскрывающей механизмы латерального взаимодействия между смежными геосистемами; и теории Ф.А. Максютотова о барьерных ландшафтах [Максютов, 1981], описывающей процессы ландшафтной дифференциации под влиянием орографических барьеров.

Согласно триадной парадигме, предгорья представляют собой не периферию соседних систем, а самостоятельный класс геосистем, возникающий на контакте гор и равнин в результате интенсивного парадинамического взаимодействия. Их уникальность обусловлена не просто сочетанием горных и равнинных черт, а наличием эмерджентных свойств, порождаемых специфической системой вещественно-энергетических потоков, характерных исключительно для этой переходной зоны. Именно этот концептуальный переход от «статусной» дискуссии к анализу системных связей и процессов знаменует собой качественно новый этап в изучении предгорных ландшафтов.

### **Предгорные ландшафты как географические экотоны: системная модель и диагностические критерии**

Современный этап развития ландшафтоведения характеризуется синтезом теоретических представлений, в рамках которого предгорные ландшафты интерпретируются как географические экотоны – протяженные переходные зоны между контрастными геосистемами, обладающие специфической структурой и функциональными особенностями. В отличие от упрощенного понимания экотона как линейной границы, современная концепция рассматривает его как трехмерное пространственное образование, характеризующееся повышенной динамичностью, выраженной градиентностью свойств и интенсивным вещественно-энергетическим обменом [Коломыц, 1987; Hansen, di Castri, 1992; Forman, 1995]. В иностранной научной литературе подчеркивается, что экотонам свойственны повышенное биоразнообразие (“edge effect”), усиленная биологическая продуктивность и особая чувствительность к глобальным изменениям природной среды, что делает их важнейшими индикаторами трансформационных процессов в географической оболочке [Walker et al., 2003].

Для визуализации системной организации и функциональной роли предгорных ландшафтов в структуре парадинамического взаимодействия была разработана обобщенная модель (рис. 1), раскрывающая их место в горно-равнинном комплексе. Ландшафтные экотоны играют одновременно буферную, мембранную и транзитную роль; препятствуют движению одних латеральных потоков, другие задерживают, третьи – свободно пропускают.



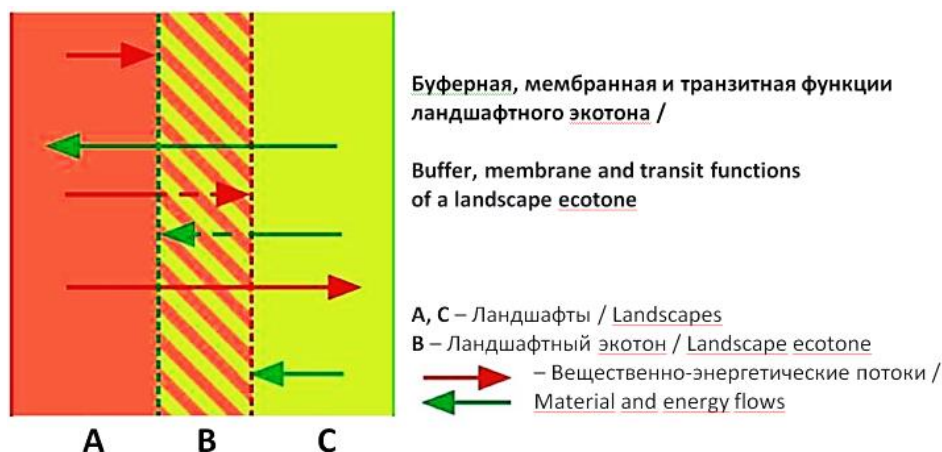


Рис. 1. Место и функции предгорного ландшафта-экотона в системе горно-равнинного парадинамического комплекса /

Fig. 1. The place and functions of the foothill landscape-ecotone in the system of the mountain-plain paradyamic complex

Данная модель наглядно демонстрирует, что предгорный экотон представляет собой не пассивную переходную полосу, а активную динамическую систему, выполняющую ключевую барьерно-трансформационную функцию в горно-равнинном парадинамическом комплексе. Именно здесь происходит интенсивное взаимодействие и взаимопроникновение разнонаправленных потоков вещества и энергии, что приводит к формированию специфических природных комплексов, не имеющих аналогов в смежных геосистемах.

Универсальные диагностические признаки предгорных экотонов, выявленные на основе сравнительно-географического анализа, включают:

- морфометрические (градиентное изменение гипсометрических показателей с формированием характерных предгорных ступеней и террас, отличающихся по своей морфологии от смежных территорий);
- геоморфологические (комбинация денудационных и аккумулятивных форм рельефа с преобладанием пролювиальных, делювиальных и аллювиальных процессов, создающих специфические геоморфологические структуры);
- климатические (ярко выраженный барьерный эффект, проявляющийся в региональных особенностях распределения осадков, формировании локальных циркуляционных систем и повышенной изменчивости климатических параметров как в пространстве, так и во времени);
- биотические (формирование переходных растительных сообществ и экосистем с повышенным уровнем биоразнообразия, высокая мозаичность почвенно-растительного покрова, наличие видов-экотонофилов);
- функциональные (интенсификация латеральных потоков вещества и энергии, высокая скорость биологического круговорота, повышенная динамичность и чувствительность к внешним воздействиям).

Эта концептуальная основа, объединяющая системный подход с конкретными диагностическими критериями, является универсальной методологической платформой для исследования предгорных ландшафтов различных регионов мира, что находит свое конкретное наполнение и проявление в разнообразных физико-географических условиях, как будет показано в последующих разделах работы.

### Региональные особенности предгорных ландшафтов мира: сравнительный анализ

Проведенный сравнительно-географический анализ выявил значительное разнообразие региональных проявлений предгорных ландшафтов, обусловленное спецификой природных условий и историей антропогенного освоения. Несмотря на универсальность экотонной природы предгорий, каждый крупный горный регион демонстрирует уникальные черты организации и функционирования этих переходных зон (табл. 1).

*Таблица 1 / Table 1*

#### Сравнительная характеристика региональных типов предгорных ландшафтов / Comparative characteristics of foothill landscapes regional types

| Регион, тип /<br>Region, Type              | Ключевые процессы /<br>Key Processes                                                                                                    | Морфологические особенности /<br>Morphological Features                                                                                       | Природопользование /<br>Environmental Management                                                          | Экологические проблемы /<br>Environmental Issues                                                      |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тянь-Шань (адыры) /<br>Tien Shan (Aduyu)   | Делювиально-пролювиальные, аридное выветривание, эоловые процессы /<br>Deluvial-proluvial processes, Arid weathering, Aeolian processes | Лёссовые плато, густая овражная сеть, пролювиальные шлейфы /<br>Loess plateaus, Dense ravine network, Proluvial aprons                        | Пастбищное животноводство, богарное земледелие /<br>Pastoral livestock farming, Rainfed agriculture       | Деградация пастбищ, эрозия почв, засухи /<br>Pasture degradation, Soil erosion, Droughts              |
| Япония (Сатояма) /<br>Japan (Satoyama)     | Традиционное землепользование, поддержание биоразнообразия /<br>Traditional land use, Biodiversity maintenance                          | Антропогенная мозаика: вторичные леса, рисовые чеки, пруды /<br>Anthropogenic mosaic: secondary forests, rice paddies, ponds                  | Комплексное сельское и лесное хозяйство, рекреация /<br>Integrated agriculture and forestry, Recreation   | Забрасывание земель, утрата традиционных практик /<br>Land abandonment, Loss of traditional practices |
| Альпы (Форальпен) /<br>The Alps (Voralpen) | Гляциально-нивальные, барьерный эффект, рекреационная нагрузка /<br>Glacial-nival processes, Orographic effect, Recreational pressure   | Четкая высотная поясность, троговые долины, ледниковые формы /<br>Distinct altitudinal zonation, U-shaped (trough) valleys, Glacial landforms | Рекреация, туризм, животноводство, лесное хозяйство /<br>Recreation, Tourism, Livestock farming, Forestry | Фрагментация ландшафтов, эрозия склонов /<br>Landscape fragmentation, slope erosion                   |
| Анды (Юнгас) /<br>Andes (Yungas)           | Интенсивный сток, химическое выветривание, оползневые процессы /<br>Intensive surface runoff, Chemical weathering, Landslide processes  | Крутые склоны, глубокие долины, террасированные участки /<br>Steep slopes, Deep valleys, Terraced areas                                       | Террасное земледелие, плантационное хозяйство /<br>Terrace farming, Plantation agriculture                | Обезлесение, эрозия почв, оползни /<br>Deforestation, Soil erosion, Landslides                        |

|                                                  |                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                |                                                                                                                                |                                                                                           |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Гималаи<br>(Сивалик) /<br>Himalayas<br>(Siwalik) | Интенсивная<br>денудация,<br>оползневые<br>процессы,<br>тектоническая<br>активность /<br>Intensive<br>denudation,<br>Landslide<br>processes,<br>Tectonic activity | Конусы выноса,<br>оползневые<br>тела, глубоко<br>расчлененный<br>рельеф /<br>Alluvial fans,<br>Landslide bodies,<br>Deeply dissected<br>relief | Очаговое земледелие,<br>животноводство,<br>лесоупользование /<br>Focal agriculture,<br>Livestock farming,<br>Forest management | Оползни, сели,<br>деградация<br>лесов /<br>Landslides,<br>Mudflows, Forest<br>degradation |
| Северный<br>Кавказ /<br>North<br>Caucasus        | Барьерно-<br>дождевой<br>эффект, эрозия,<br>оползневые<br>процессы /<br>Orographic<br>rainfall effect,<br>Erosion, Landslide<br>processes                         | Мозаичность<br>морфологических<br>элементов, террасы,<br>шлейфы /<br>Mosaic of<br>morphological<br>elements, Terraces,<br>Aprons               | Плотное заселение,<br>многоотраслевое<br>сельское хозяйство /<br>Dense settlement,<br>Multi-branch<br>agriculture              | Оползни, эрозия,<br>перенаселен-<br>ность /<br>Landslides,<br>Erosion,<br>Overpopulation  |

**Северный Кавказ и Тянь-Шань: аридные предгорные экотоны.** Для предгорий Северного Кавказа (рис. 2) и Тянь-Шаня характерно развитие аридных и семиаридных ландшафтов, выраженных в виде сложной системы низкогорных гряд и разделяющих их депрессий. Особый научный интерес представляют морфогенетические типы адыров и прилавок. Адыры представляют собой холмисто-увалистые предгорья, сложенные лёссовидными суглинками, интенсивно расчлененные густой овражно-балочной сетью [Гвоздецкий, 1963]. Их формирование связано с аккумуляцией пролювиально-делювиальных отложений в условиях аридного климата. Прилавки образуют более высокие ступени предгорий с выположенными водораздельными поверхностями, представляющими собой фрагменты древних поверхностей выравнивания.



Рис. 2. Предгорный ландшафт Северного Кавказа. Карачаево-Черкесия /  
Fig. 2. Foothill landscape of the North Caucasus. Karachay-Cherkessia



Ключевым ландшафтообразующим процессом в регионе является интенсивная делювиально-пролювиальная деятельность, обусловленная контрастностью рельефа и ливневым характером осадков. Морфометрический анализ предгорных ландшафтов Северо-Восточного Кавказа выявил их четкое структурное положение в интервале высот 100–1000(1200) м с преобладанием склонов крутизной 0–15° (более 70 % территории), что подтверждает их переходный экотонный характер [Атаев, 2018]. Особенностью региона является высокая пространственная мозаичность почвенно-растительного покрова, обусловленная экспозиционной дифференциацией микроклиматических условий [Забураева и др., 2025].

**Японская Сатояма: антропогенно-естественный экотон.** В отличие от естественно-детерминированных моделей, Сатояма (里山) представляет собой уникальный культурный ландшафт, сформированный столетиями устойчивого традиционного природопользования между горными лесами («Ояма») и равнинными полями («Саточи») [Takeuchi et al., 2008]. Этот тип предгорий характеризуется сложной мозаикой вторичных лесов, рисовых полей, ирригационных прудов и пастбищ, поддерживающей исключительно высокий уровень биоразнообразия за счет умеренного антропогенного воздействия (рис. 3).



*Рис. 3. Японская Сатояма / Fig. 3. Japanese Satoyama*

Особенностью Сатоямы является ее способность поддерживать экологическое равновесие через традиционные практики землепользования, включая циклическое использование лесных ресурсов, поддержание традиционных агроэкосистем и сохранение водно-болотных угодий. Данный тип предгорий демонстрирует возможность формирования устойчивых социально-экологических систем в условиях длительного антропогенного пресса.

**Европейские предгорья: Альпы и Карпаты.** Предгорья Альп («Форальпен») и Карпат характеризуются как климатические и рекреационные экотоны. Здесь ярко выражен орографический барьерный эффект, проявляющийся в резком контрасте увлажнения на наветренных и подветренных склонах [Huggett, 2017]. Историче-



ски эти территории были освоены под интенсивное сельское хозяйство, преимущественно альпийское животноводство.

В современных условиях европейские предгорья испытывают значительную рекреационную нагрузку, связанную с развитием горного туризма и спорта [Batzing, 2015]. Это обуславливает специфические ландшафтные трансформации, включая фрагментацию природных территорий, изменение структуры землепользования и развитие инфраструктуры. Особенностью региона является высокая степень природоохранного регулирования и внедрение современных технологий устойчивого туризма.

**Южноамериканские Анды: влажно-тропический пьедмонт.** Восточные предгорья Анд («Юнгас») представляют собой классический пример влажного тропического экотона – зону перехода от высокогорий («Пуна») к амазонской сельве [Troll, 1968]. Это область интенсивного стока, латерального переноса вещества и одного из самых высоких уровней биологического разнообразия на планете.

Ландшафтообразующими процессами здесь являются интенсивное химическое выветривание, оползневая деятельность и латеральная миграция химических элементов. Особенностью региона является выраженная высотная поясность и высокая скорость биологического круговорота. Антропогенное воздействие проявляется преимущественно в форме террасного земледелия и плантационного хозяйства, исторически сложившихся как адаптация к сложным орографическим условиям.

**Гималаи: тектонически активный экотон.** Предгорья Гималаев (холмы Сивалик) представляют собой тектонически активный экотон, характеризующийся интенсивными процессами денудации и аккумуляции [Gansser, 1964]. Здесь формируются гигантские конусы выноса, оползневые тела и пролювиальные шлейфы, что обусловлено высокой сейсмической активностью и муссонным климатом.

Ландшафты отличаются исключительной динамичностью и постоянной перестройкой морфологической структуры. Особенностью региона является очаговый характер природопользования, обусловленный сложностью рельефа и высокой природной опасностью. Традиционное террасное земледелие контрастирует с современными проблемами, связанными с ростом населения и изменением климата.

Проведенный анализ демонстрирует, что, несмотря на региональные различия, все рассмотренные типы предгорных ландшафтов обладают общими экотонными свойствами, проявляющимися в повышенной динамичности, градиентности природных условий и интенсивности вещественно-энергетического обмена. В то же время каждый регион характеризуется уникальным сочетанием природных естественных и антропогенных факторов, определяющих специфику их современного состояния и направленность развития.

### **Пространственно-временная экотонность предгорных ландшафтов Северо-Восточного Кавказа**

Предгорные ландшафты Северо-Восточного Кавказа представляют собой классический пример сложноорганизованной экотонной системы, где уникальные свойства проявляются как в пространственной структуре, так и во временной динамике. Их положение на стыке контрастных геосистем Большого Кавказа

[Черкашин и др., 2024] и Прикаспийской низменности обуславливает исключительную сложность организации и высокую чувствительность к внешним воздействиям [Атаев, 2018].

**Пространственная организация: мозаичность и градиентность.** Пространственная структура предгорных ландшафтов региона, занимающих площадь 5809 км<sup>2</sup> в интервале высот 100–1000(1200) м, характеризуется выраженной мозаичностью и градиентностью свойств – фундаментальными признаками экотона.

**Гипсометрический градиент и вертикальная дифференциация.** Морфометрический анализ подтверждает, что предгорный ярус демонстрирует максимальное разнообразие крутизны склонов – от пологих (0–6°), характерных для равнин, до склонов средней крутизны (6–15°), типичных для низкогорий. Однако абсолютная высота не является единственным детерминирующим фактором. Наблюдаются ситуации, когда на сходных гипсометрических уровнях формируются контрастные природные комплексы. Например, на высотах 500–600 м на склонах Салатау развиты лугово-степные ландшафты, в то время как на аналогичных высотах Андийского хребта господствуют широколиственные леса. Это обусловлено различиями в количестве выпадающих осадков при равном количестве поступающего тепла.

**Экспозиционная асимметрия.** Макроэкспозиция склонов выступает мощным фактором ландшафтной дифференциации. Для региона характерна ярко выраженная ландшафтная асимметрия северных и южных склонов. На северных экспозициях (хребет Нараттубе) исторически сформировались лесные ландшафты, тогда как на южных – лесостепные и степные, что связано с повышенной величиной испаряемости и инсоляции. Циркуляционная экспозиция усиливает эти контрасты: наветренные склоны (Андийский, Салатау) получают до 800 мм осадков в год, в то время как на подветренных их количество не превышает 400–500 мм, порождая резкие переходы от гумидных к семиаридным ландшафтам на расстоянии 10–15 км.

**Роль литогенной основы и расчлененности рельефа.** Степень и характер расчлененности рельефа напрямую влияют на разнообразие природно-территориальных комплексов (ПТК). Густота горизонтального расчленения в предгорьях достигает 1,5–2,0 км/км<sup>2</sup>, создавая исключительное разнообразие местоположений и условий увлажнения. Крупные поперечные долины (например, долины рек Сулак, Шура-озень) «разрывают» пространственную цельность ландшафтов, формируя интразональные комплексы пойм и террас. Литолого-петрографические особенности также вносят существенный вклад: на известняках и мергелях предгорного Дагестана формируются горно-степные ландшафты с маломощными щебнистыми почвами, а на глинистых сланцах – лугово-степные с более развитым почвенным покровом.

### **Временная динамика: изменчивость и устойчивость**

Временная экотонность предгорных ландшафтов проявляется в исключительно высокой изменчивости их функциональных состояний, особенно в условиях современных климатических изменений. Анализ многолетних данных метеостанции «Буйнакск» за период с 1960 по 2025 гг. выявил устойчивые тренды в трансформации временной структуры предгорных ландшафтов (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

## Динамика сезонных состояний предгорных ландшафтов Северо-Восточного Кавказа (1960–2025 гг.) /

## Dynamics of foothill landscapes seasonal conditions of the Northeastern Caucasus (1960–2025)

| Период исследования / Research Period | Нивальное состояние, % / Nival State, % | Вегетативное состояние, % / Vegetative State, % | Прочие состояния, % / Other States, % | Изменение нивального периода / Changing the Nival Period |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1961–1970                             | 25                                      | 41                                              | 34                                    | –                                                        |
| 1971–1980                             | 22                                      | 42                                              | 36                                    | ▼ 3%                                                     |
| 1981–1990                             | 19                                      | 42                                              | 39                                    | ▼ 3%                                                     |
| 1991–2000                             | 16                                      | 43                                              | 41                                    | ▼ 3%                                                     |
| 2001–2010                             | 13                                      | 45                                              | 42                                    | ▼ 3%                                                     |
| 2011–2020                             | 9                                       | 48                                              | 43                                    | ▼ 4%                                                     |
| 2021–2025*                            | 7                                       | 50                                              | 43                                    | ▼ 2%                                                     |

\*Примечание: период с 2021 по 2025 гг. (пентада) включает прогнозные оценки, основанные на экстраполяции выявленных трендов /

\*Note: the period from 2021 to 2025 (pentad) includes forecast looking estimates based on the extrapolation of identified trends

Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет выявить несколько ключевых тенденций. Наблюдается значительный рост среднегодовой температуры (на 1,0–1,5°C) и перераспределение сезонных осадков. Выявлена ускоряющаяся динамика сокращения зимнего сезона – доля нивальных состояний уменьшилась с 25 (1961–1970) до 7 % (2021–2025), что составляет общее сокращение на 18 %. Особенно заметное ускорение процесса наблюдается в последние десятилетия – сокращение на 4 % в период с 2011 по 2020 гг.

Параллельно происходит значительное расширение вегетативного периода – его доля увеличилась с 41 до 50 % за тот же временной интервал. Эта асимметрия в реакции сезонов подчеркивает сложность отклика экотонной системы на внешние воздействия.

**Устойчивость и буферная функция.** Несмотря на отмеченные климатические сдвиги, временная структура предгорных ландшафтов региона в целом сохраняет стабильность. Эта устойчивость обеспечивается присущей экотонам высокой мозаичностью и буферной емкостью, позволяющей системе поглощать определенный уровень внешних воздействий без кардинальной перестройки. Однако возрастает частота и интенсивность экстремальных событий (ливни, засухи), что приводит к активизации эрозионных и оползневых процессов на склонах южной экспозиции.

Таким образом, использование расширенного массива данных вплоть до 2025 года позволяет не только констатировать изменения, но и зафиксировать ускорение темпов перестройки сезонных ритмов в предгорных экотонах Северо-Восточного Кавказа. Сочетание пространственной мозаичности и усиливающейся временной изменчивости создает уникальные условия для формирования специфических природных комплексов, не имеющих аналогов в смежных геосистемах. Это подтверждает их высокую чувствительность к глобальным изменениям климата и подчерки-

вает необходимость учета усиливающейся временной экотонности при разработке стратегий адаптивного природопользования для всего горно-равнинного парадиномического комплекса.

### **Прикладное значение для устойчивого развития предгорных территорий**

Выделение предгорных ландшафтов в самостоятельный таксономический ранг имеет не только теоретическое, но и важнейшее практическое значение для разработки стратегий устойчивого развития горно-равнинных регионов. Экотонный характер предгорий, проявляющийся в высокой динамичности, уязвимости и одновременно – в высоком потенциале биоразнообразия, требует специальных адаптивных подходов к управлению. Региональная специфика предгорных ландшафтов обуславливает дифференциацию приоритетов и методов природопользования (табл. 3).

*Таблица 3 / Table 3*

#### **Стратегии устойчивого развития для различных типов предгорных ландшафтов / Sustainable development strategies for different types of foothill landscapes**

| Тип предгорий /<br>Type of Foothills                                                                                         | Ключевые угрозы<br>и риски /<br>Key Threats and Risks                                                                                                                                                                                                                                                                    | Приоритетные<br>мероприятия /<br>Priority Activities                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Ожидаемый эффект /<br>Expected Effect                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Аридные предгорья<br>(адыры Тянь-Шаня,<br>Восточный Кавказ) /<br>Arid foothills (Adyrs<br>of Tien Shan, Eastern<br>Caucasus) | – Интенсивная водная<br>эрозия / Intensive<br>water erosion;<br>– Деградация<br>пастбищ / Pasture<br>degradation;<br>– Опустынивание /<br>Desertification;<br>– Дефицит водных<br>ресурсов / Water<br>resource scarcity                                                                                                  | – Внедрение<br>почвозащитных<br>систем земледелия /<br>Implementation of soil-<br>protective farming systems;<br>– Нормирование<br>пастбищной нагрузки /<br>Regulation of pasture load;<br>– Создание системы<br>водосберегающих<br>мелиораций /<br>Establishment of a water-<br>saving reclamation system;<br>– Лесомелиорация<br>оврагов и балок / Forest<br>reclamation of ravines and<br>gullies                                                                  | – Снижение темпов<br>деградации почв на<br>40–60% / Reduction<br>in the rate of soil<br>degradation by 40–<br>60%;<br>– Повышение<br>продуктивности<br>пастбищ / Increased<br>pasture productivity;<br>– Стабилизация<br>местного стока /<br>Stabilization of local<br>runoff                        |
| Культурные<br>ландшафты<br>(Японская Сатояма) /<br>Cultural landscapes<br>(Japanese Satoyama)                                | – Утрата<br>традиционных<br>практик<br>землепользования /<br>Loss of traditional land<br>use practices;<br>– Зброшенность<br>сельхозугодий /<br>Agricultural land<br>abandonment;<br>– Снижение<br>агроборазнообразия<br>/ Reduction in<br>agrobiodiversity;<br>– Фрагментация<br>экосистем / Ecosystem<br>fragmentation | – Юридическая защита<br>статуса традиционных<br>ландшафтов / Legal<br>protection for the status of<br>traditional landscapes;<br>– Экономическое<br>стимулирование<br>традиционного<br>природопользования /<br>Economic incentives for<br>traditional environmental<br>management;<br>– Развитие<br>агротуризма /<br>Development of agritourism<br>and ecotourism;<br>– Создание генных банков<br>аборигенных видов /<br>Creation of gene banks for<br>native species | – Сохранение<br>уникального<br>биоразнообразия /<br>Preservation of unique<br>biodiversity;<br>– Поддержание<br>культурного<br>наследия /<br>Maintenance of<br>cultural heritage;<br>– Диверсификация<br>доходов местного<br>населения /<br>Diversification of<br>income for the local<br>population |



|                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рекреационные предгорья (Альпы, Карпаты) /<br>Recreational foothills (Alps, Carpathians)                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Деградация природных комплексов от рекреации / Degradation of natural ecosystems due to recreation;</li> <li>– Фрагментация ландшафтов / Landscape fragmentation;</li> <li>– Загрязнение территорий / Pollution of territories;</li> <li>– Изменение гидрологического режима / Alteration of the hydrological regime</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Нормирование рекреационной нагрузки / Regulation of recreational load;</li> <li>– Создание инфраструктуры для концентрации посетителей / Creation of infrastructure to concentrate visitors;</li> <li>– Восстановление нарушенных земель / Restoration of disturbed lands;</li> <li>– Внедрение технологий «зеленого» туризма / Implementation of «green» tourism technologies</li> </ul>                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Сохранение рекреационного потенциала / Preservation of recreational potential;</li> <li>– Минимизация антропогенного воздействия / Minimization of anthropogenic impact;</li> <li>– Обеспечение устойчивого развития местных сообществ / Ensuring sustainable development of local communities</li> </ul> |
| Влажно-тропические предгорья (Анды, Юго-Восточная Азия) /<br>Humid tropical foothills (Andes, Southeast Asia) | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Оползневая опасность / Landslide hazard;</li> <li>– Обезлесение склонов / Deforestation of slopes;</li> <li>– Ускоренная эрозия почв / Accelerated soil erosion;</li> <li>– Потеря биоразнообразия / Loss of biodiversity</li> </ul>                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Лесовосстановление на критических склонах / Reforestation on critical slopes;</li> <li>– Строительство противоселевых и оползнезащитных сооружений / Construction of anti-debris flow and landslide protection structures;</li> <li>– Внедрение агролесоводческих систем / Implementation of agroforestry systems;</li> <li>– Террасирование склонов / Slope terracing</li> </ul>                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Снижение рисков природных катастроф / Reduction of natural disaster risks;</li> <li>– Сохранение почвенного покрова / Preservation of soil cover;</li> <li>– Поддержание экологического баланса / Maintenance of ecological balance</li> </ul>                                                            |
| Высокодинамичные предгорья (Гималаи, молодые горы) /<br>Highly dynamic foothills (Himalayas, young mountains) | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Селевая опасность / Mudflow hazard;</li> <li>– Активная денудация / Active denudation;</li> <li>– Высокая сейсмичность / High seismicity;</li> <li>– Нестабильность склонов / Slope instability</li> </ul>                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Зонирование территории по степени риска / Zoning of the territory by risk level;</li> <li>– Создание систем мониторинга опасных процессов / Creation of monitoring systems for hazardous processes;</li> <li>– Ограничение хозяйственного освоения опасных зон / Restriction of economic development in hazardous zones;</li> <li>– Строительство инженерных защитных сооружений / Construction of engineering protection structures</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Повышение безопасности населения / Increased population safety;</li> <li>– Снижение ущерба от природных катастроф / Reduction of damage from natural disasters;</li> <li>– Рациональное использование ресурсов / Rational use of resources</li> </ul>                                                     |

Ключевые принципы управления предгорными территориями включают экотонный подход (признание уникальности предгорных ландшафтов как самостоятельных образований), адаптивное управление (гибкое регулирование природопользования с учетом динамики природных процессов), бассейновый принцип (интегрированное управление в границах водосборных бассейнов), ландшафтное планирование (оптимизация пространственной организации территории).

Реализация предложенных стратегий позволит не только сохранить уникальные экотонные системы предгорий, но и обеспечить устойчивое социально-экономиче-

ское развитие горно-равнинных регионов в условиях глобальных изменений. Особое значение имеет разработка нормативно-правовой базы, регламентирующей выделение предгорных ландшафтов как объектов особого управления, что особенно актуально для Северного Кавказа и других горных регионов России.

### Выводы

Проведенное исследование эволюции теоретических представлений о предгорных ландшафтах и их региональных особенностей позволяет отметить значительный прогресс в понимании природы этих уникальных географических объектов. Выводы сводятся к следующему.

1. Сравнительный анализ, охвативший разнообразные горные системы мира от Кавказа до Анд и от Японских островов до Альп, убедительно демонстрирует универсальность триадной парадигмы, рассматривающей предгорья как самостоятельный класс геосистем. Этот концептуальный подход, синтезирующий учение о геосистемах, теорию парадинамических комплексов и концепцию барьерных ландшафтов, представляет собой значительный шаг вперед по сравнению с традиционными дихотомическими моделями, открывая новые возможности для системного анализа горно-равнинных территорий.

2. Важнейшим результатом исследования стало выявление и обоснование экотонной природы предгорных ландшафтов, проявляющейся в специфической пространственно-временной организации этих территорий. Комплексный анализ, сочетающий морфометрические методы, изучение климатической изменчивости и оценку динамики природных процессов, позволил выявить диагностические критерии выделения предгорных экотонов, включая градиентность свойств, повышенную динамичность и интенсивность вещественно-энергетического обмена. На примере Северо-Восточного Кавказа показано, что именно сочетание пространственной мозаичности и временной изменчивости создает уникальные условия для формирования специфических природных комплексов, не имеющих аналогов в смежных геосистемах.

3. Особую значимость имеет разработанная в исследовании типология региональных проявлений предгорных ландшафтов, учитывающая как природные факторы (климатические условия, тектоническую активность, особенности рельефа), так и социально-экономические аспекты (история землепользования, современные антропогенные нагрузки). Выявление специфических черт аридных адыров Тянь-Шаня, культурных ландшафтов японской Сатоямы, рекреационных предгорий Альп и других региональных типов подчеркивает необходимость дифференцированного подхода к их изучению и управлению.

4. Теоретическая значимость работы заключается в развитии концептуальных основ ландшафтоведения и физической географии, в частности – в разработке методологии выделения и анализа переходных географических систем. Практическая ценность исследования определяется возможностью использования его результатов для решения актуальных задач устойчивого развития горно-равнинных территорий. Предложенные стратегии управления, учитывающие региональную специфику предгорных ландшафтов, могут быть применены при разработке схем территориального планирования, природоохранных мероприятий и адаптивных систем природопользования.

Перспективы дальнейших исследований видятся в углубленном изучении механизмов функционирования предгорных экотонов в условиях глобальных изменений климата и возрастающего антропогенного пресса, а также в разработке количественных моделей прогнозирования их динамики. Особого внимания заслуживает инте-

грация традиционных знаний о природопользовании, накопленных в таких системах как Сатояма, с современными научными подходами к управлению ландшафтами.

## Литература

1. Атаев З.В. Пространственно-временная экотонность предгорных ландшафтов Северо-Восточного Кавказа. // Материалы XIII Международной ландшафтной конференции: «Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов». Воронеж: Истоки, 2018. – С. 84–86.
2. Гвоздецкий Н.А. Кавказ. М.: Мысль, 1963. – 262 с.
3. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б., Шаипова А.А. Оптимизация рекреационного природопользования на Северо-Восточном Кавказе. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2025.24.29.001.
4. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. – 366 с.
5. Коломыц Э.Г. Ландшафтные исследования в переходных зонах: методологический аспект. М.: Наука, 1987. – 115 с.
6. Костенко Н.П. Геоморфология. М.: МГУ, 1999. – 379 с.
7. Максютлов Ф.А. Барьерные ландшафты СССР. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1981. – 140 с.
8. Мильков Ф.Н. Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1986. – 328 с.
9. Николаев В.А. Ландшафтные экотоны. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2003. – № 6. – С. 3–9.
10. Преображенский В.С., Александрова Т.Д., Куприянова Т.П. Основы ландшафтного анализа. М.: Наука, 1988. – 192 с.
11. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. Смоленск: СГУ, 1998. – 270 с.
12. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. – 319 с.
13. Спиридонов А.И. Основы общей методики полевых геоморфологических исследований. М.: Высшая школа, 1970. – 458 с.
14. Черкашин В.И., Заалишвили В.Б., Мамаев С.А. и др. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 100–112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009.
15. Шальнев В.А. Ландшафты Северного Кавказа. Ставрополь: СГУ, 2004. – 264 с.
16. Batzing W. The Alps: A story of Europe's largest wilderness area. London: Palgrave Macmillan, 2015. – 312 p.
17. Forman R.T.T. Land Mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. – 632 p.
18. Gansser A. Geology of the Himalayas. London: Interscience Publishers, 1964. – 289 p.
19. Hansen A.J., di Castri F. (eds.). Landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows. New York: Springer-Verlag, 1992. – 452 p.
20. Huggett R.J. Fundamentals of geomorphology. 4th ed. London: Routledge, 2017. – 578 p.
21. Karpouzoglou T., Dewulf A., Perez K. et al. From present to future development pathways in fragile mountain landscapes. // Environmental Science & Policy. – 2020. – Vol. 114. – pp. 606–613. DOI: 10.1016/j.envsci.2020.09.016.
22. Ortiz-Colin P., Hulshof C.M. Ecotones as windows into organismal-to-biome scale responses across neotropical forests. // Plants. – 2024. – Vol. 13. No. 17. – p. 2396. DOI: 10.3390/plants13172396.
23. Takeuchi K., Brown R.D., Washitani I. et al. Satoyama: the traditional rural landscape of Japan. Tokyo: Springer, 2008. – 229 p.
24. Troll C. Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical Americas. Bonn: Dummler, 1968. – 321 p.
25. Walker S., Wilson J.B., Steel J.B. et al. Properties of ecotones: Evidence from five ecotones

objectively determined from a coastal vegetation gradient. // *Journal of Vegetation Science*. – 2003. – Vol. 14. No. 4. – pp. 579–590.

## References

1. Ataev Z.V. Spatial and temporal ecotonicity of foothill landscapes of the Northeastern Caucasus. Modern landscape and ecological condition and problems of optimizing the natural environment of the regions. Voronezh. Istoki. 2018. pp. 84–86. (In Russ.)
2. Gvozdetzky N.A. Kavkaz. Moscow. Mysl. 1963. 262 p. (In Russ.)
3. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B., Shaipova A.A. Optimization of recreational nature management in the North-Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2025.24.29.001. (In Russ.)
4. Isachenko A.G. Landscape science and physico-geographical zoning. Moscow. Vysshaya Shkola. 1991. 366 p. (In Russ.)
5. Kolomyts E.G. Landscape research in transition zones: a methodological aspect. Moscow. Nauka. 1987. 115 p. (In Russ.)
6. Kostenko N.P. Geomorphology. Moscow. MSU. 1999. 379 p. (In Russ.)
7. Maksyutov F.A. Barrier landscapes of the USSR. Saratov. Publishing House of Saratov University. 1981. 140 p. (In Russ.)
8. Milkov F.N. Physical geography: the study of landscape and geographical zonality. Voronezh. Publishing House of Voronezh University. 1986. 328 p. (In Russ.)
9. Nikolaev V.A. Landscape ecotones. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2003. No. 6. pp. 3–9. (In Russ.)
10. Preobrazhensky V.S., Alexandrova T.D., Kupriyanova T.P. Fundamentals of landscape analysis. Moscow. Nauka. 1988. 192 p. (In Russ.)
11. Simonov Yu.G. Morphometric analysis of relief. Smolensk. SSU. 1998. 270 p. (In Russ.)
12. Sochava V.B. Introduction to the doctrine of geosystems. Novosibirsk. Nauka. 1978. 319 p. (In Russ.)
13. Spiridonov A.I. Fundamentals of the general methodology of field geomorphological research. Moscow. Vysshaya Shkola. 1970. 458 p. (In Russ.)
14. Cherkashin V.I., Zaalishvili V.B., Mamaev S.A. et al. Geoecological state of the upper reaches of the Avarskoye Koisu river basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 100–112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009. (In Russ.)
15. Shalnev V.A. Landscapes of the North Caucasus. Stavropol. SSU. 2004. 264 p. (In Russ.)
16. Batzing W. The Alps: a story of Europe's largest wilderness area. London. Palgrave Macmillan. 2015. 312 p.
17. Forman R.T.T. Land Mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge. Cambridge University Press. 1995. 632 p.
18. Gansser A. Geology of the Himalayas. London. Interscience Publishers. 1964. 289 p.
19. Hansen A.J., di Castri F. (eds.). Landscape boundaries: consequences for biotic diversity and ecological flows. New York. Springer-Verlag. 1992. 452 p.
20. Huggett R.J. Fundamentals of geomorphology. 4th ed. London. Routledge. 2017. 578 p.
21. Karpouzoglou T., Dewulf A., Perez K. et al. From present to future development pathways in fragile mountain landscapes. *Environmental Science & Policy*. 2020. Vol. 114. p. 606–613. DOI: 10.1016/j.envsci.2020.09.016.
22. Ortiz-Colin P., Hulshof C.M. Ecotones as windows into organismal-to-biome scale responses across neotropical forests. *Plants*. 2024. Vol. 13. No. 17. p. 2396. DOI: 10.3390/plants13172396.
23. Takeuchi K., Brown R.D., Washitani I. et al. Satoyama: The traditional rural landscape of Japan. Tokyo. Springer. 2008. 229 p.
24. Troll C. Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical Americas. Bonn. Dummler. 1968. 321 p.
25. Walker S., Wilson J.B., Steel J.B. et al. Properties of ecotones: Evidence from five ecotones objectively determined from a coastal vegetation gradient. *Journal of Vegetation Science*. 2003. Vol. 14. No. 4. pp. 579–590.



УДК 502/504: 528.94

DOI: 10.46698/v6676-0090-5271-g

Оригинальная статья

## Террасирование склонов Макажойской котловины: оценка влияния рельефа методами лазерного сканирования

Р.Х. Бекмурзаева<sup>1</sup>, Л.Р. Бекмурзаева<sup>2</sup>, В.В. Братков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Россия, 364024, г. Грозный, ул. Шерипова, 32, e-mail: raya.bek@mail.ru;

<sup>2</sup> Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100;

<sup>3</sup> МИИГАиК, Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4

Статья поступила: 28.08.2025, доработана: 24.11.2025, принята к публикации: 27.11.2025

**Резюме: Актуальность работы.** В сентябре 2023 г. с помощью беспилотного летального аппарата проведено воздушное лазерное сканирование и аэрофотосъемка территории Макажойской котловины, где расположен карбоновый полигон Чеченского государственного университета им. А.А. Кадырова. В результате была составлена высокоточная цифровая модель рельефа (ЦМР) двух участков (площадь каждого около 170 га), расположенных на противоположных макросклонах котловины на сопоставимых абсолютных высотах (1700–2200 м). Последующая обработка ЦМР с применением ПО ArcGis позволила количественно охарактеризовать микрорельеф тестовых участков, а также выделить террасы в пределах естественных горных склонов. **Цель** – сравнительный анализ рельефа северного и южного макросклонов Макажойской котловины для оценки влияния морфометрических характеристик территории (высоты, крутизны, экспозиции) на террасирование склонов. **Материалы и методы.** Работа основана на материалах воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки, выполненных с БПЛА осенью 2023 г. Их последующая обработка позволила создать высокдетальную цифровую модель, анализ которой проводился в среде ГИС. Картографирование террас осуществлялось комбинированным методом, сочетающим ручную и полуавтоматическую векторизацию. **Результаты.** Сравнительный анализ позволил выявить количественные различия в рельефе макросклонов и соответственно потенциал освоения. Террасы на северном, более пологом и влажном макросклоне, занимают 46 % площади участка, тогда как на крутом и сухом южном лишь 26 %. **Выводы.** Полученные результаты создают научную основу для разработки практических мероприятий по рациональному природопользованию, включая нормирование пастбищных нагрузок и внедрение принципов регенеративного животноводства на территории карбонового полигона.

**Ключевые слова:** Макажойская котловина, карбоновый полигон, воздушное лазерное сканирование, беспилотные летательные аппараты, цифровая модель рельефа, террасы.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ЧГУ им. А.А. Кадырова FECS-2023-0008.

**Для цитирования:** Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В. Террасирование склонов Макажойской котловины: оценка влияния рельефа методами лазерного сканирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 169–183. DOI: 10.46698/v6676-0090-5271-g

DOI: 10.46698/v6676-0090-5271-g

Original paper

## Terracing of the Makazhoy basin slopes: assessing the impact of relief using laser scanning methods

R.Kh. Bekmurzaeva<sup>1</sup>, L.R. Bekmurzaeva<sup>2</sup>, V.V. Bratkov<sup>1,3</sup><sup>1</sup> Kadyrov Chechen State University, 32 Sheripova Str., Grozny 364024,  
Russian Federation, e-mail: raya.bek@mail.ru;<sup>2</sup> Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,  
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation;<sup>3</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, 4, Gorokhovskiy Lane, Moscow  
105064, Russian Federation

Received: 28.08.2025, revised: 24.11.2025, accepted: 27.11.2025

**Abstract: Relevance.** In September 2023, airborne laser scanning and aerial photography were carried out using an unmanned aerial vehicle on the territory of the Makazhoy basin, where the carbon landfill of the Kadyrov Chechen State University is located. As a result, a high-precision digital elevation model (DEM) was compiled for sites with an area of about 170 hectares located on opposite macro slopes of the basin at comparable absolute heights (1700–2200 m). Subsequent processing of the DEM using the ArcGIS software made it possible to quantify the microrelief of the test sites, as well as to identify terraces within the natural mountain slopes. **The aim** is a comparative analysis of the relief of the northern and southern macroslopes of the Makazhoy basin to assess the influence of morphometric characteristics of the territory (height, steepness, exposure) on the terracing of the slopes. **Materials and methods.** The work is based on aerial laser scanning and aerial photography performed by UAVs in the fall of 2023. Their subsequent processing made it possible to create a highly detailed digital model, which was analyzed in a GIS environment. The terraces were mapped using a combined method combining manual and semi-automatic vectorization. **Results.** The comparative analysis revealed quantitative differences in the relief of the macroslopes and, accordingly, their development potential. Terraces occupy 46 % of the northern macroslope, which is gentler and more humid, while on the steep and dry southern macroslope they cover only 26 %. **Conclusions.** The obtained results create a scientific basis for developing practical measures for rational nature management, including the regulation of pasture loads and the implementation of regenerative livestock farming principles within the carbon polygon.

**Keywords:** Makazhos basin, carbon landfill, airborne laser scanning, unmanned aerial vehicles, digital elevation model, terraces.

**Acknowledgments:** *The work was carried out within the framework of the state assignment of the Kadyrov Chechen State University FECS-2023-0008.*

**For citation:** Bekmurzaeva R.Kh., Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V. Terracing of the Makazhoy basin slopes: assessing the impact of relief using laser scanning methods. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 169–183. DOI: 10.46698/v6676-0090-5271-g

### Введение

Горные регионы мира переживают ренессанс хозяйственного освоения, знаменуя собой новый этап взаимодействия человека и природы. После периода относительного забвения во второй половине XX века, когда высокогорные территории столкнулись с депопуляцией и сокращением экономической активности, сегодня мы наблюдаем возвращение интереса к их ресурсному и агрокультурному потен-

циалу. Этот интерес закономерен: горные экосистемы, сохранившие минимальный уровень антропогенного загрязнения, продуцируют сельскохозяйственную продукцию исключительного качества, востребованную на современных рынках.

Особую актуальность этот процесс приобретает в контексте Северного Кавказа, где горные территории исторически формировали основу традиционной системы отгонного животноводства [Рябогина и др., 2022]. В течение столетий здесь сложилась уникальная модель сезонного использования высокогорных пастбищ: в теплое время года скот перегонялся на альпийские луга, а зимой возвращался на равнинные территории. Однако существовали и исключения – горные котловины, природные условия которых позволяли организовывать круглогодичное содержание животных.

Эти котловины, сформированные тектоническими процессами и обрамленные горными хребтами, представляют собой уникальные природные комплексы. Их замкнутый характер обусловил формирование особого микроклимата с повышенными температурами и пониженной влажностью, что в сочетании с высотной зональностью создало исключительное разнообразие почвенно-растительных сообществ [Borisov et al., 2021]. Именно эти благоприятные условия сделали горные котловины центрами древнего освоения территории [Абдулаева и др., 2023; Аличаев и др., 2022; Грачева, Идрисов, 2021; Идрисов, Гусейнова, 2022; Мусаева, 2015; Пинской и др., 2022; Шаев и др., 2024], наиболее ярко выраженными в крупных тектонических депрессиях типа Северо-Юрской впадины.

Фокусом нашего исследования стала Макажойская котловина – уникальный природно-территориальный комплекс, расположенный в юго-восточной части Чеченской Республики. Её орографические границы образуют выразительные горные хребты: Кашекрлам на севере, отроги Гаготытлюры на востоке, и сложная система водоразделов с высотами до 2500–2600 метров на юго-востоке. Площадь котловины в этих естественных рубежах составляет 144 км<sup>2</sup>, представляя собой замкнутую экосистему с выраженными микроклиматическими особенностями (рис. 1).

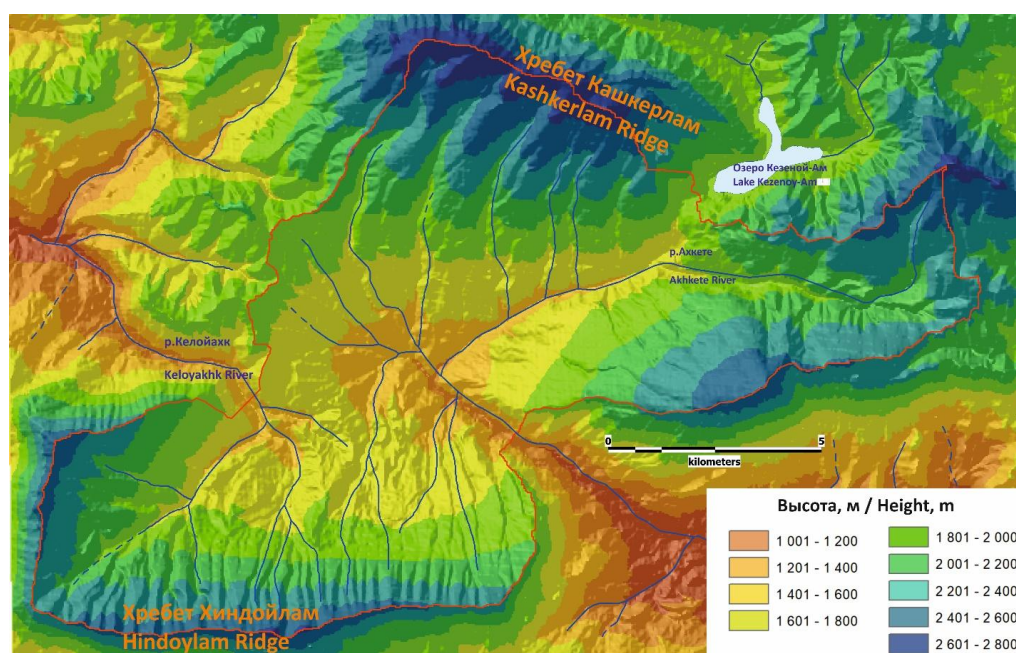


Рис. 1. Положение и особенности орографии Макажойской котловины /  
Fig. 1. Position and orographic features of the Makazhoy basin

Современная значимость Макажойской котловины подчеркивается размещением здесь карбонового полигона Чеченского государственного университета – инновационной площадки для разработки и апробации методов регенеративного животноводства. Это обуславливает необходимость детального изучения территории, выходящего за рамки стандартных подходов.

Ранее был проведен анализ рельефа котловины на основе цифровой модели рельефа среднего пространственного разрешения Европейского Космического Агентства FABDEM V1-0 с разрешением в этой части около 27 м [Бекмурзаева и др., 2024а, 2024б] по стандартным методикам [Горбунов и др., 2015; Грачева, Идрисов, 2021; Нетребин, 2012; Погорелов, Думит, 2009; Симонов, 1998; Симонов, 1999]. Установлено, что в котловине преобладают высоты 1600–2000 м, на долю которых приходится 43,0 % территории, наиболее часто встречаются уклоны 10–15° (23,8 %), 20–30° (23,5 %) и 5–10° (19,7 %). Что касается экспозиции, то на наиболее широко представлены южные (16,6 %) и северо-западные (16,2 %) склоны. Террасирование склонов – многовековой пример адаптации хозяйственной деятельности к горным условиям – сформировало уникальный микрорельеф, хорошо читаемый при полевых исследованиях, но не фиксируемый средствами глобального картографирования. Это определяет необходимость применения высокоточных методов дистанционного зондирования, способных выявить и документировать элементы исторического землепользования для их интеграции в современные модели устойчивого развития горных территорий.

Использование технологий воздушного лазерного сканирования открывает новые возможности для изучения тонкой организации рельефа горных котловин, позволяя не только фиксировать современное состояние территории, но и реконструировать историю её хозяйственного освоения [Ляпишев и др., 2015]. Такой подход особенно важен для разработки научно обоснованных моделей землепользования, сочетающих традиционные практики с современными требованиями экологической устойчивости [Петров, 2023].

В настоящее время для получения детальной информации о микрорельефе территории активно применяются беспилотные воздушные суда (БВС), которые позволяют оперативно получать информацию на локальном уровне [Wei et al., 2023; White et al., 2022]. Для этих целей используются аэрофотосъемка (АФС) и воздушное лазерное сканирование (ВЛС). Эти высокотехнологичные методы сбора геопространственных данных позволяют получать подробные цифровые модели рельефа и местности, а также ортофотопланы, которые в дальнейшем используются для геопространственного анализа картографируемых территорий.

### Методы исследования

Осенью 2023 г. в Макажойской котловине были проведены полевые исследования и аэрогеодезические работы, которые включали геодезические работы, аэрофотосъемку и воздушное лазерное сканирование [Бекмурзаева и др., 2024а; Скрыпичина и др., 2024].

Аэросъемочные работы были выполнены для двух тестовых участков в восточном секторе котловины в высотном диапазоне 1700–2200 метров над уровнем моря. Первый участок площадью 168,0 га расположен на северном макросклоне и совпадает с территорией карбонового полигона ЧГУ им. А.А. Кадырова, где проводятся эксперименты по регенеративному животноводству. Второй участок площадью



169,4 га находится на контрастном южном макросклоне котловины, что обеспечивает сравнительный анализ особенностей обоих склонов (рис. 2).

Для получения пространственных данных применялись методы аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования с использованием беспилотного воздушного судна Геоскан 401 Лидар. Съёмочные работы выполнялись сотрудниками и студентами Московского государственного университета геодезии и картографии и Чеченского государственного университета имени А.А. Кадырова. Фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки проводилась с применением программного обеспечения Agisoft Metashape. Обработка облаков точек, полученных методом воздушного лазерного сканирования, осуществлялась в специализированных программных комплексах «Terrascan» и «Кредо 3D СКАН».

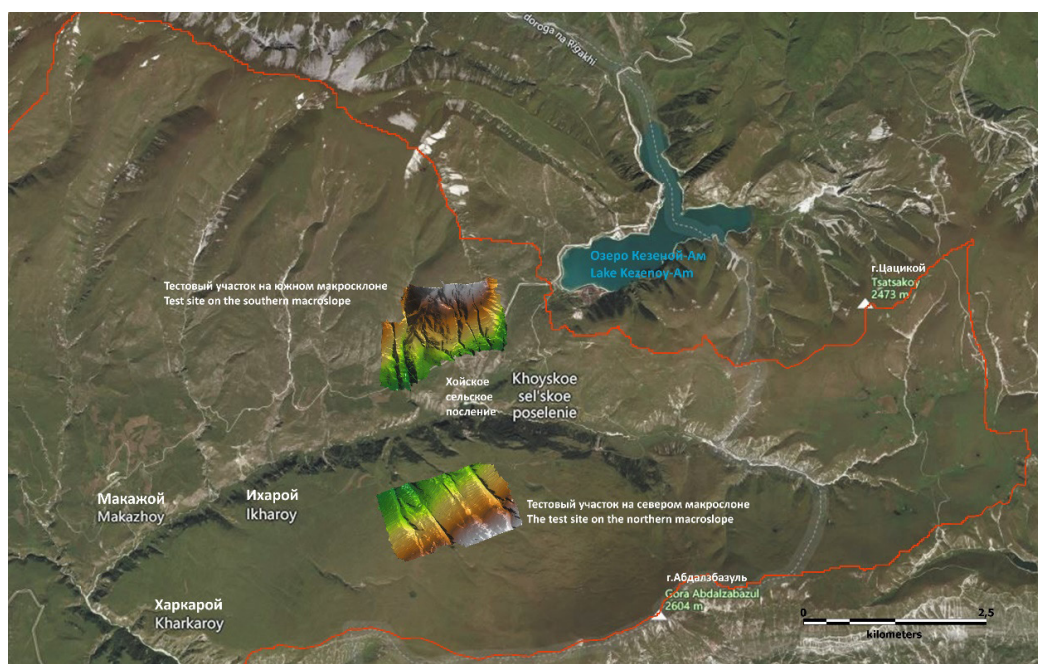


Рис. 2. Расположение тестовых полигонов в пределах Макажойской котловины /

Fig. 2. Location of test sites within the Makazhoy basin

В результате составлены высокоточные цифровые модели рельефа с разрешением 0,1 м, где стало возможным разделение точек на классы «земля» и «растительность» [Бекмурзаева и др., 2024а]. Для удаления информационного «шума», связанного с наличием разновысотной, преимущественно травянистой растительности, исходное разрешение было снижено до 0,5 м, что позволило более точно выявить особенности собственно микрорельефа.

Картографирование и анализ ЦМР осуществлялся с использованием ПО ArcGis. Карты на территорию участков создавались в стандартном масштабе (1:10 000). Для координатной сетки была выбрана индивидуальная проекция (PROJCRS [“ProjWiz\_Custom\_Lambert\_Azimuthal”, BASEGEOGCRS [“WGS 84”, DATUM [“World Geodetic System 1984”, ELLIPSOID [“WGS 84”,6378137,298.257223563, LENGTHUNIT[“metre”,1]], ID [“EPSG”,6326]]] [Бекмурзаева и др., 2024а].

Для картографирования террас применен комплексный подход, сочетающий ручной, полуавтоматический и автоматический методы. Критериями для дешифрирования террас служили: наличие выраженных бровок и подошв, характерные

выполненные площадки, регулярность и повторяемость форм, а также контекст расположения в пределах склона. Сравнительный анализ показал, что максимальная точность достигается при комбинировании полуавтоматического метода с предварительной ручной трассировкой контуров террас. При этом признается, что в условиях сложного горного рельефа возможны переходные и сложно интерпретируемые формы, а также вероятность включения в контуры некоторых природных выположенных участков.

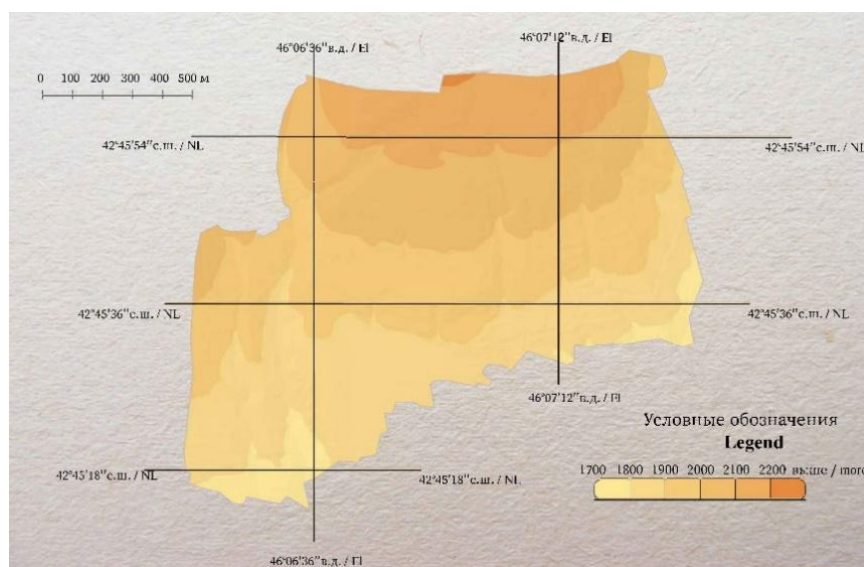
### Результаты исследования

В результате проведенных исследований составлено распределение территории тестовых полигонов по высотным отметкам, что иллюстрируют таблица 1 и рисунок 3.

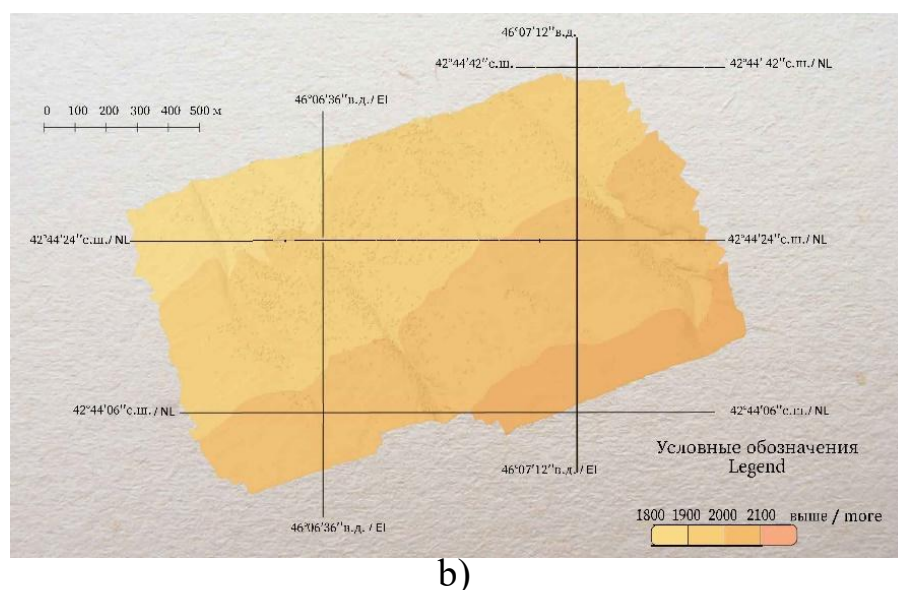
Таблица 1/ Table 1

**Распределение территории тестовых полигонов по высотным отметкам /  
Distribution of test site territory by elevation marks**

| Высота, метры/ Height,<br>meters | Южный макросклон/ Southern<br>macroslope |       | Северный макросклон/ Northern<br>macroslope |       |
|----------------------------------|------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|-------|
|                                  | га/ha                                    | %     | га/ha                                       | %     |
| 1700-1750                        | 0,7                                      | 0,4   |                                             |       |
| 1750-1800                        | 9,6                                      | 5,7   |                                             |       |
| 1800-1850                        | 22,1                                     | 13,1  | 0,4                                         | 0,2   |
| 1850-1900                        | 27,2                                     | 16,0  | 17,0                                        | 10,1  |
| 1900-1950                        | 22,8                                     | 13,5  | 35,3                                        | 21,0  |
| 1950-2000                        | 24,4                                     | 14,4  | 37,5                                        | 22,3  |
| 2000-2050                        | 20,7                                     | 12,2  | 36,9                                        | 22,0  |
| 2050-2100                        | 18,5                                     | 10,9  | 25,8                                        | 15,4  |
| 2100-2150                        | 14,3                                     | 8,4   | 14,7                                        | 8,8   |
| 2150-2200                        | 9,2                                      | 5,4   | 0,3                                         | 0,2   |
| Всего/ Total                     | 169,4                                    | 100,0 | 168,0                                       | 100,0 |



а)



b)

Рис. 3. Гипсометрическая карта южного (а) и северного (б) макросклонов  
Макажойской котловины /

Fig. 3. Hypsometric map of the southern (a) and northern (b) macroslopes of the Makazhoy basin

Как видно из представленных данных, отмечается хорошо выраженная асимметрия с точки зрения распределения участков по высотным отметкам. Так, на южном макросклоне, где спектр высот почти на 100 м больше, чем на северном, основные территории приурочены к высотам 1800–2000 м. Что касается северного макросклона, то здесь на высоты 1900–2050 м приходится более 65 % территории, и при этом наиболее возвышенные участки получили более широкое распространение по сравнению с теми, которые занимают наиболее низкие гипсометрические уровни. Также хорошо заметно, что северный макросклон гораздо более пологий, чем южный, что хорошо иллюстрирует распределение территории по крутизне склонов.

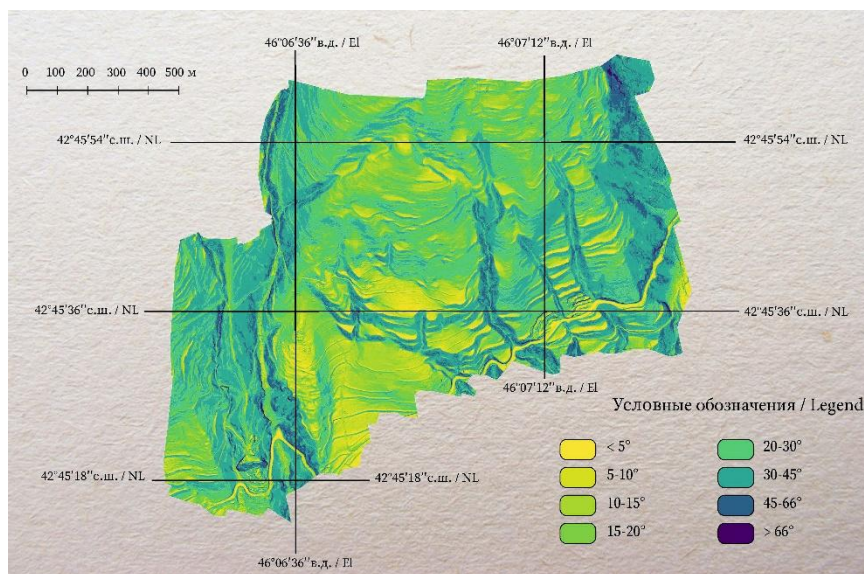
Изменение крутизны на склонах тестовых полигонов Макажойской котловины иллюстрируют таблица 2 и рисунок 4.

Таблица 2/ Table 2

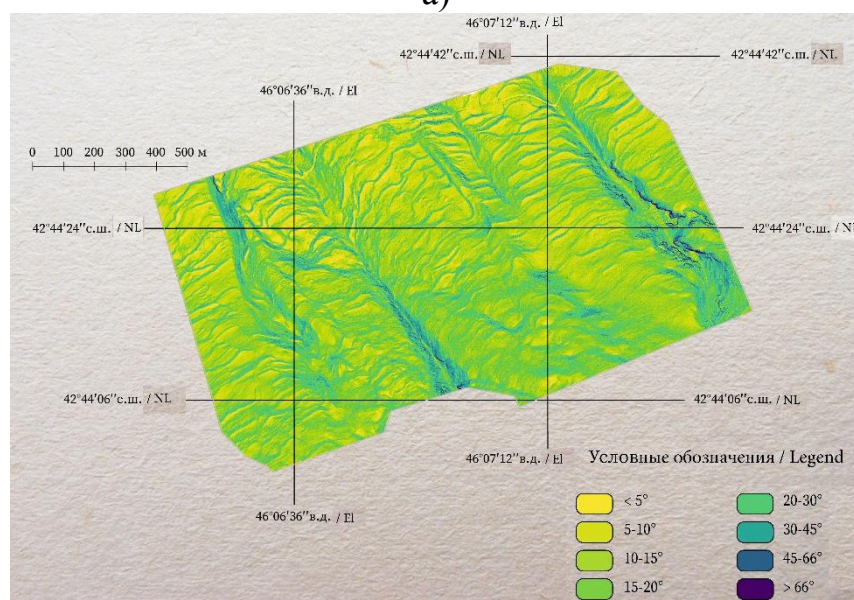
Распределение территории тестовых полигонов в зависимости от крутизны склонов  
/ Distribution of test site territory depending on slope steepness

| Уклон, градусы / Slope, degrees | Южный макросклон / Southern macroslope |       | Северный макросклон / Northern macroslope |       |
|---------------------------------|----------------------------------------|-------|-------------------------------------------|-------|
|                                 | км <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>       | %     | км <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>          | %     |
| 0-5                             | 4,2                                    | 2,5   | 8,0                                       | 4,7   |
| 5-10                            | 11,2                                   | 6,6   | 34,1                                      | 20,3  |
| 10-15                           | 17,0                                   | 10,0  | 49,0                                      | 29,2  |
| 15-20                           | 23,3                                   | 13,8  | 35,7                                      | 21,3  |
| 20-30                           | 46,5                                   | 27,4  | 31,5                                      | 18,8  |
| 30-45                           | 56,4                                   | 33,3  | 8,6                                       | 5,1   |
| 45-66                           | 10,3                                   | 6,1   | 0,9                                       | 0,5   |
| 66 и более/ and more            | 0,4                                    | 0,2   | 0,2                                       | 0,1   |
| Всего/ Total                    | 169,4                                  | 100,0 | 168,0                                     | 100,0 |





a)



b)

Рис. 4. Карта крутизны склонов южного и северного макросклонов Макажойской котловины:  
а) участок южного макросклона, б) участок северного макросклона /

Fig. 4. Map of the steepness of the slopes of the southern and northern macroslopes of the Makazhoy basin: a) southern macroslope section, b) section of the northern macroslope

Проведенный анализ выявил существенные различия в распределении крутизны склонов на противоположных макросклонах котловины, что отражает их различную геоморфологическую историю и современную динамику. Для обоих склонов характерно минимальное распространение крайних значений крутизны: наиболее пологих (менее  $5^\circ$ ) и наиболее крутых (более  $45^\circ$ ) участков.

На северном макросклоне установлено доминирование склонов средней крутизны. Максимальные площади занимают участки с углами наклона  $10-15^\circ$  (29,2 %), что свидетельствует о преобладании умеренно расчлененного рельефа. Значительное распространение имеют также склоны крутизной  $15-20^\circ$  (21,3 %) и  $5-10^\circ$  (20,3 %). Наблюдается четкая тенденция уменьшения площади склонов по мере увеличения



их крутизны, что характерно для территорий с относительно стабильными геоморфологическими процессами.

Напротив, южный макросклон характеризуется совершенно иным распределением крутизны. Здесь преобладают склоны значительной крутизны 30–45° (33,3 %), при этом отмечается положительная корреляция между величиной угла наклона и площадью распространения. Такое распределение указывает на активное протекание экзогенных процессов.

Установленные различия обусловлены аспектной дифференциацией инсоляционного режима. Интенсивная солнечная радиация на южном макросклоне активизирует процессы физического выветривания и денудации, что способствует формированию более крутых склонов. Здесь широко развиты эрозионные формы рельефа: овраги, промоины и абразионные врезы, которые характеризуются максимальными значениями крутизны. Кроме того, более активное протекание склоновых процессов способствует формированию осыпей и обвально-оползневых участков с большими углами наклона.

На северном макросклоне менее интенсивные инсоляционные процессы способствуют сохранению более пологих форм рельефа. Меньшая активность экзогенных процессов обеспечивает лучшую сохранность древних террасированных поверхностей, что имеет важное значение для организации регенеративного животноводства.

Выявленные особенности распределения крутизны склонов имеют фундаментальное значение для прогнозирования современных геоморфологических процессов и должны учитываться при планировании хозяйственного использования территории. Преобладание крутых склонов на южном макросклоне требует разработки специальных противоэрозионных мероприятий, в то время как северный макросклон более пригоден для организации пастбищного хозяйства.

Распределение склонов в зависимости от их экспозиции на тестовых полигонах Макажойской котловины иллюстрируют таблица 3 и рисунок 5.

Таблица 3 / Table 3

**Распределение территории тестовых полигонов в зависимости от экспозиции склонов / Distribution of test site areas depending on slope exposure**

| Экспозиция / Exposition | Южный макросклон/ Southern macroslope |       | Северный макросклон/ Northern macroslope |       |
|-------------------------|---------------------------------------|-------|------------------------------------------|-------|
|                         | га/ha                                 | %     | га/ha                                    | %     |
| Север                   | 0,4                                   | 0,2   | 37,1                                     | 22,1  |
| Северо-восток           | 2,6                                   | 1,5   | 10,2                                     | 6,1   |
| Восток                  | 24,1                                  | 14,2  | 2,2                                      | 1,3   |
| Юго-восток              | 44,8                                  | 26,4  | 1,7                                      | 1,0   |
| Юг                      | 60                                    | 35,4  | 2,2                                      | 1,3   |
| Юго-запад               | 25,3                                  | 14,9  | 5,7                                      | 3,4   |
| Запад                   | 11                                    | 6,5   | 24,7                                     | 14,7  |
| Северо-запад            | 1,2                                   | 0,7   | 84,2                                     | 50,1  |
| Всего/ Total            | 169,4                                 | 100,0 | 168,0                                    | 100,0 |

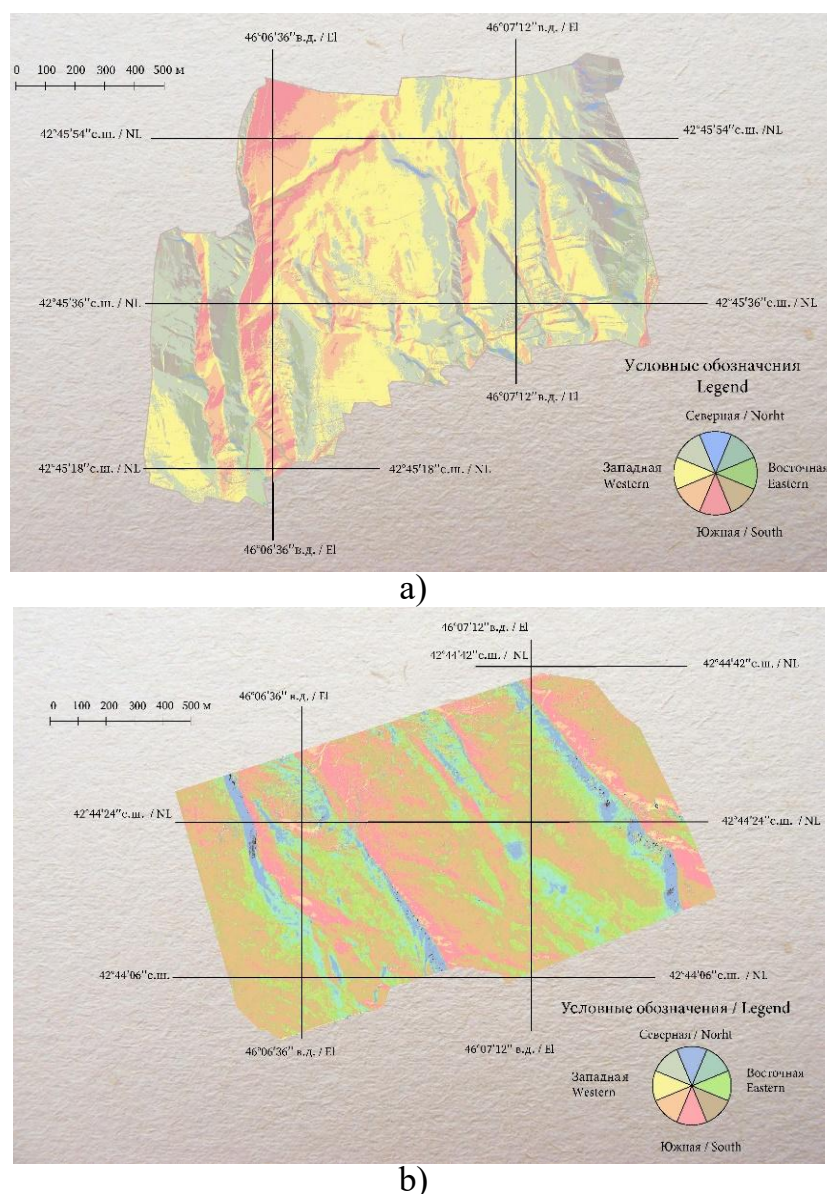


Рис. 5. Карта экспозиции склонов южного и северного макросклонов Макажойской котловины:  
 а) участок южного макросклона, б) участок северного макросклона /  
 Fig. 5. Map of the exposure of the slopes of the southern and northern macroslopes of the Makazhoy  
 basin: a) southern macroslope section, b) section of the northern macroslope

Анализ экспозиции склонов выявил контрастное распределение между тестовыми участками, аналогичное установленному для крутизны. На северном макросклоне, где расположен карбоновый полигон, абсолютно доминируют склоны северо-западной (50,1 %), северной (22,1 %) и западной (14,7 %) экспозиции, суммарно занимающие 86,9 % площади. В противоположность этому, на южном тестовом участке преобладают южная (35,4 %) и юго-восточная (26,4 %) экспозиции, составляющие в сумме более 60 % территории, при дополнительном вкладе юго-западных и восточных склонов (около 14 %). Таким образом, исследованные полигоны характеризуются противоположной ориентацией – северо-западной и юго-восточной соответственно.

На основе высокоточных цифровых моделей рельефа проведено картографирование исторических террасированных комплексов, созданных для интенсификации



сельскохозяйственного использования склонов. Террасы представляют собой антропогенно-модифицированные формы рельефа, где первоначальная крутизна склона была искусственно уменьшена путем сооружения подпорных стен, формирующих характерные выположенные участки, четко идентифицируемые по данным ЦМР.

Результаты выделения террас на основе ЦМР в пределах Макажойской котловины иллюстрирует рисунок 6.

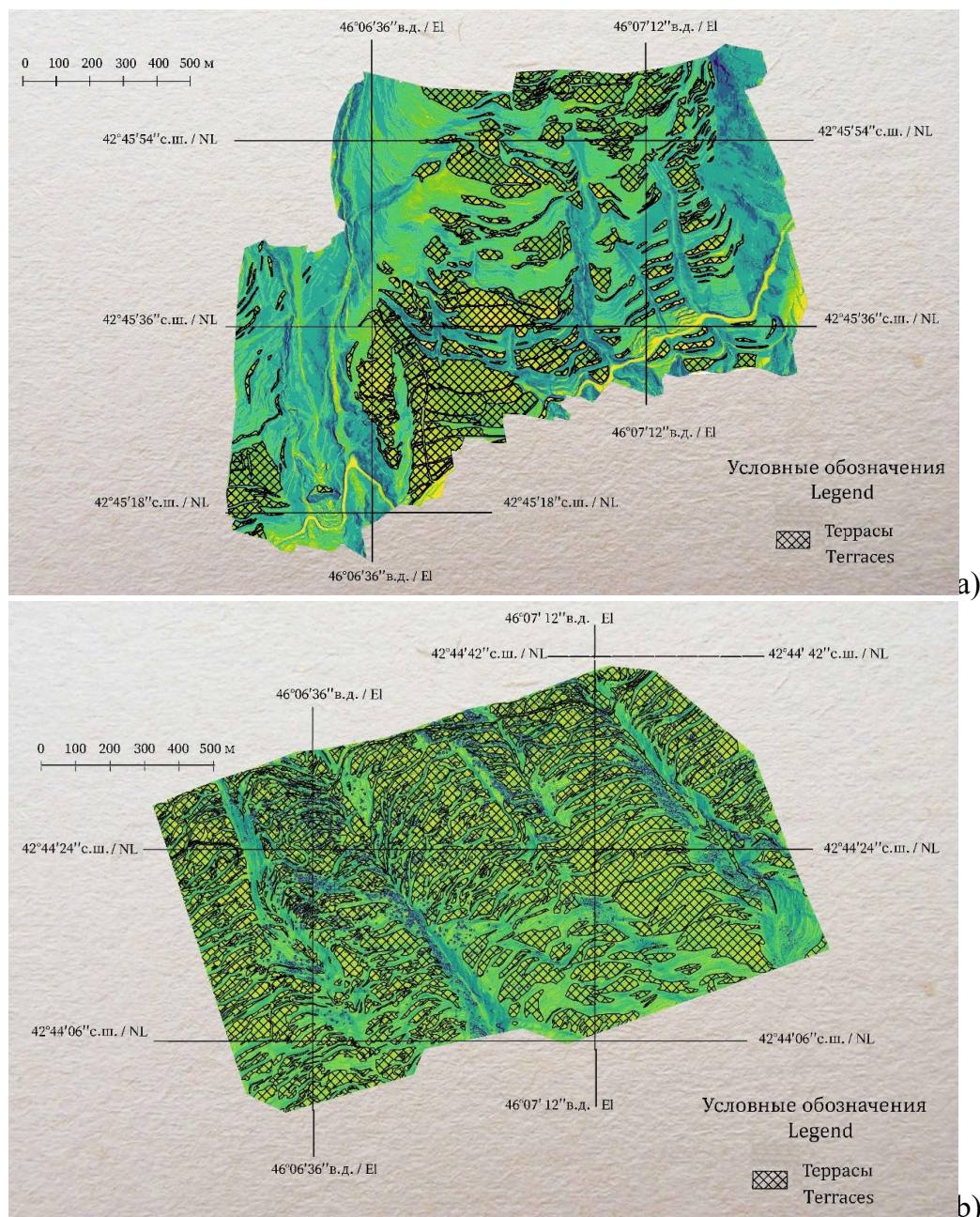


Рис. 6. Карта террас южного (а) и северного (б) макросклонов Макажойской котловины/  
Fig. 6. Map of the terraces of the southern (a) and northern (b) macroslopes of the Makazhoy basin

Количественная оценка площадей террасирования выявила существенные различия между макросклонами. На южном макросклоне общей площадью 169,4 га террасированные участки занимают 44,1 га, что составляет 26 % территории. Напротив, на северном макросклоне, где расположен полигон регенеративного жи-

вотноводства ЧГУ им. А.А. Кадырова (общая площадь 168,0 га), террасы занимают 76,6 га или 46 % площади.

Пространственный анализ распределения террас показал их приуроченность к участкам с минимальными значениями крутизны. На северном макросклоне преобладают крупные целостные террасные массивы, сформированные для оптимизации сельскохозяйственного использования. На южном макросклоне наблюдается мозаичное распределение террас с преобладанием небольших фрагментированных участков, особенно в восточной части полигона. Такая пространственная организация свидетельствует о адаптивном характере террасирования, учитывающем локальные особенности рельефа.

### Выводы

Проведенное исследование на основе высокодетальных ЦМР выявило существенные различия в морфометрии северного и южного макросклонов Макажойской котловины. Северный склон характеризуется как более пологий с доминированием участков крутизной 5–20°, в то время как для южного склона характерны большие углы наклона (преобладают участки крутизной 20–45°).

Установлено, что площадь террасированных участков на пологом северном макросклоне (46 %) почти в два раза превышает аналогичный показатель на крутом южном макросклоне (26 %). Это свидетельствует о том, что историческая практика террасирования была в значительной степени детерминирована морфометрическими параметрами склонов, прежде всего, их крутизной.

Пространственное распределение террасированных комплексов демонстрирует корреляцию с особенностями рельефа и, вероятно, с исторической антропогенной нагрузкой. Крупные террасные массивы на северном макросклоне могли способствовать его более интенсивному хозяйственному использованию, в то время как фрагментарность террас на южном макросклоне ограничивала такую возможность.

Полученные результаты подчеркивают высокую эффективность методов воздушного лазерного сканирования для изучения антропогенно-преобразованных горных ландшафтов и создают научную основу для планирования рационального природопользования с учетом исторического опыта и геоморфологических особенностей территории.

### Литература

1. Абдулаева Х.А., Калимова А.Р., Синицына К.А. Земледельческие террасы в нагорном Дагестане. // Сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам». Вологда: Вологодская ГМХА, 2023. – С. 3–6.
2. Аличаев М.М., Казиев М.Р.А., Султанова М.Г. Террасное земледелие Дагестана – история и перспективы развития. // Горное сельское хозяйство. – 2022. – № 6. – С. 25–28.
3. Бекмурзаева Р.Х., Баранов И.С., Скрыпицына Т.Н., Братков В.В., Булаева Н.М. Особенности микрорельефа карбонового полигона регенеративного животноводства ЧГУ им. А.А. Кадырова. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2024а. – № 3(61). – С. 6–13.
4. Бекмурзаева Р.Х., Скрыпицына Т.Н., Братков В.В., Булаева Н.М. Морфометрические характеристики рельефа Макажойской котловины (Чеченская Республика). // Мониторинг. Наука и технологии. – 2024б. – № 1(59). – С. 47–54.
5. Горбунов А.С., Бевз В.Н., Быковская О.П. Использование геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа для автоматизации ландшафтного картографирования. //



Материалы VII всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России». Воронеж: Научная книга, 2015. – С. 15–20.

6. Грачева Р.Г., Идрисов И.А. Сельскохозяйственные террасные комплексы горных регионов: культурно-историческое наследие и неотъемлемый элемент ландшафта. // Вопросы географии. – 2021. – № 153. – С. 68–89.

7. Идрисов И.А., Гусейнова А.Ш. Геологическая роль земледельческих террас Восточного Кавказа. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2022. – № 3(90). – С. 39–46.

8. Ляпишев К.М., Погорелов А.В., Липилин Д.А. К вопросу дешифрирования оползней по данным спутниковых снимков. // Сборник научных трудов «Географические исследования Краснодарского края». Вып. 9. / Под общ. ред. А.В. Погорелова. – Краснодар: КГУ, 2015. – С. 329–333.

9. Мусаева А.Г. Развитие террасного земледелия в горах Дагестана в XIX–XX вв. // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2015. – № 3-1. – С. 183–185.

10. Нетребин П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.25 / Нетребин Петр Борисович. – Краснодар: КГУ, 2012. – 24 с.

11. 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.

12. Пинской В.Н., Идрисов И.А., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Потапова А.В., Борисов А.В. Влияние экспозиции склона на химические и биологические свойства почв земледельческих террас Восточного Кавказа. // Аридные экосистемы. – 2022. – Т. 28. № 2(91). – С. 113–121.

13. Погорелов А.В., Думит Ж.А. Рельеф бассейна р. Кубани: Морфологический анализ. М.: ГЕОС, 2009. – 208 с.

14. Рябогина Н.Е., Идрисов И.А., Афонин А.С., Сергеев А.Ю., Борисов А.В. Первые данные о составе и возрасте карбонизированных макроостатков из древних земледельческих террас Северного Кавказа. // Сборник статей VI Всероссийской научной конференции «Динамика экосистем в голоцене». СПб.: РГПУ, 2022. – С. 461–465.

15. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. М.:–Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного ун-та, 1998. – 272 с.

16. Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. – 251 с.

17. Скрыпицына Т.Н., Воротилов А.Г., Кочнева Д.А., Смирнов Е.А. Некоторые итоги комплексной экспедиции МИИГАиК в Чеченскую Республику. // ГЕОПРОФИ. – 2024. – № 2. – С. 10–17.

18. Шаев И.А., Пинской В.Н., Ельцов М.В., Борисов А.В. Земледельческие террасы в среднегорной зоне Большого Кавказа. // Региональные геосистемы. – 2024. – Т. 48. № 4. – С. 503–514.

19. Borisov A.V., Kashirskaya N.N., Eltsov M.V., Pinskoy V.N., Plekhanova L.N., Idrisov I.A. Soils of ancient agricultural terraces of the Eastern Caucasus. // Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54. No. 5. – pp. 665–679.

20. Wei Z., Wang M., Pham V.T. et al. Unmanned aerial vehicle and geospatial analysis in smart irrigation and crop monitoring on IoT platform. // Mobile Information Systems. – 2023. – Vol. 2023. – Art. No. 4213645. DOI: 10.1155/2023/42136454.

21. White C.T., Reckling W., Petrasova A. et al. Rapid-DEM: rapid topographic updates through satellite change detection and UAS data fusion. // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. No. 7. – Art. No. 1718. DOI: 10.3390/rs14071718.

## References

1. Abdulaeva H.A., Kalimova A.R., Sinitsyna K.A. Agricultural terraces in mountainous Dagestan. In: Proc. of the VIII All-Russian sc. conf. with international participation “Young

researchers in agriculture and forestry – to the regions.” Vologda. Vologda SDFA. 2023. pp. 3–6. (In Russ.)

2. Alichayev M.M., Kaziev M.R.A., Sultanova M.G. Terraced agriculture of Dagestan – history and prospects of development. *Mountain Agriculture*. 2022. No. 6. pp. 25–28. (In Russ.)

3. Bekmurzaeva R.Kh., Baranov I.S., Skrypitsyna T.N., Bratkov V.V., Bulaeva N.M. Features of the microrelief of the carbon landfill for regenerative animal husbandry of the Kadyrov Chechen State University. *Monitoring. Science and Technology*. 2024a. No. 3(61). pp. 6–13. (In Russ.)

4. Bekmurzaeva R.Kh., Skrypitsyna T.N., Bratkov V.V., Bulaeva N.M. Morphometric characteristics of the relief of the Makazhoy depression (Chechen Republic). *Monitoring. Science and Technology*. 2024b. No. 1(59). pp. 47–54. (In Russ.)

5. Gorbunov A.S., Bevz V.N., Bykovskaya O.P. Use of geomorphometric analysis of digital terrain models for automated landscape mapping. In: *Proc. of the VII All-Russian sc. conf. “Geoinformation Cartography in the Regions of Russia.” Voronezh. Scientific Book*. 2015. pp. 15–20. (In Russ.)

6. Gracheva R.G., Idrisov I.A. Agricultural terraces of mountain regions: cultural and historical heritage and an integral element of the landscape. *Problems of Geography*. 2021. No. 153. pp. 68–89. (In Russ.)

7. Idrisov I.A., Huseynova A.Sh. Geological role of agricultural terraces of the Eastern Caucasus. *Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS*. 2022. No. 3(90). pp. 39–46. (In Russ.)

8. Lyapishev K.M., Pogorelov A.V., Lipilin D.A. On the issue of interpreting landslides based on satellite imagery. In: *Proc. Geographical studies of the Krasnodar Territory. Issue 9. Ed. A.V. Pogorelov. Krasnodar. KSU*, 2015. pp. 329–333. (In Russ.)

9. Musaeva A.G. The development of terrace farming in the mountains of Dagestan in the 19th and 20th centuries. *Humanities, Socio-Economic and Social Sciences*. 2015. No. 3-1. pp. 183–185.

10. Netrebin P.B. Morphometric analysis of the relief of the Greater Caucasus. The abstract of the dissertation of. Cand. geogr. sciences. 25.00.25. Krasnodar. KSU. 2012. 24 p. (In Russ.)

11. 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.)

12. Pinskoy V.N., Kashirskaya N.N., Eltsov M.V., Potapova A.V., Borisov A.V., Idrisov I.A. Slope exposure and its effect on chemical and biological soil properties on agricultural terraces of the Eastern Caucasus. *Arid Ecosystems*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 217–224. (In Russ.)

13. Pogorelov A.V., Dumit J.A. Relief of the Kuban River Basin: morphological analysis. Moscow. GEOS. 2009. 208 p. (In Russ.)

14. Ryabogina N.E., Idrisov I.A., Afonin A.S., Sergeev A.Yu., Borisov A.V. First data on the composition and age of carbonized macroremains from ancient agricultural terraces in the Northern Caucasus. In: *Proc. of VI All-Russian sc. conf. Ecosystem Dynamics in the Holocene. Saint Petersburg. RSPU*. 2022. pp. 461–465. (In Russ.)

15. Simonov Yu.G. Morphometric analysis of relief. Moscow–Smolensk. Smolensk Humanitarian University Press. 1998. 272 p. (In Russ.)

16. Simonov Yu.G. Explanatory morphometry of relief. Moscow. GEOS. 1999. 251 p. (In Russ.)

17. Skrypitsyna T.N., Vorotilov A.G., Kochneva D.A., Smirnov E.A. Some results of the comprehensive expedition of MIIGAiK to the Chechen Republic. *GEOPROFI*. 2024. No. 2. pp. 10–17. (In Russ.)

18. Shaev I.A., Pinskoy V.N., Eltsov M.V., Borisov A.V. Agricultural terraces in the mid-mountain zone of the Greater Caucasus. *Regional Geosystems*. 2024. Vol. 48. No. 4. pp. 503–514. (In Russ.)

19. Borisov A.V., Kashirskaya N.N., Eltsov M.V., Pinskoy V.N., Plekhanova L.N., Idrisov I.A. Soils of ancient agricultural terraces of the Eastern Caucasus. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 5. pp. 665–679.

20. Wei Z., Wang M., Pham V.T. et al. Unmanned aerial vehicle and geospatial analysis in smart irrigation and crop monitoring on IoT platform. *Mobile Information Systems*. 2023. Vol. 2023. Art. No. 4213645. DOI: 10.1155/2023/42136454.

21. White C.T., Reckling W., Petrasova A. et al. Rapid-DEM: rapid topographic updates through satellite change detection and UAS data fusion. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 7. Art. No. 1718. DOI: 10.3390/rs14071718.

УДК 911.2

DOI: 10.46698/y5264-2026-3522-r

Оригинальная статья

## Оценка изменения селитебной нагрузки на ландшафты Чеченской Республики по материалам дистанционного зондирования Земли

Л.Р. Бекмурзаева<sup>ORCID</sup>, В.В. Братков<sup>ORCID</sup>, И.А. Керимов<sup>ORCID</sup>

Грозненский государственный нефтяной технический университет  
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный,  
пр. Х.А. Исаева, 100, e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Статья поступила: 06.10.2025, доработана: 01.12.2025, принята к публикации: 05.12.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Анализ селитебной освоенности является первоочередной задачей при оценке антропогенной нагрузки на территорию. Чеченская Республика в последнее десятилетие переживает строительный бум. Нагрузка на ландшафты возрастает. В этой связи, очень важным является оценить степень современной селитебной освоенности ландшафтов. **Цель** – выявление площадных изменений селитебной нагрузки ландшафтов Чеченской Республики по данным дистанционного зондирования Земли. **Материалы и методы.** Для сравнения были использованы топографические карты, отражающие состояние местности на конец 1980-х годов, и данные дистанционного зондирования Земли (Sentinel-2) за 2024 год. Обработка материалов проводилась с помощью программ ArcGis и MapInfo. **Результаты.** За 1985–2024 гг. площадь населенных пунктов возросла в целом по республике с 465,3 до 929,8 км<sup>2</sup> или в 2 раза. Максимальное увеличение селитебной нагрузки в настоящее время отмечается для степных ландшафтов с 255,1 до 633,8 км<sup>2</sup> или почти в 2,5 раза. Рост селитебной нагрузки на горные ландшафты в сравнении с равнинными – невелик. Максимальный прирост селитебных территорий приходится на среднегорно-лесные ландшафты, где площадь населенных пунктов увеличилась с 61,4 до 77,8 км<sup>2</sup> или на 26 %. Кроме того, получена карта селитебной нагрузки на природные ландшафты Чеченской Республики на позднесоветский и современный периоды. В целом, причины увеличения селитебных территорий в горных ландшафтах связаны с общим увеличением населения, улучшением бытовых условий проживания (газификация, улучшение транспортной доступности и другое), а также с желанием коренного населения восстановления исторических родовых земель. **Выводы.** В настоящее время отмечается увеличение селитебных территорий Чеченской Республики по сравнению с советским периодом, особенно сильно этот процесс затронул степные ландшафты, как наиболее удобные для заселения и хозяйственного освоения.

**Ключевые слова:** природные ландшафты, селитебные ландшафты, населенный пункт, данные дистанционного зондирования Земли, Чеченская Республика.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0001 «Оценка влияния современных климатических изменений на природные и природно-антропогенные комплексы (на примере Чеченской Республики)».

**Для цитирования:** Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В., Керимов И.А. Оценка изменения селитебной нагрузки на ландшафты Чеченской Республики по материалам дистанционного зондирования Земли. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 184–196. DOI: 10.46698/y5264-2026-3522-r



DOI: 10.46698/y5264-2026-3522-r

Original paper

## Assessment of changes in the residential load on the landscapes of the Chechen Republic based on the remote sensing data

L.R. Bekmurzaeva<sup>ORCID</sup>, V.V. Bratkov<sup>ORCID</sup>, I.A. Kerimov<sup>ORCID</sup>

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,  
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,  
e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Received: 06.10.2025, revised: 01.12.2025, accepted: 05.12.2025

**Abstract: Relevance.** The analysis of residential development is a primary task in assessing the anthropogenic load on the territory. The Chechen Republic has been experiencing a construction boom in the last decade. The load on landscapes is increasing. In this regard, it is very important to assess the degree of modern residential development of landscapes. **Aim** identification of areal changes in the residential load of the landscapes of the Chechen Republic based on remote sensing data. **Materials and methods.** For comparison, topographic maps reflecting the state of the area at the end of the 1980s and data from remote sensing of the Earth (Sentinel-2) for 2024 were used. The materials were processed using the ArcGIS and MapInfo programs. **Results.** In 1985–2024, the total area of settlements in the republic as a whole increased from 465.3 to 929.8 km<sup>2</sup>, doubling in size. The maximum increase in residential load is currently observed for steppe landscapes from 255.1 to 633.8 km<sup>2</sup>, or nearly a 2.5-fold increase. The increase in residential load on mountainous landscapes in comparison with lowlands is small. The maximum increase in residential areas is in the mid-mountain forest landscapes, where the area of settlements has increased from 61.4 to 77.8 km<sup>2</sup>, or by 26 %. In addition, a map of the residential load on the natural landscapes of the Chechen Republic for the late Soviet and modern periods has been obtained. In general, the reasons for the increase in residential areas in mountainous landscapes are related to the general increase in population, improved living conditions (gasification, improved transport accessibility, etc.), as well as the desire of the indigenous population to restore historical ancestral lands. **Conclusions.** Currently, there is an increase in the residential territories of the Chechen Republic compared to the Soviet period. This process has particularly affected the steppe landscapes, as they are the most convenient for settlement and economic development.

**Keywords:** natural landscapes, residential landscapes, settlement, Earth remote sensing data, Chechen Republic.

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the state task of the State Scientific Technical University named after Academician M.D. Millionshchikova FZNU-2024-0001 “Assessment of the impact of modern climate change on natural and natural-anthropogenic complexes (using the example of the Chechen Republic)”.

**For citation:** Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V., Kerimov I.A. Assessment of changes in the residential load on the landscapes of the Chechen Republic based on the remote sensing data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 184–196. DOI: 10.46698/y5264-2026-3522-r

### Введение

С точки зрения природных условий, прежде всего климатических, территория Северного Кавказа является одной из наиболее благоприятных для заселения и ведения хозяйства в пределах Российской Федерации. Разнообразие рельефа обусловило наличие здесь горных и равнинных ландшафтов, при этом последние осваи-

вались довольно давно и преимущественно экстенсивно. В результате в этой части, в Предкавказье, антропогенная нагрузка связана преимущественно с сельскохозяйственным освоением. Однако благоприятные условия привели к формированию сети поселений, которые также являются фактором антропогенного воздействия. Селитебная освоенность является, таким образом, одним из видов антропогенной нагрузки на территорию и природные ландшафты в ее пределах. Селитебная нагрузка (иногда синонимичные или близкие термины – «демографическая», «поселенческая» и др.) определяется как вид воздействия на экологическое состояние ландшафтов, обусловленное размещением населённых пунктов и количеством проживающих в них людей [Сенная, Молодян, 2013]. Природные условия играют ключевую роль в заселении территории, особенно первичном. В этой связи, для оценки селитебной освоенности территории, наиболее удобным является ландшафтный подход [Заурбеков и др., 2010].

Изменение пространственной структуры системы расселения и связанной с ней селитебной нагрузкой связано с изменением численности населения страны или региона, входящего в ее состав. В настоящее время Северный Кавказ характеризуется положительным приростом населения, который сопровождается изменением, в том числе и площадей населенных пунктов. В этой связи, территория Чеченской Республики является интересным полигоном для оценки изменения площади населенных пунктов. Дополнительным фактором, делающим ее привлекательной для исследований такого рода, является большое разнообразие условий на сравнительно небольшой территории.

Что касается населения Чеченской Республики, то начиная с 2001 года, оно неуклонно растет с каждым годом (рис. 1). Также увеличивается доля городского населения. Если в 2002 году доля городского населения составляла 33,8 %, то в 2024 году она составила 40,1 % [Чеченская Республика в цифрах ..., 2024].

В этой связи целью работы является выявление площадных изменений селитебной нагрузки ландшафтов Чеченской Республики по данным дистанционного зондирования Земли.

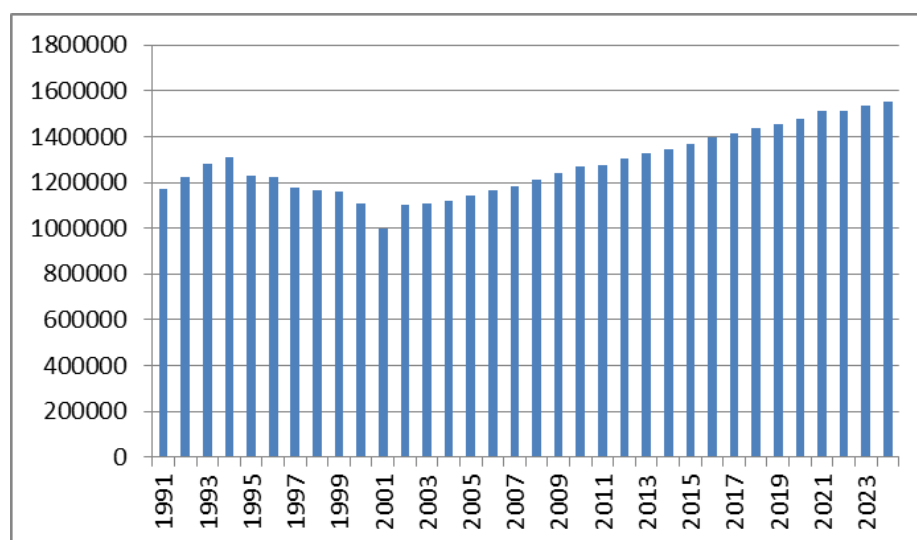


Рис. 1. Численность населения Чеченской Республики по годам /  
Fig. 1. Population of the Chechen Republic by year

## Методы исследования

В теоретическом отношении работа опирается на взгляды Ф.Н. Милькова [Мильков, 1973], который по содержанию человеческой деятельности выделял следующие классы антропогенных ландшафтов: сельскохозяйственные (возделанные поля, культурные луга); промышленные; селитебные (населённые пункты); лесные (вторичный лес, искусственные посадки леса); линейно-дорожные; рекреационные; бelligеративные. Исходя из данной классификации, селитебные ландшафты являются антропогенно-модифицированными комплексами, к которым относятся городские и сельские населенные пункты. Они возникают в пределах природных ландшафтов, которые в той или иной степени благоприятны для формирования расселения. С учетом того, что населенные пункты довольно легко картографировать с последующим определением площади, можно сопоставлять площади данной категории антропогенных ландшафтов с природной обстановкой, на фоне которой они развиваются. В результате, сопоставление площадей природных и данной категории антропогенных ландшафтов, можно оценивать как изменение величины антропогенной нагрузки на природные ландшафты, так и их селитебную освоенность [Атаев, 2011].

Для оценки изменения селитебной освоенности ландшафтов Чеченской Республики использовались среднемасштабные топографические карты, отражающие состояние местности на конец 1980-х годов, а также актуальные (2024 г.) данные дистанционного зондирования Земли среднего и высокого пространственного разрешения, имеющиеся в открытом доступе (снимки Landsat и Sentinel-2). Их обработка проводилась такими программными средствами как MapInfo и ArcGis.

При подсчете территорий, занятых населенными пунктами, мы опирались, прежде всего, на такое понятие как селитебные ландшафты, т.е. ландшафты поселений (сельских и городских) [Мильков, 1973]. В подсчетах не учитывались территории, занятые поселками дачного типа, т.к. их площадь незначительна.

В качестве основы для оценки изменения селитебной нагрузки была использована ландшафтная карта Чеченской Республики, составленная коллективом авторов [Братков и др., 2009] с некоторыми современными уточнениями. Оценка селитебной нагрузки по состоянию на позднесоветский период была дана в работе Р.А. Идрисовой [Идрисова, 2009], которая определяла площадь населённых пунктов на основе среднемасштабной топографической карты, отражающей состояние местности на середину 1980-х годов. Эти данные были скорректированы в связи с изменением границы между Чеченской Республикой и Республикой Ингушетия в 2021 г.

Для определения современных границ населенных пунктов использовались данные дистанционного зондирования Земли. Имеется целый ряд работ, посвященных дешифрированию застроенных территорий на основе данных дистанционного зондирования Земли [Беленко, 2017; Верещака и др., 1990; Канищев, Кунавин, 2021; Керимов и др., 2024; Кресникова, Васильевых, 2018; Панарин, Панарин, 2009; Скрипчинский и др., 2022; Chetty, Surawar, 2021; Nistor et al., 2021; Yu, Fang, 2023; O'Neill et al., 2025; Wang et al., 2021; Chen et al., 2023; Ma et al., 2019; Bai, Xu, 2023]. В них основное внимание уделено определению площадей довольно крупных населенных пунктов, имеющих чаще всего статус города, и выделению функциональных зон внутри них. На территории ЧР к городам, которые имеют этот статус достаточно давно, относятся Грозный, Гудермес и Аргун. Кроме указанных городов на

территории Чеченской Республики имелись населенные пункты, которые по количеству населения были сопоставимы с городами, однако не имели такого статуса – Шали и Урус-Мартан.

В рамках достижения поставленной цели – выявления изменений селитебной нагрузки на ландшафты, вполне достаточным по точности является метод визуального дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли [Верещака и др., 1990]. Контуры населенных пунктов на топографической карте масштаба 1:200 000 достаточно легко сопоставляются со снимком в оптическом диапазоне и являются основой для выделения контуров населенных пунктов на момент съемки. При этом на снимке в оптическом диапазоне довольно четко выделяется квартальная застройка и дорожная сеть, которые позволяют определять границы городской застройки (рис. 2).



Рис. 2. Контуры населенных пунктов ЧР по состоянию на конец 1980-х годов (а – топографическая карта масштаба 1:200 000) и 2024 г. (б – космический снимок Sentinel-2) /  
Fig. 2. Outlines of settlements of the Chechen Republic as of the end of the 1980s (a – 1:200,000 scale topographic map) and 2024 (b – Sentinel-2 satellite image)

Как показал анализ изменений площадей населенных пунктов, максимальный прирост территории среди городов характерен для Аргуна, площадь которого в 1985 г. составляла 6,4 км<sup>2</sup>, тогда как в 2024 г. она увеличилась на 246 % и составила 22,1 км<sup>2</sup>. Что касается Грозного, то его территория увеличилась с 83,8 до 115,9 км<sup>2</sup>, или на 38 %.



Некоторые сложности при дешифрировании границ населенных пунктов возникали при определении границ в горной части республики, где застройка не столь плотная, и, на первый взгляд, хаотичная. Однако там основным фактором является рельеф (уклоны склонов), а также наличие/отсутствие дорожной сети.

По состоянию на 1985 г. на территории ЧР в современных границах располагалось 348 жилых населенных пунктов, которые занимали площадь 465,3 км<sup>2</sup>. По состоянию на 2024 г. количество НП в республике составило 364 [Чеченская Республика в цифрах ..., 2024], а площадь земель населенных пунктов по состоянию на 2023 г. составляла 1356,2 км<sup>2</sup>. По нашим данным, на территории республики в настоящее время насчитывается 319 жилых населенных пунктов, а их площадь в 2024 г. составила 929,8 км<sup>2</sup>. Расхождение в современных площадях населенных пунктов можно объяснить тем, что границы населенных пунктов изменяются с учетом перспектив их расширения в пределах муниципальных образований, тогда как наши данные характеризуют их площадь на дату исследования. Что касается количества населенных пунктов, то, например, город Грозный в настоящее время поглотил не менее 5 населенных пунктов, ранее являвшихся его пригородами.

### Результаты исследования

Результаты сопоставления данных по изменению площадей населенных пунктов, полученных на основе топографических карт (1985 г.) и космических снимков (2024 г.) представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Таблица 1/ Table 1

#### Изменение площади населенных пунктов в пределах природных ландшафтов на территории Чеченской Республики / Changes in the area of settlements within natural landscapes in the Chechen Republic

| Ландшафты/<br>Landscapes                                                                     | Площадь<br>ландшафтов,<br>км <sup>2</sup> / Landscape<br>area, km <sup>2</sup> | Площадь НП, км <sup>2</sup> /<br>Area of settlements,<br>km <sup>2</sup> |         | Изменение<br>площади/<br>Changing the area |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------|-------|
|                                                                                              |                                                                                | 1985 г.                                                                  | 2024 г. | км <sup>2</sup>                            | %     |
| Полупустынные и пустынные/<br>Semi-desert and desolate                                       | 4348                                                                           | 36,1                                                                     | 47,8    | 11,7                                       | 32,4  |
| Степные/ Steppe                                                                              | 3579                                                                           | 255,1                                                                    | 633,8   | 378,7                                      | 148,5 |
| Дельтовые и пойменные /Delta and<br>floodplain areas                                         | 1579                                                                           | 82,6                                                                     | 130,9   | 48,3                                       | 58,5  |
| Низкогорные лесо-кустарниково-<br>лугово-степные/ Low-mountain<br>forest-shrub-meadow-steppe | 863                                                                            | 8,1                                                                      | 9,8     | 1,7                                        | 21,0  |
| Нижнегорно-лесные /Lower<br>Mountain forests                                                 | 607                                                                            | 9,8                                                                      | 14,4    | 4,6                                        | 46,9  |
| Среднегорно-лесные/ Mid-mountain<br>forests                                                  | 2320                                                                           | 61,4                                                                     | 77,8    | 16,4                                       | 26,7  |
| Горно-котловинные кустарниково-<br>лугово-степные /Mountain-hollow<br>shrub-meadow-steppe    | 237                                                                            | 3,4                                                                      | 7,0     | 3,6                                        | 105,9 |
| Горно-котловинные кустарниково-<br>степные/ Mountain -hollow-shrub-<br>steppe                | 162                                                                            | 4,7                                                                      | 3,9     | -0,8                                       | 83,0  |
| Верхнегорные лесные и<br>последлесные /Upper montane forest<br>and post-forest               | 1051                                                                           | 1,9                                                                      | 2,0     | 0,1                                        | 5,3   |

|                                                                                                    |       |       |       |       |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Высокогорные субальпийские лесо-кустарниково-луговые / High-altitude subalpine forest-shrub-meadow | 1021  | 2,2   | 2,4   | 0,2   | 9,1  |
| Высокогорные альпийские кустарниково-луговые / High-altitude Alpine shrub-meadow                   | 291   |       |       |       |      |
| Высокогорные субнивальные / Highland subnival                                                      | 71    |       |       |       |      |
| Гляциально-нивальные / Glacial-nival                                                               | 32    |       |       |       |      |
| Итого/Total                                                                                        | 16160 | 465,3 | 929,8 | 464,5 | 99,8 |

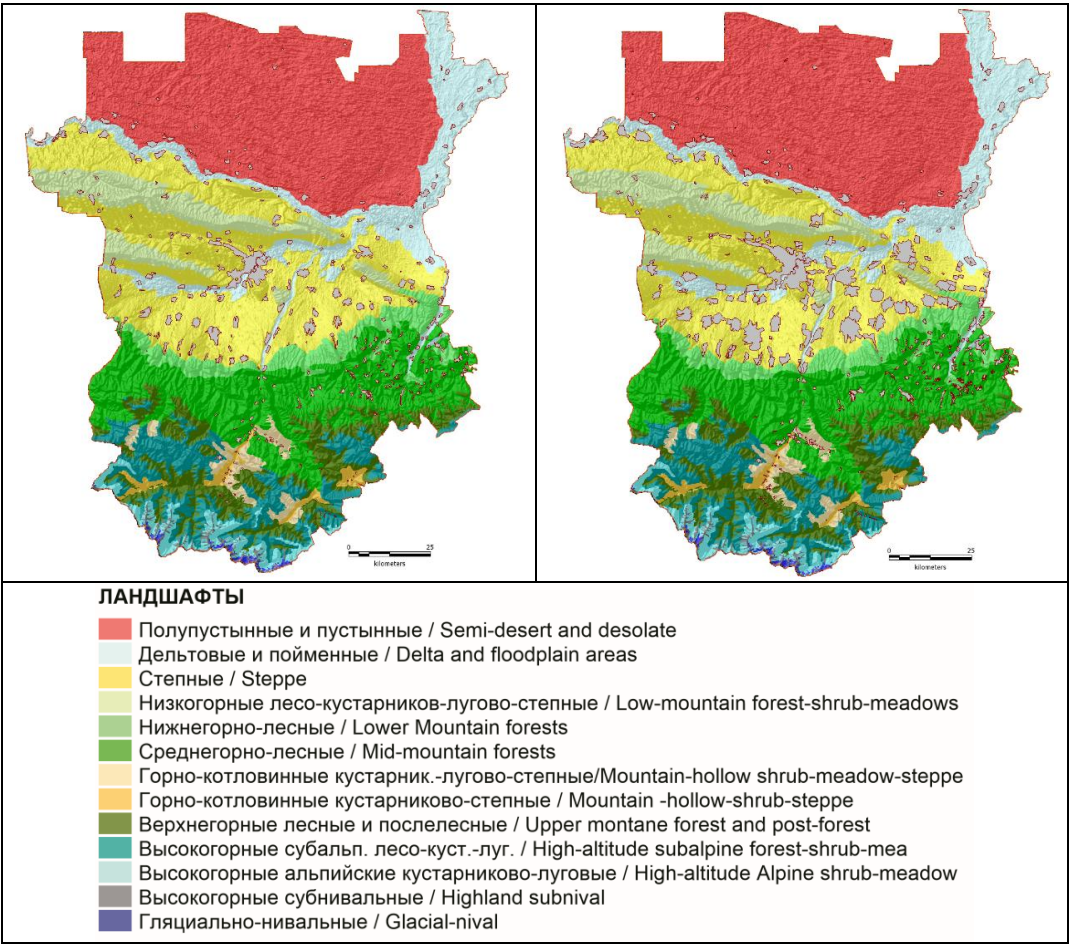


Рис. 3. Населенные пункты по состоянию на 1985 (а) и 2024 (б) годы в пределах природных ландшафтов Чеченской Республики /

Fig. 3. Settlements as of 1985 (a) and 2024 (b) within the natural landscapes of the Chechen Republic

Как видно из представленных данных, площадь населённых пунктов за 1985–2024 гг. на изучаемой территории возросла практически в 2 раза: с 477,2 км<sup>2</sup> в 1985 г. до 927,9 км<sup>2</sup> в 2024 г., однако увеличение площади селитебных территорий в разных ландшафтах протекает неравномерно. Существенное влияние на этот процесс оказывают природные условия, характерные для каждого ландшафта, определяющие возможности его освоения и ведения хозяйства.

**Равнинные ландшафты**, к которым относятся полупустынные и пустынные, степные, а также гидроморфные и субгидроморфные, занимают площадь 9506 км<sup>2</sup> или 58,8 % от всей территории Чеченской Республики. За указанный промежуток времени площадь населенных пунктов здесь увеличилась с 373,8 км<sup>2</sup> до 812,5 км<sup>2</sup>, или почти в 2,2 раза. Однако наиболее существенный прирост отмечается в пределах степных ландшафтов, где прирост составил почти 2,5 раза. Далее следуют гидроморфные и субгидроморфные ландшафты, в пределах которых площадь населенных пунктов увеличилась в 1,6 раза. Наконец, в пределах полупустынных и пустынных ландшафтов площадь населенных пунктов возросла в 1,3 раза.

В целом картина изменения площадей населённых пунктов довольно легко объясняется природными условиями: наиболее комфортными для проживания и ведения хозяйственной деятельности, прежде всего сельскохозяйственной, являются степные ландшафты Чеченской Республики. Эти ландшафты занимают территорию между Терским и Сунженским передовыми хребтами с одной стороны и Лесистым хребтом Большого Кавказа, занимая территорию Чеченской наклонной равнины. Здесь площадь населенных пунктов выросла почти в 2,5 раза: с 255,1 до 633,8 км<sup>2</sup>. Значительное увеличение площади населенных пунктов здесь иллюстрирует ускорение роста Грозненской агломерации: в 2021 году к Грозному присоединили поселки Гикало и Пригородное. Также в пределах данного ландшафта располагается 2-ой по числу жителей в республике город – Гудермес.

Интересной чертой процесса заселения в пределах степных, а также дельтовых и пойменных ландшафтов, получивших широкое распространение на территории Чеченской наклонной равнины, стал рост не столько площади городов, сколько сельских населенных пунктов. Так, площадь городской черты Грозного возросла за рассматриваемый период с 83,8 до 115,9 км<sup>2</sup> (38 %), Гудермеса – с 10,7 до 30,7 км<sup>2</sup> (189 %). При этом площади ранее наиболее крупных сельских населенных пунктов – Урус-Мартана и Шали, возросли соответственно с 12,4 до 33,9 км<sup>2</sup> (173 %) и с 10,6 до 30,8 км<sup>2</sup> (191 %). Тенденция увеличения площади характерна и для более мелких по количеству населения сельских населенных пунктов в пределах этих подтипов ландшафтов. Негативным последствием этого процесса является сокращение площадей сельскохозяйственных угодий.

Смежными со степными являются интразональные дельтовые и пойменные ландшафты, приуроченные к поймам и террасам наиболее крупных рек (Терека, Сунжи, Аргуна и др.), где традиционно размещалось население при первичном заселении территории. В пределах этих ландшафтов площадь населенных пунктов увеличилась с 82,6 до 130,9 км<sup>2</sup>, в том числе за счет того, что наиболее низкорасположенная часть города Грозного приурочена к данному подтипу ландшафтов.

Наименее комфортными для проживания на равнинной территории с точки зрения климатических условий, являются полупустынные и пустынные ландшафты, в связи с чем здесь отмечаются наиболее низкие темпы прироста как населения, так и площади населенных пунктов. В связи с отсутствием здесь возможностей развивать промышленность, это территории, где основной отраслью сельского хозяйства является животноводство (разведение мелкого рогатого скота). Помимо социально-экономических условий, на возможность заселения данных ландшафтов оказывают существенное влияние современные климатические изменения, протекающие по сценарию увеличения температуры воздуха и сокращения количества осадков. Это,

в свою очередь, снижает природную продуктивность естественных пастбищ и увеличивает затраты на сельскохозяйственное производство.

**Горные ландшафты**, в пределах Чеченской Республики занимают площадь 6655 км<sup>2</sup> или 41,2 % территории. Они представлены высотно-зональными ландшафтами, связанными со склонами горного сооружения Большого Кавказа, где по мере увеличения абсолютной высоты происходит смена горно-лесной растительности на горно-луговую, которая в наиболее возвышенных местах сменяется снежниками и ледниками. В горных котловинах, приуроченных к долинам наиболее крупных рек и межхребтовым депрессиям, приурочены горно-котловинные ландшафты, где отмечаются наибольшие вариации условий местообитания по сравнению со смежными склонами. Они выражаются в большем разнообразии мезо- и микроэкспозиций склонов, а также их крутизны. В результате здесь спектр растительности может изменяться от сухих степей и зарослей колючих кустарников до лугов. Что касается низкогорий, которые типичны для Сунженского и, отчасти, Терского хребтов, то здесь отмечается сочетание остатков широколиственных лесов, чаще всего в наиболее возвышенных частях, с зарослями кустарников и фрагментами степей.

В 1985 г. площадь населенных пунктов в пределах горных ландшафтов на территории Чеченской Республики составляла 91,5 км<sup>2</sup> (19,7 % от общей площади населенных пунктов), а в 2024 г. – 117,3 км<sup>2</sup> (12,6 % от общей площади населенных пунктов). То есть, несмотря на то, что площадь населенных пунктов, расположенных в пределах горных ландшафтов увеличилась на 25,8 км<sup>2</sup> или на 28 %, сократилась их доля по сравнению с 1985 г. Как и в случае равнинных ландшафтов, прирост площади населенных пунктов протекал по-разному. Максимальный прирост характерен для горно-котловинных кустарниково-лугово-степных ландшафтов: несмотря на то, что их площадь невелика (237 км<sup>2</sup>), здесь площадь населенных пунктов выросла почти 2 раза: с 3,4 до 7,0 км<sup>2</sup>. Данный факт можно объяснить тем, что эти ландшафты наиболее удобны для проживания и ведения хозяйства в горах: более пологий рельеф и более благоприятные климатические условия по сравнению со смежными горно-лесными ландшафтами на склонах позволяют заниматься не только животноводством, но и садоводством, и пчеловодством. Кроме того, эти ландшафты, в силу своих естественных преград, освоены достаточно давно, в частности – Шатойская котловина. В настоящее время здесь улучшились условия для проживания (подведен газ, улучшилась транспортная доступность), что делает их привлекательными для возвращения населения или для их дачного освоения. В этой связи, сокращение площади населенных пунктов в пределах более засушливых, горно-котловинных кустарниково-степных ландшафтов можно объяснить не столько оттоком населения, сколько его переселением в более благоприятные по природным условиям смежные горно-котловинные кустарниково-лугово-степные ландшафты. Тем более что площадь населенных пунктов здесь крайне незначительна.

Довольно значительный прирост площади населенных пунктов характерен также для лесных ландшафтов: от 47 % в пределах нижнегорно-лесных ландшафтов, до 27 % в среднегорно-лесных и 21 % в низкогорных лесо-кустарниково-лугово-степных ландшафтах и до 5 % в пределах верхнегорных лесных и послелесных ландшафтов. Что касается нижнегорно-лесных ландшафтов, то они являются смежными с равнинными степными ландшафтами и характеризуются максимально комфортными среди остальных лесных ландшафтов условиями освоения и проживания: абсолютные высоты до 1000 м формируют благоприятные климатические



условия, особенно для рекреационного освоения. Далее по степени благоприятности освоения и проживания следуют среднегорно-лесные ландшафты, которые располагаются на высотах до 1400–1600 м, после чего сменяются верхнегорными ландшафтами, которые тяготеют к более крутым склонам, а также в значительной степени пострадали от рубок в середине и второй половине XX века. В этой связи, они наименее привлекательны для освоения по сравнению с ландшафтами, распространёнными на склонах Большого Кавказа. Наконец, площадь населенных пунктов в пределах низкогорных лесо-кустарниково-лугово-степных ландшафтов, характерных для склонов Сунженского и Терского хребтов, увеличилась на 21 % за рассматриваемый период, что в целом коррелирует с основной частью лесных ландшафтов.

Наименее благоприятными для проживания в силу суровости природных условий не только на территории Чеченской Республики, но и в остальных частях Кавказа, являются высокогорные ландшафты. В нижней части своего ареала они представлены субальпийскими лесо-кустарниково-луговыми ландшафтами, которые поднимаются до высоты 2400–2600 м, после чего сменяются высокогорными альпийскими кустарниково-луговыми ландшафтами. С учетом того, что площадь населенных пунктов здесь составляет около 2 км<sup>2</sup>, а постоянное население несопоставимо с населением остальных ландшафтов, можно констатировать, что прирост площади населенных пунктов здесь минимальный по сравнению с остальными ландшафтами Чеченской Республики.

### Выводы

Как показали проведенные исследования, для территории Чеченской Республики, где отмечается положительный прирост населения, характерно увеличение селитебной нагрузки на природные ландшафты. Данный вид нагрузки хорошо выявляется на основе данных дистанционного зондирования Земли среднего пространственного разрешения путем визуального дешифрирования. За 1985–2024 гг. площадь населенных пунктов возросла в целом по республике с 465,3 до 929,8 км<sup>2</sup> или в 2 раза. В наибольшей степени селитебная нагрузка возросла в пределах равнинных степных ландшафтов, получивших распространение в пределах Чеченской равнины, где площадь населенных пунктов возросла с 255,1 до 633,8 км<sup>2</sup> или почти в 2,5 раза. При этом основной прирост связан не столько с увеличением площади городов с многоэтажной застройкой, сколько с увеличением площади сельских населенных пунктов. В пределах горных ландшафтов также отмечается рост селитебной нагрузки на природные ландшафты, но он не сопоставим с этим процессом в равнинной части. Несмотря на то, что в горно-котловинных кустарниково-лугово-степных ландшафтах прирост площади населенных пунктов составил 106%, их абсолютная площадь возросла с 3,4 до 7,0 км<sup>2</sup>; в пределах наиболее широко распространенных среднегорно-лесных ландшафтов площадь населенных пунктов увеличилась с 61,4 до 77,8 км<sup>2</sup> или на 26 %. В пределах остальных горных ландшафтов увеличение площади населенных пунктов можно оценить как умеренное и связанное, во-первых, с общим увеличением населения, и, во-вторых, с улучшением бытовых условий проживания (газификация, улучшение транспортной доступности и пр.), а также с желанием коренного населения восстановления исторических родовых земель. Это повышает привлекательность горных ландшафтов для дальнейшего освоения, особенно рекреационного.

## Литература

1. Атаев З.В. Антропогенная трансформация ландшафтов Северо-Восточного Кавказа. // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1. № 11(34). – С. 105–108.
2. Беленко В.В. Функциональное зонирование и картографирование застраиваемых территорий по многозональным космическим снимкам для целей градостроительства. // Естественные и технические науки. – 2017. – № 9. – С. 33–37.
3. Братков В.В., Идрисова Р.А., Алсабекова А.А. Ландшафтное разнообразие Чеченской Республики. // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2009. – № 1. – С. 34–39.
4. Верещака Т.В., Зверев А.Т., Сладкопепцев С.А., Судакова С.С. Визуальные методы дешифрирования. М.: Недра, 1990. – 344 с.
5. Заурбеков Ш.Ш., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Геоэкологическая оценка антропогенной модификации ландшафтов Чеченской Республики. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2010. – № 1(10). – С. 86–91.
6. Идрисова Р.А. Ландшафты Чеченской Республики: пространственная структура и особенности селитебной нагрузки: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 2500.23 / Идрисова Роза Абдулаевна. – Нальчик: ВГИ, 2009. – 23 с.
7. Канищев В.В., Кунавин К.С. Измерение площадей природных угодий русских дворянских имений конца XVIII – первой половины XIX в. средствами ГИС-технологий. // Историческая информатика. – 2021. – № 3. – С. 86–102. DOI: 10.7256/2585-7797.2021.3.36317.
8. 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.
9. Кресникова Н.И., Васильевых Н.А. Применение данные дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для обеспечения территориального планирования. // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62. № 2. – С. 212–217.
10. Мильков Ф.Н. Человек и ландшафты. М.: Мысль, 1973. – 224 с.
11. Панарин В.А., Панарин Р.В. Применение космических снимков в муниципальном управлении урбанизированных территорий для задач территориального планирования. // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 40–55.
12. Сенная Е.И., Молодан Я.Е. Оценка селитебной нагрузки на ландшафты в процессе региональных ландшафтно-экологических исследований. // Учёные записки РГГМУ. – 2013. – Вып. 28. – С. 88–92.
13. Скрипчинский А.В., Бадов А.Д., Бадов О.А., Борисов Д.Д. Анализ состояния водоохранной зоны городского округа Дербент на основе ГИС-технологий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.75.014.
14. Чеченская Республика в цифрах. 2024: Краткий статистический сборник. Грозный: Чеченстат, 2024. – 148 с.
15. Bai X., Xu H. Understanding spatial growth of the old city of Nanjing during 1850–2020 based on historical maps and Landsat data. // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2023. – Vol. 26. – pp. 25–41. DOI: 10.1016/j.ejrs.2022.12.005.
16. Chen J., Dai X., Guo Y., Zhu J., Mei X., Deng M., Sun G. Urban built environment assessment based on scene understanding of high-resolution remote sensing imagery. // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15. Issue 5. – Art. No. 1436. DOI: 10.3390/rs15051436.
17. Chettry V., Surawar M. Delineating urban growth boundary using remote sensing, ANN-MLP and CA model: a case study of Thiruvananthapuram urban agglomeration, India. // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2021. Vol. 49. – pp. 2437–2450. DOI: 10.1007/s12524-021-01401-x.
18. Ma X., Li Ch., Tong X., Liu S. A New fusion approach for extracting urban built-up areas from Multisource Remotely Sensed Data. // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. Issue 21. – Art. No. 2516. DOI: 10.3390/rs11212516.

19. Nistor C., Virghileanu M., Carlan I., Mihai B.-A., Toma L., Olariu B. Remote sensing-based analysis of urban landscape change in the city of Bucharest, Romania. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. Issue 12. – Art. No. 2323. DOI: 10.3390/rs13122323.

20. O'Neill F.D., Wayant N.M., Becker S.J. Predicting future built-up land cover from a yearly time series of satellite-derived binary urban maps. // *Land*. – 2025. – Vol. 14. Issue 8. – Art. No. 1630. DOI: 10.3390/land14081630.

21. Wang H., Gong X., Wang B., Deng Ch., Cao Q. Urban development analysis using built-up area maps based on multiple high-resolution satellite data. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2021. – Vol. 103. – Art. No. 102500. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102500.

22. Yu D., Fang Ch. Urban remote sensing with spatial big data: a review and renewed perspective of urban studies in recent decades. // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. Issue 5. – Art. No. 1307. DOI: 10.3390/rs15051307.

## References

1. Ataev Z.V. Anthropogenic transformation of landscapes of the Northeastern Caucasus. *Young Scientist*. 2011. Vol. 1. No. 11(34). pp. 105–108. (In Russ.)

2. Belenko V.V. Functional zoning and mapping of built-up areas based on multi-zone satellite images for urban planning purposes. *Natural and Technical Sciences*. 2017. No. 9. pp. 33–37. (In Russ.)

3. Bratkov V.V., Idrisova R.A., Alsabekova A.A. Landscape diversity of the Chechen Republic. *Bulletin of the North Caucasus State Technical University*. 2009. No. 1. pp. 34–39. (In Russ.)

4. Vereshchaka T.V., Zverev A.T., Sladkopevtsev S.A., Sudakova S.S. Visual methods of deciphering. Moscow. Nedra. 1990. 344 p. (In Russ.)

5. Zaurbekov Sh.Sh., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Geocological assessment of anthropogenic modification of landscapes in the Chechen Republic. *Izvestiya Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*. 2010. No. 1(10). pp. 86–91. (In Russ.)

6. Idrisova R.A. Landscapes of the Chechen Republic: spatial structure and features of residential load. Nalchik. High-Mountain Geophysical Institute. 2009. 23 p. (In Russ.)

7. Kanishchev V.V., Kunavin K.S. Measuring the areas of natural lands belonging to Russian noble estates in the late 18th and first half of the 19th centuries using GIS technologies. *Historical Informatics*. 2021. No. 3. pp. 86–102. DOI: 10.7256/2585-7797.2021.3.36317. (In Russ.)

8. 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.)

9. Kresnikova N.I., Vasilevykh N.A. Remote sensing and geoinformation technology data usage for spatial planning ensuring. *Izvestia vuzov “Geodesy and Aerophotosurveying”*. 2018. Vol. 62. No. 2. pp. 212–217. (In Russ.)

10. Milkov F.N. *Man and Landscapes*. Moscow. Mysl. 1973. 224 p. (In Russ.)

11. Panarin V.A., Panarin R.V. Application of space images in municipal management of urbanized territories for territorial planning tasks. *Geomatics*. 2009. No. 3. pp. 40–55. (In Russ.)

12. Sennaya E.I., Molodan Ya.E. Residential load assessment on the landscape in the regional landscape ecological researches. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013. Issue 28. pp. 88–92. (In Russ.)

13. Skripchinsky A.V., Badov A.D., Badov O.A., Borisov D.D. Water protection zone state analysis of the Derbent city district on the basis of GIS technologies. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.75.014. (In Russ.)

14. *The Chechen Republic in Figures. 2024: Brief Statistical Compilation*. Grozny. Chechenstat. 2024. 148 p. (In Russ.)

15. Bai X., Xu H. Understanding spatial growth of the old city of Nanjing during 1850–2020

based on historical maps and Landsat data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2023. Vol. 26. pp. 25–41. DOI: 10.1016/j.ejrs.2022.12.005.

16. Chen J., Dai X., Guo Y., Zhu J., Mei X., Deng M., Sun G. Urban built environment assessment based on scene understanding of high-resolution remote sensing imagery. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Issue 5. Art. No. 1436. DOI: 10.3390/rs15051436.

17. Chettry V., Surawar M. Delineating urban growth boundary using remote sensing, ANN-MLP and CA model: a case study of Thiruvananthapuram urban agglomeration, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2021. Vol. 49. pp. 2437–2450. DOI: 10.1007/s12524-021-01401-x.

18. Ma X., Li Ch., Tong X., Liu S. A New fusion approach for extracting urban built-up areas from Multisource Remotely Sensed Data. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Issue 21. Art. No. 2516. DOI: 10.3390/rs11212516.

19. Nistor C., Virghileanu M., Carlan I., Mihai B.-A., Toma L., Olariu B. Remote sensing-based analysis of urban landscape change in the city of Bucharest, Romania. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Issue 12. Art. No. 2323. DOI: 10.3390/rs13122323.

20. O'Neill F.D., Wayant N.M., Becker S.J. Predicting future built-up land cover from a yearly time series of satellite-derived binary urban maps. *Land*. 2025. Vol. 14. Issue 8. Art. No. 1630. DOI: 10.3390/land14081630.

21. Wang H., Gong X., Wang B., Deng Ch., Cao Q. Urban development analysis using built-up area maps based on multiple high-resolution satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 103. Art. No. 102500. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102500.

22. Yu D., Fang Ch. Urban remote sensing with spatial big data: a review and renewed perspective of urban studies in recent decades. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Issue 5. Art. No. 1307. DOI: 10.3390/rs15051307.



УДК 504.75

DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m

Оригинальная статья

## Влияние микропластика на загрязнение почв тяжелыми металлами

А.С. Кануков<sup>ORCID</sup>, О.Г. Бурдзиева<sup>ORCID</sup>, К.В. Корбесова<sup>ORCID</sup>,  
Э.В. Дадтеева<sup>ORCID</sup>

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

Статья поступила: 29.10.2025, доработана: 12.12.2025, принята к публикации: 17.12.2025

**Резюме:** Целью работы являлось изучение современного состояния проблемы загрязнения горнодобывающей территории. Длительная добыча полезных ископаемых в Северной Осетии привела к образованию большого количества отходов, обогащенных тяжелыми металлами, которые способствуют загрязнению почв и вод. Представляет интерес проблема комплексного взаимодействия частиц микропластика (МП) и тяжелых металлов (ТМ) в окружающей среде, когда рассматриваются как прямые механизмы, такие как физико-химическая сорбция, так и опосредованные воздействия. Это в полной мере определяет актуальность проблемы. **Методы.** Проведен анализ современных источников по исследуемой тематике. В соответствии с используемой методологией выполнена критическая оценка и обобщение литературных источников для формирования общей картины текущего состояния научной области. В процессе поиска научных публикаций использовались несколько ведущих международных научных баз данных (Scopus, Web of Science, PubMed и др.) с релевантными ключевыми словами. **Результаты.** Показано, что состаренные и фотодегradированные частицы, обладают более высокой сорбционной емкостью из-за увеличения удельной поверхности и образования кислородсодержащих групп. Показано, что явления адсорбции и десорбции способны кардинально менять распределение металлов между их фазами, влиять на их химическую спецификацию (формы нахождения) и, что наиболее важно с токсикологической точки зрения, на биодоступность для гидробионтов и почвенных организмов. Несмотря на большое число исследований, многое во взаимодействиях элементов загрязнения все еще остается неясным. Тем не менее, установлены ключевые пробелы в современных исследованиях по данной тематике, что обуславливает необходимость исследований, ориентированных на реалистичные многокомпонентные системы и долгосрочные эффекты в природных экосистемах для адекватной оценки геоэкологических рисков.

**Ключевые слова:** геоэкология, тяжелые металлы, загрязнение почв, микропластик.

**Для цитирования:** Кануков А.С., Бурдзиева О.Г., Корбесова К.В., Дадтеева Э.В. Влияние микропластика на загрязнение почв тяжелыми металлами. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 197–210. DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m

DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m

Original paper

## The impact of microplastics on soil contamination by heavy metals

A.S. Kanukov<sup>ORCID</sup>, O.G. Burdzieva<sup>ORCID</sup>, K.V. Korbesova<sup>ORCID</sup>, E.V. Dadteyeva<sup>ORCID</sup>

Geophysical institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,  
e-mail: cgi\_ras@mail.ru

Received: 29.10.2025, revised: 12.12.2025, accepted: 17.12.2025

**Abstract:** The aim of this work was to examine the current state of pollution in a mining-affected territory. Prolonged mining activities in North Ossetia have resulted in the generation of a significant amount of waste enriched with heavy metals, contributing to soil and water contamination. Of particular interest is the complex interaction between microplastic (MP) particles and heavy metals (HM) in the environment, encompassing both direct mechanisms, such as physicochemical sorption, and indirect impacts. This fully underscores the relevance of the problem. **Methods.** An analysis of contemporary literature on the research topic was conducted. In accordance with the applied methodology, a critical evaluation and synthesis of literary sources were performed to form an overall picture of the current state of the scientific field. The search for scientific publications utilized several leading international databases (Scopus, Web of Science, PubMed, etc.) with relevant keywords. **Results.** It is shown that aged and photodegraded particles possess higher sorption capacity due to increased specific surface area and the formation of oxygen-containing functional groups. It is demonstrated that the phenomena of adsorption and desorption can fundamentally alter the distribution of metals between their phases, influence their chemical speciation, and, most importantly from a toxicological perspective, affect their bioavailability to aquatic organisms and soil biota. Despite a substantial body of research, much regarding the interactions of these pollutants remains unclear. Nevertheless, key gaps in current research on this topic have been identified, highlighting the necessity for studies focused on realistic multicomponent systems and long-term effects in natural ecosystems to adequately assess geo-environmental risks.

**Keywords:** ecology, heavy metals, soil pollution, microplastics.

**For citation:** Kanukov A.S., Burdzieva O.G., Korbesova K.V., Dadteyeva E.V. The impact of microplastics on soil contamination by heavy metals. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 197–210. DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m

### Введение

Длительная добыча полезных ископаемых привела к образованию большого количества отходов, обогащенных тяжелыми металлами, которые способствуют загрязнению почв и вод [Бурдзиева и др., 2014, 2024; Реутова и др., 2025]. Тяжелые металлы считаются канцерогенными для экосистемы из-за их естественной стойкости, не поддающейся биологическому разложению и способности накапливаться и переноситься в открытой системе. Загрязнение тяжелыми металлами представляет собой серьезную проблему, поскольку они представляют опасность не только для экосистемы, но и угрожают здоровью населения за счет их биоаккумуляции [Заалишвили и др., 2021].

**Методы.** Проведен анализ современных источников по исследуемой тематике. В соответствии с используемой методологией выполнена критическая оценка и обоб-

щение литературных источников для формирования общей картины текущего состояния научной области. В процессе поиска научных публикаций использовались несколько ведущих международных научных баз данных (Scopus, Web of Science, PubMed и др.) с релевантными ключевыми словами. В ходе написания данной статьи выполнен литературный анализ наиболее цитируемых источников литературы по исследуемой тематике.

### Обсуждение взаимодействия микропластика с тяжелыми металлами

В последние годы появилось множество исследований посвященных изучению влияния микропластика (МП) на окружающую среду и его взаимодействия с тяжелыми металлами. Микропластиковые частицы способны влиять на экологическое поведение и риски тяжелых металлов через прямые и косвенные механизмы. С одной стороны, они могут непосредственно модифицировать физико-химические свойства, включая процессы адсорбции и десорбции металлов, что сказывается на их биоаккумуляции и токсичности для живых организмов [Godoy et al., 2019; Lee et al., 2019; Lian et al., 2020; Liao, Yang, 2020; Lu et al., 2020; Wakkaf et al., 2020; Zhou et al., 2020]. С другой стороны, параметры среды, такие как pH и концентрация растворенного органического вещества, также воздействуют на взаимодействие МП с металлами, изменяя их спецификацию и биодоступность [Yu et al., 2020, 2021]. Подобные физико-химические преобразования, вероятно, меняют экологические риски, как для МП, так и для металлов. Однако механизмы взаимодействия между разными тяжелыми металлами и отдельными типами МП могут быть разнородными и сложными, а ключевые параметры, определяющие это взаимодействие, в значительной мере остаются неисследованными. Существующие обзорные работы в основном посвящены аналитическим методам, экотоксикологическим эффектам, микробной/химической деградации, а также обнаружению и удалению МП [Dey et al., 2021; Gao et al., 2020; Huang et al., 2021; Li et al., 2020; Othman et al., 2021], тогда как обзоры, рассматривающие влияние МП на поведение тяжелых металлов в окружающей среде, встречаются реже.

Микропластик способен аккумулировать различные тяжелые металлы, включая свинец, кадмий, медь, хром, никель, цинк и другие, в то время как адсорбированные или включенные в их состав металлы также могут высвобождаться с поверхности или из объема частиц [Godoy et al., 2019; Abbasi et al., 2020; Kern et al., 2021; Liao, Yang, 2020]. Таким образом, эти процессы способны изменять концентрацию металлов в среде. Ряд исследований действительно выявил наличие значимой положительной или отрицательной корреляции между концентрацией тяжелых металлов и количеством МП в донных отложениях или организмах [Akhbarizadeh et al., 2017; Yazdani Foshtomi et al., 2019; Zhu et al., 2020]. Кроме того, МП проявляют различную способность к адсорбции и десорбции в отношении разных металлов [Godoy et al., 2019; Wang et al., 2020]. Также установлено, что высвобождение хрома из МП происходит быстрее, чем свинца, в одинаковых условиях [Godoy et al., 2020], что может объясняться различиями в радиусах гидратированных ионов и комплексообразующей способности двухвалентных катионов [Zou et al., 2020]. На адсорбцию, высвобождение и диффузию тяжелых металлов также влияет состав МП, в первую очередь из-за разных свойств полимеров: удельная поверхность, пористость, морфология, поверхностный заряд и/или степень деградации поверхно-

сти. Экспериментальные условия, а также специфические характеристики самих металлов также могут обуславливать различия в их адсорбции на МП [Godoy et al., 2019; Li et al., 2019; Guo et al., 2020; Liao, Yang, 2020].

Присутствие микропластика способно изменять видовое разнообразие металлов в окружающей среде. К примеру, частицы МП могут увеличивать долю металлов, связанных с органическим веществом, за счет прямой адсорбции и последующего изменения физико-химических и биогеохимических свойств почвы, таких как содержание растворенного органического углерода и pH [Yu et al., 2020, 2021]. Кроме того, наличие МП в почве может снижать долю обменных, карбонатных и связанных с оксидами Fe-Mn фракций Cu, Cr и Ni [Yu et al., 2020]. В то же время, исследования показывают, что концентрации экстрагируемого диэтилентриаминпентауксусной кислотой кадмия в почве возрастают при присутствии следующих видов пластика: HDPE, PE, PLA и PS [Wang et al., 2020]. Изменения в спецификации, в конечном счете, могут модифицировать биодоступность металлов или металлоидов в окружающих матрицах. Например, установлено, что присутствие МП в почве снижает биодоступность мышьяка благодаря его адсорбции на частицах пластика [Dong et al., 2021]. Напротив, биодоступность кадмия для дождевых червей увеличивается в почве, загрязненной МП [Zhou et al., 2020]. Также установлено, что кадмий обладает более высокой биодоступностью в присутствии PLA в системе «почва–растение» по сравнению с PE [Wang et al., 2020]. В совокупности эти исследования показывают, что влияние МП на спецификацию металлов и их биодоступность может варьировать в зависимости от таких факторов, как тип полимера, химический состав почвы и условия окружающей среды (время инкубации, экспериментальная среда и др.) [Liao, Yang, 2020; Yu et al., 2020, 2021].

Взаимодействие микропластика с тяжелыми металлами способно изменять их биоаккумуляцию и токсичность. Неблагоприятное воздействие МП и/или металлов на организмы может усиливаться в зависимости от дозы или размера частиц при совместном присутствии загрязнителей [Lee et al., 2019; Wang et al., 2020]. Примером служит ингибирование роста у животных, наблюдаемое у желтых морских коньков и дождевых червей при повышенном накоплении кадмия [Lu et al., 2018; Banaee et al., 2019; Sun et al., 2019; Yan et al., 2020; Zhou et al., 2020; Wang et al., 2021], что может быть связано с окислительным повреждением и воспалительными реакциями, вызванными комбинированным воздействием [Lu et al., 2018; Wen et al., 2018; Lee et al., 2019]. В нескольких работах было продемонстрировано и противоположное явление, когда организмы оказываются защищены благодаря взаимодействию между кадмием и хелатирующими МП. Например, ПВХ снижает токсичность кадмия для нематод, возможно, из-за высокой хелатирующей способности данного полимера [Wakkaf et al., 2020]. Кроме того, присутствие МП частично уменьшало содержание кадмия в листьях пшеницы мягкой и снижало накопление ртути (Hg) и Cd у лаврака обыкновенного и голубого диска соответственно [Barboza et al., 2018; Wen et al., 2018; Lian et al., 2020]. Также было отмечено, что МП способствуют выведению ртути из мидий [Fernández et al., 2020]. Установлено, что МП не усиливают биоконцентрацию кадмия в тканях растений и не ингибируют рост водорослей при комбинированном воздействии с медью [Bellingeri et al., 2019; Wang et al., 2020]. Более того, результаты показали, что присутствие таких организмов, как рыбы, также влияло на концентрацию ртути в растворе и на процессы взаимодействия между МП и тяжелыми металлами [Barboza et al., 2018].



Эти изменения, в свою очередь, воздействовали на токсичность и биоаккумуляцию металлов в организмах.

Различные факторы окружающей среды, такие как pH воды, ионная сила и наличие органических веществ, могут прямо (через адсорбцию и эффекты комплексообразования) или косвенно влиять на химическую спецификацию и перенос тяжелых металлов на МП. Значение pH способно изменять дзета-потенциал МП или вызывать осаждение тяжелых металлов, тем самым увеличивая или уменьшая адсорбцию некоторых элементов. В целом, дзета-потенциал МП снижается с ростом pH. Если точка нулевого заряда полимера ниже pH среды, заряд МП становится отрицательным, что усиливает электростатическое притяжение между полимером и катионами металлов. С другой стороны, осаждение некоторых металлов более вероятно в средах с  $\text{pH} > 7$ . Исследования показывают, что адсорбция ряда тяжелых металлов на МП зависит от pH [Godoy et al., 2019], причем ее усиление для Pb, Cd, Co, Ni, Cu и Zn наблюдается при повышении этого показателя [Holmes et al., 2014; Guo et al., 2020; Lin et al., 2021; Purwiyanto et al., 2020; Tang et al., 2020; Wang et al., 2020; Zou et al., 2020; Комаров, Решетняк, 2024]. Это увеличение, вероятно, связано с ростом числа заряженных участков на поверхности МП. В противоположность этому, адсорбция Cr(6+) на МП уменьшается с повышением pH, возможно, из-за ослабления кулоновских взаимодействий между оксианионной формой хрома и МП с уменьшенным положительным поверхностным зарядом [Holmes et al., 2014]. В то же время, pH не оказывает влияния на адсорбцию меди [Holmes et al., 2014]. В целом, pH, по-видимому, воздействует на адсорбцию тяжелых металлов на МП, модифицируя электростатические свойства их поверхности [Guo et al., 2020; Lin et al., 2021].

Поверхностный заряд, доступность сорбционных центров, агрегация МП и активность тяжелых металлов могут изменяться под влиянием ионной силы, что, в свою очередь, сказывается на адсорбционных процессах. В отличие от влияния pH, адсорбция тяжелых металлов (Cd, Cu, Co, Ni, Pb и др.) на МП ингибируется при увеличении ионной силы [Holmes et al., 2014; Guo et al., 2020; Lian et al., 2020; Tang et al., 2020; Lin et al., 2021]. Это связано с усилением конкуренции металлов за сорбционные центры на МП и снижением их активности в растворе [Zou et al., 2020]. Однако было показано, что высокая ионная сила увеличивает адсорбцию хрома за счет уменьшения электростатического отталкивания между отрицательно заряженными поверхностями МП и хромат-анионами [Holmes et al., 2014]. В случае меди, из-за ее сильного комплексообразования с СРЕ, влияние увеличения ионной силы на сорбцию минимально [Zou et al., 2020]. В нескольких исследованиях было продемонстрировано, что соленость не оказывает значительного влияния на адсорбцию меди и свинца микропластиком [Holmes et al., 2014; Purwiyanto et al., 2020].

Присутствие органического вещества может изменять адсорбционную/десорбционную способность, биоаккумуляцию и токсичность тяжелых металлов, вмешиваясь в процессы взаимодействия между МП и металлами. Ассоциация природного органического вещества с функционализированными поверхностями МП может способствовать связыванию тяжелых металлов [Bradney et al., 2019; Li et al., 2019]. Например, сорбция кадмия на МП увеличивается с ростом концентрации гуминовых кислот [Guo et al., 2020]. Также было обнаружено, что сорбция Ag, Pb, Cr и Cu на МП усиливается под воздействием органических веществ [Godoy et al., 2019; Qiao et al., 2019; Abdolapur Monikh et al., 2020]. Это усиление может объяснять-

ся увеличением числа адсорбционных центров и обилием функциональных групп на поверхности МП. Кроме того, биоаккумуляция и токсичность меди в рыбе повышаются при совместном присутствии МП и природных органических веществ, вероятно, из-за ингибирования транспорта ионов меди в гепатоцитах и усиления окислительного стресса [Qiao et al., 2019]. С другой стороны, органические вещества могут конкурировать с металлами за места адсорбции на МП, что снижает количество тяжелых металлов, доступных для сорбции, и может приводить к их десорбции [Abbasi et al., 2020]. Например, адсорбция свинца снижается с увеличением концентрации фульвовой кислоты, возможно, из-за усиления комплексообразования между  $Pb(2+)$  и этой кислотой [Tang et al., 2020]. Эти результаты указывают на модулирующую роль органических веществ в адсорбции/десорбции, накоплении и токсичности тяжелых металлов в отношении МП.

При изучении поведения тяжелых металлов в присутствии микропластика наблюдаются антагонистические или синергетические эффекты, когда в среде существуют другие элементы или органические загрязнители. Например, при раздельном присутствии Cd, Zn или Pb адсорбция кадмия на ПЭТ увеличивалась [Abbasi et al., 2020]. Напротив, было обнаружено, что ПЭТ адсорбирует большее количество цинка при совместном присутствии указанных тяжелых металлов в растворе [Abbasi et al., 2020]. Примечательно, что десорбция металлов происходит легче в условиях сосуществования нескольких тяжелых металлов [Abbasi et al., 2020]. Это связано с насыщением адсорбционных центров на поверхности МП; различное сродство металлов к МП, а также конкуренция между ними могут влиять на процесс адсорбции. Кроме того, сосуществование органических загрязнителей также способно влиять на адсорбцию тяжелых металлов на МП [Lin et al., 2021]. Например, показано, что фунгицид протиокназол не влияет на адсорбцию олова, но может снижать адсорбцию Cr, As, Pb и Ba на МП [Li et al., 2020]. В противоположность этому, протиокназол усиливает адсорбцию Cu на МП [Li et al., 2020], что может быть связано с образованием триазолтиолатных комплексов с медью. Таким образом, присутствие других загрязнителей, ионный состав среды и относительные концентрации металлов могут изменять адсорбцию и высвобождение тяжелых металлов из МП [Gao et al., 2019; Li et al., 2020; Tang et al., 2021].

Адсорбция тяжелых металлов на микропластике является спонтанным процессом, определяемым различными характеристиками частиц, такими как размер и состав, степень старения и способность к деградации [Bayo et al., 2017; Gao et al., 2019; Abdolahpur Monikh et al., 2020; Lu et al., 2020; Naqash et al., 2020; Tang et al., 2020]. Установлено, что высвобождение и сорбция кадмия также зависят от размеров и типов МП [Qiao et al., 2019; Liu et al., 2020; Guo et al., 2020]. Кроме того, различные МП демонстрируют разное сродство к тяжелым металлам [Godoy et al., 2019]. Например, по сравнению с PS, PVC показал более высокое сродство к  $Pb(2+)$  и  $Cu(2+)$  из-за большей удельной поверхности и более высокой полярности [Brennecke et al., 2016; Lin et al., 2021]. Сорбционное сродство Cu, Cd и Pb к МП следует порядку CPE > PVC > HPE > LPE, вероятно, из-за различий в химической структуре и электроотрицательности полимеров [Zou et al., 2020]. С другой стороны, адсорбция As, Ti, Ni и Cd усиливалась с увеличением степени старения, окисления и биоразлагаемости пластмасс [Lee et al., 2019; Li et al., 2020; Wang et al., 2020]. По сравнению с исходными МП, состаренные или выветренные частицы обладают более высокой адсорбционной способностью в отношении тяжелых металлов

[Vedolin et al., 2018; Lee et al., 2019; Gao et al., 2020; Lu et al., 2020; Mao et al., 2020; Tang et al., 2020; Wang et al., 2020; Aghilinasrollahabadi et al., 2021], что может быть связано с увеличением площади поверхности и разнообразием функциональных групп (например, кислородсодержащих) на их поверхности [Guo et al., 2020; Tang et al., 2020, 2021]. Кроме того, разлагаемые МП демонстрируют более высокую биодоступность при пероральном приеме и большее высвобождение хрома *in vitro* по сравнению с неразлагаемыми, в первую очередь из-за возможного разрушения их поверхностных химических структур в пищеварительном тракте [Liao, Yang, 2020]. В целом, различные физико-химические свойства МП (состав, размер, степень старения, полярность и разлагаемость) являются ключевыми факторами, влияющими на взаимодействие МП и металлов в окружающей среде.

Физико-химические характеристики МП и тяжелых металлов определяют механизмы их взаимодействия (например, физисорбция или хемосорбция, включающая электростатические взаимодействия, комплексообразование на поверхности, внутричастичную диффузию и т.д.), которые в конечном счете влияют на процессы сорбции [Bayo et al., 2017; Godoy et al., 2019; Guo et al., 2020; Lin et al., 2021; Purwiyanto et al., 2020; Zou et al., 2020; Tang et al., 2020, 2021]. Например, установлено, что кислородсодержащие функциональные группы, такие как карбоксильная группа на поверхности нейлоновых микрочастиц, способствуют адсорбции ионов металлов, облегчая механизм образования поверхностных комплексов [Tang et al., 2020, 2021]. С другой стороны, механизм электростатического взаимодействия может быть связан с гидратным ионным радиусом тяжелых металлов. Продемонстрировано, что свинец обладает значительно более высокой сорбцией, чем медь и кадмий, что, как предполагается, связано с меньшим радиусом гидратированного иона  $Pb(2+)$  и более сильным электростатическим взаимодействием с микрочастицами [Zou et al., 2020].

Влияние солености на процесс адсорбции свинца на микрочастицы гексабромциклододекана показало, что электростатическое взаимодействие может быть преобладающим механизмом адсорбции [Lin et al., 2021]. Однако механизмы, участвующие в процессе адсорбции металлов на пластики, которые, вероятно, разнообразны и сложны, остаются в значительной мере неисследованными. Другие потенциальные или сопутствующие механизмы, доминирующие во взаимодействиях, требуют дальнейшего изучения в различных условиях окружающей среды [Brennecke et al., 2016]. В настоящее время в некоторых исследованиях для оценки механизмов взаимодействия между тяжелыми металлами и микропластиком просто используются несколько видов моделей (например, модель Ленгмюра и модель Фрейндлиха) [Godoy et al., 2019; Purwiyanto et al., 2020]. Это неизбежно приводит к определенным ограничениям, таким как неопределенность результатов, их вариабельность и несопоставимость, что затрудняет понимание экологической судьбы этих загрязнителей.

## Выводы

Микропластик выступает не только как самостоятельный загрязнитель, но и как активный вектор, влияющий на взаимодействие тяжелых металлов с экосистемами. Он способен аккумулировать металлы и изменять их поведение через физико-химические процессы, что в конечном итоге вносит изменения в экологические риски.

На процессы сорбции, спецификации и биодоступности металлов критически влияют:

- состав полимера, размер частиц, удельная поверхность, степень старения и наличие функциональных групп (особенно кислородсодержащих);
- параметры окружающей среды: pH и ионная сила воды определяют поверхностный заряд МП и форму нахождения металлов, влияя на электростатические взаимодействия;
- наличие нескольких металлов или органических загрязнителей создает условия для конкуренции за сорбционные центры, что может менять паттерны адсорбции и десорбции.

Несмотря на большое число исследований, многие аспекты все еще остаются малоизученными. К ним относятся: детальные и универсальные механизмы сорбции (преобладание физисорбции, хемосорбции, комплексообразования), количественные параметры взаимодействия в реальных природных условиях, долгосрочное влияние на трофические цепи и комплексная оценка рисков в гетерогенных системах с множеством загрязнителей. Существующая практика применения упрощенных моделей сорбции часто не учитывает всей сложности природных систем.

Таким образом, взаимодействие микропластика и тяжелых металлов представляет собой сложную, динамичную и контекстно-зависимую систему. Для точной оценки экологических рисков и разработки стратегий восстановления окружающей среды необходимо дальнейшее изучение, основанное на реальных сценариях загрязнения, и многофакторном анализе.

## Литература

1. Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б., Бериев О.Г., Кануков А.С., Майсурадзе М.В. Влияние горнодобывающей деятельности на загрязнение окружающей среды. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 4-2. – С. 8–13.
2. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.
3. Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Дзобелова Л.В. Разработка карт индекса канцерогенного риска территории г. Владикавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2021.98.22.012.
4. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 191–203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w.
5. 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.
6. Abbasi S., Moore F., Keshavarzi B., Hopke P.K., Naidu R., Rahman M.M., Oleszczuk P., Karimi J. PET-microplastics as a vector for heavy metals in a simulated plant rhizosphere zone. // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 744. – Art. No. 140984. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123799.
7. Abdolapur Monikh F., Vijver M.G., Guo Z., Zhang P., Darbha G.K., Peijnenburg W.J.G.M. Metal sorption onto nanoscale plastic debris and trojan horse effects in *Daphnia magna*: Role of dissolved organic matter. // Water Research. – 2020. – Vol. 186. – Art. No. 116410.
8. Akhbarizadeh R., Moore F., Keshavarzi B., Moeinpour A. Microplastics and potentially toxic elements in coastal sediments of Iran's main oil terminal (Khark Island). // Environmental Pollution. – 2017. – Vol. 220. – pp. 720–731.
9. Banaee M., Soltanian S., Sureda A., Gholamhosseini A., Haghi B.N., Akhlaghi M., Derikvandy A. Evaluation of single and combined effects of cadmium and micro-plastic



particles on biochemical and immunological parameters of common carp (*Cyprinus carpio*). // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 236. – Art. No. 124335.

10. Barboza L.G.A., Vieira L.R., Branco V., Figueiredo N., Carvalho F., Carvalho C., Guilhermino L. Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy-related changes and interact with the bioaccumulation of mercury in the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758). // *Aquatic Toxicology*. – 2018. – Vol. 195. – pp. 49–57.

11. Bayo J., Martinez A., Guillen M., Olmos S., Roca M.J., Alcolea A. Microbeads in commercial facial cleansers: threatening the environment. // *Clean Soil Air Water*. – 2017. – Vol. 45. Issue 7. – Art. No. 1600683.

12. Bellingeri A., Bergami E., Grassi G., Faleri C., Redondo-Hasselerharm P., Koelmans A.A., Corsi I. Combined effects of nanoplastics and copper on the freshwater alga *Raphidocelis subcapitata*. // *Aquatic Toxicology*. – 2019. – Vol. 210. – pp. 179–187.

13. Bradney L., Wijesekara H., Palansooriya K.N., Obadamudalige N., Bolan N.S., Ok Y.S., Rinklebe J., Kim K.-H., Kirkham M.B. Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. // *Environment International*. – 2019. – Vol. 131. – Art. No. 104937.

14. Brennecke D., Duarte B., Paiva F., Caçador I., Canning-Clode J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. // *Estuarine Coastal and Shelf Science*. – 2016. – Vol. 178. – pp. 189–195.

15. Dey T.K., Uddin M.E., Jamal M. Detection and removal of microplastics in wastewater: evolution and impact. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. Issue 14. – pp. 16925–16947.

16. Dong Y.M., Gao M.L., Qiu W.W., Song Z.G. Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2021. – Vol. 211. – Art. No. 111899.

17. Fernandez B., Santos-Echeandía J., Rivera-Hernandez J.R., Garrido S., Albentosa M. Mercury interactions with algal and plastic microparticles: Comparative role as vectors of metals for the mussel, *Mytilus galloprovincialis*. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 396. – Art. No. 122739.

18. Gao D., Li X.Y., Liu H.T. Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil. // *The Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 742. – Art. No. 140355.

19. Gao F.L., Li J.X., Sun C.J., Zhang L.T., Jiang F.H., Cao W., Zheng L. Study on the capability and characteristics of heavy metals enriched on microplastics in marine environment. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2019. – Vol. 144. – pp. 61–67.

20. Godoy V., Blazquez G., Calero M., Quesada L., Martin-Lara M.A. The potential of microplastics as carriers of metals. // *Environmental Pollution*. – 2019. – Vol. 255. – Art. No. 113363.

21. Godoy V., Martinez-Ferez A., Martin-Lara M., Vellido-Perez J.A., Calero M., Blazquez G. Microplastics as vectors of chromium and lead during dynamic simulation of the human gastrointestinal tract. // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. Issue 11. – Art. No. 4792.

22. Guo X.T., Hu G.L., Fan X.Y., Jia H.Z. Sorption properties of cadmium on microplastics: the common practice experiment and a two-dimensional correlation spectroscopic study. // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2020. – Vol. 190. – Art. No. 110118.

23. Holmes L.A., Turner A., Thompson R.C. Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions. // *Marine Chemistry*. – 2014. – Vol. 167. – pp. 25–32.

24. Huang W., Song B., Liang J., Niu Q.Y., Zeng G.M., Shen M.C., Deng J.Q., Luo Y., Wen X.F., Zhang Y.F. Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: a review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – Vol. 405. – Art. No. 124187.

25. Kern S., Kern C., Pradja M.M., Düring R.-A., Rohnke M. Spatially resolved indiffusion behavior of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  in polypropylene. // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2021. – Vol. 138. Issue 2. – Art. No. 49655.

26. Lee W.S., Cho H.J., Kim E., Huh Y.H., Kim H.J., Kim B., Kang T., Lee J.S., Jeong J. Bioaccumulation of polystyrene nanoplastics and their effect on the toxicity of Au ions in zebrafish embryos. // *Nanoscale*. – 2019. – Vol. 11. Issue 7. – pp. 3173–3185.
27. Li P., Li Q.C., Hao Z.N., Yu S.J., Liu J.F. Analytical methods and environmental processes of nanoplastics. // *Journal of Environmental Sciences*. – 2020. – Vol. 94. – pp. 88–99.
28. Li X.W., Mei Q.Q., Chen L.B., Zhang H.Y., Dong B., Dai X.H., He C.Q., Zhou J. Enhancement in adsorption potential of microplastics in sewage sludge for metal pollutants after the wastewater treatment process. // *Water Research*. – 2019. – Vol. 157. – pp. 228–237.
29. Lian J.P., Wu J.N., Zeb A., Zheng S.N., Ma T., Peng F.H., Tang J.C., Liu W.T. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? // *Environmental Pollution*. – 2020. – Vol. 263. – Art. No. 114498.
30. Liao Y.L., Yang J.Y. Microplastic serves as a potential vector for Cr in an in-vitro human digestive model. // *The Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 703. – Art. No. 134805.
31. Lin L.J., Tang S., Wang X.S., Sun X., Yu A.Q. Hexabromocyclododecane alters malachite green and lead(II) adsorption behaviors onto polystyrene microplastics: interaction mechanism and competitive effect. // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 265. – Art. No. 129079.
32. Lin Z., Hu Y.W., Yuan Y.J., Hu B.W., Wang B.L. Comparative analysis of kinetics and mechanisms for Pb(II) sorption onto three kinds of microplastics. // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2021. – Vol. 208. – Art. No. 111451.
33. Lu K., Qiao R.X., An H., Zhang Y. Influence of microplastics on the accumulation and chronic toxic effects of cadmium in zebrafish (*Danio rerio*). // *Chemosphere*. – 2018. – Vol. 202. – pp. 514–520.
34. Lu X.M., Lu P.Z., Liu X.P. Fate and abundance of antibiotic resistance genes on microplastics in facility vegetable soil. // *The Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 709. – Art. No. 136276.
35. Mao R.F., Lang M.F., Yu X.Q., Wu R.R., Yang X.M., Guo X.T. Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 393. – Art. No. 122515.
36. Naqash N., Prakash S., Kapoor D., Singh R. Interaction of freshwater microplastics with biota and heavy metals: a review. // *Environmental Chemistry Letters*. – 2020. – Vol. 18. Issue 6. – pp. 1813–1824.
37. Othman A.R., Abu Hasan H., Muhamad M.H., Ismail N.I., Abdullah S.R.S. Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. // *Environmental Chemistry Letters*. – 2021. – Vol. 19. – pp. 3057–3073.
38. Purwiyanto A.I.S., Suteja Y., Trisno, Ningrum P.S., Putri W.A.E., Rozirwan, Agustriani F., Fauziyah, Cordova M.R., Koropitan A.F. Concentration and adsorption of Pb and Cu in microplastics: case study in aquatic environment. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2020. – Vol. 158. – Art. No. 111380.
39. Qiao R.X., Lu K., Deng Y.F., Ren H.Q., Zhang Y. Combined effects of polystyrene microplastics and natural organic matter on the accumulation and toxicity of copper in zebrafish. // *The Science of The Total Environment*. – 2019. – Vol. 682. – pp. 128–137.
40. Sun J.H., Xia S.D., Ning Y., Pan X., Qu J.H., Xu Y.J. Effects of microplastics and attached heavy metals on growth, immunity, and heavy metal accumulation in the yellow seahorse, *Hippocampus kuda* Bleeker. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2019. – Vol. 149. – Art. No. 110510.
41. Tang S., Lin L.J., Wang X.S., Feng A.X., Yu A.Q. Pb(II) uptake onto nylon microplastics: interaction mechanism and adsorption performance. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 386. – Art. No. 121960.
42. Tang S., Lin L.J., Wang X.S., Yu A.Q., Sun X. Interfacial interactions between collected nylon microplastics and three divalent metal ions (Cu(II), Ni(II), Zn(II)) in aqueous solutions. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – Vol. 403. – Art. No. 123548.
43. Vedolin M.C., Teophilo C.Y.S., Turra A., Figueira R.C.L. Spatial variability in the concentrations of metals in beached microplastics. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2018. – Vol. 129. Issue 2. – pp. 487–493.

44. Wakkaf T., Allouche M., Harrath A.H., Mansour L., Alwasel S., Mohamed Thameemul Ansari K.G., Beyrem H., Sellami B., Boufahja F. The individual and combined effects of cadmium, polyvinyl chloride (PVC) microplastics and their polyalkylamines modified forms on meiobenthic features in a microcosm. // *Environmental Pollution*. – 2020. – Vol. 266. – Art. No. 115263.

45. Wang F.Y., Zhang X.Q., Zhang S.Q., Zhang S.W., Sun Y.H. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 254. – Art. No. 126791.

46. Wang L., Gao Y.X., Jiang W., Chen J.X., Chen Y.S., Zhang X.H., Wang G.X. Microplastics with cadmium inhibit the growth of *Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara rather than reduce cadmium toxicity. // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 266. – Art. No. 128979.

47. Wang Q.J., Zhang Y., Wangjin X.X., Wang Y.L., Meng G.H., Chen Y.H. The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. // *Journal of Environmental Sciences*. – 2020. – Vol. 87. – pp. 272–280.

48. Wen B., Jin S.R., Chen Z.Z., Gao J.Z., Liu Y.N., Liu J.H., Feng X.S. Single and combined effects of microplastics and cadmium on the cadmium accumulation, antioxidant defence and innate immunity of the discus fish (*Symphysodon aequifasciatus*). // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 243. – pp. 462–471.

49. Yan W., Hamid N., Deng S., Jia P.P., Pei D.S. Individual and combined toxicogenetic effects of microplastics and heavy metals (Cd, Pb, and Zn) perturb gut microbiota homeostasis and gonadal development in marine medaka (*Oryzias latipes*). // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 397. – Art. No. 122795.

50. Yazdani Foshtomi M., Oryan S., Taheri M., Darvish Bastami K., Zahed M.A. Composition and abundance of microplastics in surface sediments and their interaction with sedimentary heavy metals, PAHs and TPH (total petroleum hydrocarbons). // *Marine Pollution Bulletin*. – 2019. – Vol. 149. – Art. No. 110655.

51. Yu H., Hou J.H., Dang Q.L., Cui D.Y., Xi B.D., Tan W.B. Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 395. – Art. No. 122690.

52. Yu H., Zhang Z., Zhang Y., Fan P., Xi B.D., Tan W.B. Metal type and aggregate microenvironment govern the response sequence of speciation transformation of different heavy metals to microplastics in soil. // *The Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 752. – Art. No. 141956.

53. Zhou Y.F., Liu X.N., Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 392. – Art. No. 122273.

Zou J.Y., Liu X.P., Zhang D.M., Yuan X. Adsorption of three bivalent metals by four chemical distinct microplastics. // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 248. – Art. No. 126064.

## References

1. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. The impact of mining activity on environmental pollution. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. No. 4-2. pp. 8–13. (In Russ.)

2. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. The impact of geodynamic processes on the geocological load of a mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Dzobelova L.V. Development of maps of the territory carcinogenic risk index for Vladikavkaz. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2021.98.22.012. (In Russ.)

4. Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 191–203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w. (In Russ.)

5. 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.)
6. Abbasi S., Moore F., Keshavarzi B., Hopke P.K., Naidu R., Rahman M.M., Oleszczuk P., Karimi J. PET-microplastics as a vector for heavy metals in a simulated plant rhizosphere zone. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 744. Art. No. 140984. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123799.
7. Abdolapur Monikh F., Vijver M.G., Guo Z., Zhang P., Darbha G.K., Peijnenburg W.J.G.M. Metal sorption onto nanoscale plastic debris and trojan horse effects in *Daphnia magna*: Role of dissolved organic matter. *Water Research*. 2020. Vol. 186. Art. No. 116410.
8. Akhbarizadeh R., Moore F., Keshavarzi B., Moeinpour A. Microplastics and potentially toxic elements in coastal sediments of Iran's main oil terminal (Khark Island). *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 220. pp. 720–731.
9. Banaee M., Soltanian S., Sureda A., Gholamhosseini A., Haghi B.N., Akhlaghi M., Derikvandy A. Evaluation of single and combined effects of cadmium and micro-plastic particles on biochemical and immunological parameters of common carp (*Cyprinus carpio*). *Chemosphere*. 2019. Vol. 236. Art. No. 124335.
10. Barboza L.G.A., Vieira L.R., Branco V., Figueiredo N., Carvalho F., Carvalho C., Guilhermino L. Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy-related changes and interact with the bioaccumulation of mercury in the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758). *Aquatic Toxicology*. 2018. Vol. 195. pp. 49–57.
11. Bayo J., Martinez A., Guillen M., Olmos S., Roca M.J., Alcolea A. Microbeads in commercial facial cleansers: threatening the environment. *Clean Soil Air Water*. 2017. Vol. 45. Issue 7. Art. No. 1600683.
12. Bellingeri A., Bergami E., Grassi G., Faleri C., Redondo-Hasselerharm P., Koelmans A.A., Corsi I. Combined effects of nanoplastics and copper on the freshwater alga *Raphidocelis subcapitata*. *Aquatic Toxicology*. 2019. Vol. 210. pp. 179–187.
13. Bradley L., Wijesekara H., Palansooriya K.N., Obadamudalige N., Bolan N.S., Ok Y.S., Rinklebe J., Kim K.-H., Kirkham M.B. Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. *Environment International*. 2019. Vol. 131. Art. No. 104937.
14. Brennecke D., Duarte B., Paiva F., Caçador I., Canning-Clode J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2016. Vol. 178. pp. 189–195.
15. Dey T.K., Uddin M.E., Jamal M. Detection and removal of microplastics in wastewater: evolution and impact. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. Issue 14. pp. 16925–16947.
16. Dong Y.M., Gao M.L., Qiu W.W., Song Z.G. Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 211. Art. No. 111899.
17. Fernandez B., Santos-Echeandía J., Rivera-Hernandez J.R., Garrido S., Albentosa M. Mercury interactions with algal and plastic microparticles: Comparative role as vectors of metals for the mussel, *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 396. Art. No. 122739.
18. Gao D., Li X.Y., Liu H.T. Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil. *The Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 742. Art. No. 140355.
19. Gao F.L., Li J.X., Sun C.J., Zhang L.T., Jiang F.H., Cao W., Zheng L. Study on the capability and characteristics of heavy metals enriched on microplastics in marine environment. *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 144. pp. 61–67.
20. Godoy V., Blazquez G., Calero M., Quesada L., Martin-Lara M.A. The potential of microplastics as carriers of metals. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 255. Art. No. 113363.



21. Godoy V., Martinez-Ferez A., Martin-Lara M., Vellido-Perez J.A., Calero M., Blazquez G. Microplastics as vectors of chromium and lead during dynamic simulation of the human gastrointestinal tract. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 11. Art. No. 4792.
22. Guo X.T., Hu G.L., Fan X.Y., Jia H.Z. Sorption properties of cadmium on microplastics: the common practice experiment and a two-dimensional correlation spectroscopic study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020. Vol. 190. Art. No. 110118.
23. Holmes L.A., Turner A., Thompson R.C. Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions. *Marine Chemistry*. 2014. Vol. 167. pp. 25–32.
24. Huang W., Song B., Liang J., Niu Q.Y., Zeng G.M., Shen M.C., Deng J.Q., Luo Y., Wen X.F., Zhang Y.F. Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: a review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 405. Art. No. 124187.
25. Kern S., Kern C., Pradja M.M., Düring R.-A., Rohnke M. Spatially resolved indiffusion behavior of Cu<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> in polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Vol. 138. Issue 2. Art. No. 49655.
26. Lee W.S., Cho H.J., Kim E., Huh Y.H., Kim H.J., Kim B., Kang T., Lee J.S., Jeong J. Bioaccumulation of polystyrene nanoplastics and their effect on the toxicity of Au ions in zebrafish embryos. *Nanoscale*. 2019. Vol. 11. Issue 7. pp. 3173–3185.
27. Li P., Li Q.C., Hao Z.N., Yu S.J., Liu J.F. Analytical methods and environmental processes of nanoplastics. *Journal of Environmental Sciences*. 2020. Vol. 94. pp. 88–99.
28. Li X.W., Mei Q.Q., Chen L.B., Zhang H.Y., Dong B., Dai X.H., He C.Q., Zhou J. Enhancement in adsorption potential of microplastics in sewage sludge for metal pollutants after the wastewater treatment process. *Water Research*. 2019. Vol. 157. pp. 228–237.
29. Lian J.P., Wu J.N., Zeb A., Zheng S.N., Ma T., Peng F.H., Tang J.C., Liu W.T. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 263. Art. No. 114498.
30. Liao Y.L., Yang J.Y. Microplastic serves as a potential vector for Cr in an in-vitro human digestive model. *The Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 703. Art. No. 134805.
31. Lin L.J., Tang S., Wang X.S., Sun X., Yu A.Q. Hexabromocyclododecane alters malachite green and lead(II) adsorption behaviors onto polystyrene microplastics: interaction mechanism and competitive effect. *Chemosphere*. 2021. Vol. 265. Art. No. 129079.
32. Lin Z., Hu Y.W., Yuan Y.J., Hu B.W., Wang B.L. Comparative analysis of kinetics and mechanisms for Pb(II) sorption onto three kinds of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 208. Art. No. 111451.
33. Lu K., Qiao R.X., An H., Zhang Y. Influence of microplastics on the accumulation and chronic toxic effects of cadmium in zebrafish (*Danio rerio*). *Chemosphere*. 2018. Vol. 202. pp. 514–520.
34. Lu X.M., Lu P.Z., Liu X.P. Fate and abundance of antibiotic resistance genes on microplastics in facility vegetable soil. *The Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 709. Art. No. 136276.
35. Mao R.F., Lang M.F., Yu X.Q., Wu R.R., Yang X.M., Guo X.T. Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. Art. No. 122515.
36. Naqash N., Prakash S., Kapoor D., Singh R. Interaction of freshwater microplastics with biota and heavy metals: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020. Vol. 18. Issue 6. pp. 1813–1824.
37. Othman A.R., Abu Hasan H., Muhamad M.H., Ismail N.I., Abdullah S.R.S. Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2021. Vol. 19. pp. 3057–3073.
38. Purwiyanto A.I.S., Suteja Y., Trisno, Ningrum P.S., Putri W.A.E., Rozirwan, Agustriani F., Fauziyah, Cordova M.R., Koropitan A.F. Concentration and adsorption of Pb and Cu in microplastics: case study in aquatic environment. *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 158. Art. No. 111380.

39. Qiao R.X., Lu K., Deng Y.F., Ren H.Q., Zhang Y. Combined effects of polystyrene microplastics and natural organic matter on the accumulation and toxicity of copper in zebrafish. *The Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 682. pp. 128–137.
40. Sun J.H., Xia S.D., Ning Y., Pan X., Qu J.H., Xu Y.J. Effects of microplastics and attached heavy metals on growth, immunity, and heavy metal accumulation in the yellow seahorse, *Hippocampus kuda* Bleeker. *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 149. Art. No. 110510.
41. Tang S., Lin L.J., Wang X.S., Feng A.X., Yu A.Q. Pb(II) uptake onto nylon microplastics: interaction mechanism and adsorption performance. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 386. Art. No. 121960.
42. Tang S., Lin L.J., Wang X.S., Yu A.Q., Sun X. Interfacial interactions between collected nylon microplastics and three divalent metal ions (Cu(II), Ni(II), Zn(II)) in aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 403. Art. No. 123548.
43. Vedolin M.C., Teophilo C.Y.S., Turra A., Figueira R.C.L. Spatial variability in the concentrations of metals in beached microplastics. *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 129. Issue 2. pp. 487–493.
44. Wakkaf T., Allouche M., Harrath A.H., Mansour L., Alwasel S., Mohamed Thameemul Ansari K.G., Beyrem H., Sellami B., Boufahja F. The individual and combined effects of cadmium, polyvinyl chloride (PVC) microplastics and their polyalkylamines modified forms on meiobenthic features in a microcosm. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. Art. No. 115263.
45. Wang F.Y., Zhang X.Q., Zhang S.Q., Zhang S.W., Sun Y.H. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*. 2020. Vol. 254. Art. No. 126791.
46. Wang L., Gao Y.X., Jiang W., Chen J.X., Chen Y.S., Zhang X.H., Wang G.X. Microplastics with cadmium inhibit the growth of *Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara rather than reduce cadmium toxicity. *Chemosphere*. 2021. Vol. 266. Art. No. 128979.
47. Wang Q.J., Zhang Y., Wangjin X.X., Wang Y.L., Meng G.H., Chen Y.H. The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. *Journal of Environmental Sciences*. 2020. Vol. 87. pp. 272–280.
48. Wen B., Jin S.R., Chen Z.Z., Gao J.Z., Liu Y.N., Liu J.H., Feng X.S. Single and combined effects of microplastics and cadmium on the cadmium accumulation, antioxidant defence and innate immunity of the discus fish (*Symphysodon aequifasciatus*). *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 243. pp. 462–471.
49. Yan W., Hamid N., Deng S., Jia P.P., Pei D.S. Individual and combined toxicogenetic effects of microplastics and heavy metals (Cd, Pb, and Zn) perturb gut microbiota homeostasis and gonadal development in marine medaka (*Oryzias latipes*). *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 397. Art. No. 122795.
50. Yazdani Foshtomi M., Oryan S., Taheri M., Darvish Bastami K., Zahed M.A. Composition and abundance of microplastics in surface sediments and their interaction with sedimentary heavy metals, PAHs and TPH (total petroleum hydrocarbons). *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 149. Art. No. 110655.
51. Yu H., Hou J.H., Dang Q.L., Cui D.Y., Xi B.D., Tan W.B. Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 395. Art. No. 122690.
52. Yu H., Zhang Z., Zhang Y., Fan P., Xi B.D., Tan W.B. Metal type and aggregate microenvironment govern the response sequence of speciation transformation of different heavy metals to microplastics in soil. *The Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 752. Art. No. 141956.
53. Zhou Y.F., Liu X.N., Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 392. Art. No. 122273.
54. Zou J.Y., Liu X.P., Zhang D.M., Yuan X. Adsorption of three bivalent metals by four chemical distinct microplastics. *Chemosphere*. 2020. Vol. 248. Art. No. 126064.

УДК 502.1

DOI: 10.46698/s0256-6501-1732-h

Оригинальная статья

## Современные представления о предмете и задачах геоэкологии

Э.А. Лихачева<sup>1</sup>, И.В. Чеснокова<sup>2</sup>, В.А. Широкова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт географии РАН, Россия, 119017, г. Москва,  
Старомонетный пер., 29;

<sup>2</sup> Институт водных проблем РАН, Россия, 119333, г. Москва,  
ул. Губкина, 3, e-mail: ichesn@rambler.ru;

<sup>3</sup> Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН,  
Россия, 117861, г. Москва, ул. Обручева, 30а

Статья поступила: 12.05.2025, доработана: 11.11.2025, принята к публикации: 13.11.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Современные представления о предмете геоэкологии необходимы для комплексного изучения природных и антропогенных систем и разработки механизмов управления ими. Геоэкология – относительно новая отрасль в науках о Земле, но уже получившая большое разнообразие толкований как научного направления, так и проблем, и задач этого направления. **Цель исследований** заключается не столько в обсуждении существующих определений и терминологий, сколько в попытке объединить разнородные представления в системное научное направление о среде жизни, закономерностях ее формирования, развития, трансформации, а также определить особый круг геолого-географических объектов и задач исследования, их экологических свойств. В статье использованы общенаучные **методы** естественно-исторического анализа и синтеза, а также метод систематизации и классификации. **Результаты.** Авторами предложена структура научного направления относительно молодой науки «Геоэкология», которая в настоящее время является обязательной дисциплиной при подготовке научных и научно-педагогических кадров. В качестве практической реализации проведенной работы предлагается в паспорте научной специальности 1.6.21. «Геоэкология», рассматривать четыре блока исследований: палеогеоэкология, геоэкология природопользования, геоэкология антропосферы и социосферы, экзодинамическая геоэкология.

**Ключевые слова:** геоэкология, геоэкосистема, биолитогенез, антропогенез, антропогенный морфолитогенез, структура исследований, логическая модель.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках тем Государственного задания № FMWZ-2025-0002 ИВГ РАН, № 1022041500043-8-6.3.2. ИИЕТ РАН и № FMWS-2024-0005 ИГ РАН.

**Для цитирования:** Лихачева Э.А., Чеснокова И.В., Широкова В.А. Современные представления о предмете и задачах геоэкологии. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 211–221. DOI: 10.46698/s0256-6501-1732-h

DOI: 10.46698/s0256-6501-1732-h

Original paper

## Modern concepts on the subject and tasks of geoecology

E.A. Likhacheva<sup>1</sup>, I.V. Chesnokova<sup>2</sup>, V.A. Shirokova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russian Federation;

<sup>2</sup> Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina Str., Moscow 119333, Russian Federation, e-mail: ichesn@rambler.ru;

<sup>3</sup> S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, 30a Obrucheva Str., Moscow 117861, Russian Federation

*Received: 12.05.2025, revised: 11.11.2025, accepted: 13.11.2025*

**Abstract: Relevance.** Modern understanding of geoecology is essential for the comprehensive study of natural and anthropogenic systems and the development of mechanisms for their management. Geoecology is a relatively new branch of the Earth sciences, but it has already received a wide variety of interpretations of both its scientific direction and its problems and objectives. **The aim** of this research is not so much a discussion of existing definitions and terminology, but rather an attempt to unite diverse concepts into a systemic scientific direction on the living environment, the patterns of its formation, development, and transformation, as well as to identify a specific range of geological and geographical objects and research objectives, as well as their ecological properties. The article utilizes general scientific **methods** of natural history analysis and synthesis, as well as a method of systematization and classification. **Results.** The authors propose a structure for the relatively young science of "Geoecology", which is currently a mandatory discipline in the training of scientific and teaching personnel. The practical implementation of the conducted work is proposed in the passport of the scientific specialty 1.6.21. "Geoecology", consider four blocks of research: paleoecology, geoecology of nature management, geoecology of the anthroposphere and biosphere, exodynamic geoecology.

**Keywords:** geoecology, geoecosystem, biolithogenesis, anthropogenesis, anthropogenic morpholithogenesis, research structure, logical model.

**Acknowledgments:** This work was carried out within the framework of the State Assignment No. FMWZ-2025-0002 WPI RAS, No. 1022041500043-8-6.3.2. IHST RAS and No. FMWS-2024-0005 IG RAS.

**For citation:** Likhacheva E.A., Chesnokova I.V., Shirokova V.A. Modern concepts on the subject and tasks of geoecology. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 211–221. DOI: 10.46698/s0256-6501-1732-h

### Введение

С середины 1990-х годов активно развивается антропоцентрическое направление в исследованиях природы [Hamidi, 2022]. Наиболее употребительным стало толкование этого понятия как совокупности естественных условий существования человеческого общества [ГЭС ..., 1988]. Рассматриваются природные геосистемы, а также «вторая природа» – преобразованные ландшафты. Возникла, по выражению Сен-Марка [1977], тенденция «социализации природы». Все чаще стала происходить замена понятия «природа» на понятие «окружающая среда» и «среда обитания», где в качестве «хозяина» рассматривается все человечество. Изменяется и смысл понятия «геоэкология» как геолого-географической науки, изучающей



процессы и явления в природной среде и биосфере, возникшие в результате антропогенного воздействия, которая исследует процессы взаимодействия человека и окружающей среды, их экологические, социальные, экономические последствия [ГЭС ..., 1988].

Понятие *геоэкологии* как науки об условиях «живой природы» (биоценоза/биогеоценоза/экосистемы) все чаще сосредотачивает внимание на *человеке*, физико-географических, геологических и социально-экономических особенностях его местообитания. Возникает вопрос о «насыщении» термина – понятия «геоэкология», а точнее о его конкретизации.

Понятия «природа», «географическая оболочка», «окружающая среда», «среда обитания», «природная геосистема», «биосфера», «биогеоценоз», «экосистема» используются как синонимы.

С 1970-х годов начали развиваться научные основы охраны природы и рационального использования природных ресурсов [Трофимов, 2021]. Социализация природы в науках о Земле привела к тому, что она стала рассматриваться не только и не столько как естественная оболочка планеты Земля, в которой есть *жизнь*, а как «арена» – «база», на которой создается антропогенная – *социальная* среда жизни с заданными условиями. По существу, произошло слияние двух направлений – экологии человека и ландшафтной экологии.

## Методы исследования

### *Естественно-исторический анализ термина «геоэкология»*

1866 г. – Э. Геккель в книге «Всеобщая морфология организмов» для обозначения отрасли биологии, которая занималась этими исследованиями, использовал термин «экология». По сути, Геккель понимал под этим термином физиологический механизм взаимоотношений живых организмов с окружающей средой. *Экология* – наука о взаимоотношениях организмов и их сообществ с окружающей средой. Исследуются биоценозы, биосфера, а также экосистемы [ГЭС ..., 1988].

1875 г. – Э. Зюсс: *биосфера* – одна из оболочек (сфер) Земли, состав, структура и энергетика которой обусловлены главным образом деятельностью живых организмов. Живые организмы и среда их обитания тесно взаимосвязаны друг с другом. Они взаимодействуют, образуя динамические системы разных уровней – биомы, биогеоценозы (экосистемы) [ГЭС ..., 1988]. Большой вклад в теорию внес В.И. Вернадский [1967].

1877 г. – К. Мёбиус ввел термин *биоценоз* [Охрана ландшафтов ..., 1982].

1902 г. – Д.А. Анучин для обозначения человечества, понимаемого как целое, планетарное географическое явление, предложил термин *антропосфера* [Анучин, 1949].

1921 г. – З. Парк, Э. Бёрджес: *экология человека* – социальная экология [ГЭС ..., 1988].

1930-е годы – А.А. Григорьев: *географическая оболочка* – «Только в ней есть жизнь». Представление А.А. Григорьева [1936] о географической оболочке сходно с понятием биосфера, но, по мнению М.И. Будыко [Будыко, 1984], более емкое, так как рассматриваются не только геохимические, но и геофизические аспекты динамических процессов, формирующих пространственное разнообразие среды жизни: от биосферы к антропосфере.

1935 г. – А. Тенсли: *экосистема* – природный комплекс, состоящий из совокупности живых организмов и окружающей среды [ГЭС ..., 1988]. Формирование экосистемы тесно связано с историей геологического развития.

1937 г. – К. Тролль: *ландшафтная экология (экология ландшафтов)*. Термин введен, чтобы отразить целесообразность объединения двух подходов – «горизонтального», состоящего в изучении пространственного взаимодействия природных явлений и «вертикального», суть которого в изучении взаимоотношений в рамках экосистемы [Тролль, 1972].

1944 г. – В.И. Сукачев ввел термин *биогеоценоз* в качестве синонима понятия экосистемы, а также заложил основы научного направления – биоценологии [Сукачев, 1949]. Оформление биоценологии как науки совпало с резким подъемом интереса ученых к проблемам взаимодействия человека со средой его обитания.

1963 г. – В.Б. Сочава: *геосистема* – сокращенный вариант термина «географическая система». Родовое понятие – система, совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях между собой и образующих определенную целостность, единство. Термин был введен для того, чтобы подчеркнуть характер сложных географических объектов, целостность, взаимосвязь гетерогенных (неоднородных по составу) элементов [Охрана ландшафтов ..., 1982]: географическая система, географическое образование, состоящее из множества взаимосвязанных и взаимодействующих компонентов географической оболочки; фундаментальная структурная единица географического ландшафта, объединяющая геоморфологические, климатические и гидрологические элементы и экосистемы на определенном участке земной поверхности... любое физико-географическое образование от фации до географической оболочки. Употребляется и в понимании геологической, и геолого-географической, и геоморфологической системы [ГЭС ..., 1988; Лихачева, Тимофеев, 2004; Rajakaruna, Boyd, 2014].

В статье, опубликованной в Известиях АН СССР в 1972 г. К. Тролль: «...На данном этапе развития науки очень важно заполнить пробел между географическими и биологическими исследованиями с помощью междисциплинарных работ» [с. 117]. Термин «ландшафтная экология» [Yu et al., 2019] должен включать в себя два подхода: изучение взаимодействия природных явлений «горизонтально» (собственно науки о ландшафте) и «вертикально» (специфическая биолого-экологическая наука). В.Н. Сукачев в 1964 г. назвал это направление исследований биогеоценологией, «что по-видимому идентично термину «ландшафтная экология». Для того чтобы улучшить взаимопонимание ученых из разных стран, я недавно предложил термин «геоэкология». Термин геоэкология был утвержден ЮНЕСКО в 1966 г. [Тролль, 1972].

1971 г. – предложен термин «территориальная антропоэкосистема» [Гохман и др., 1971]. Центральным элементом системы могут выступать многие характеристики человека – биологические, производственные, этнические и другие. Синонимами выступают – «территориальная демоэкосистема», «территориальная санозэкосистема», а также менее удачные словообразования «антропогеоценоз», «антропо-биоценоз», «биогеоантропоценоз» [Охрана ландшафтов ..., 1982, с. 25-27].

1996 г. – предложено рассматривать город, городскую территорию как экосистему человека или особый тип антропоэкосистемы и геоэкосистемы [Лихачева, Тимофеев, 2004; ЭЭС ..., 1999].

## Результаты и обсуждение

На основе анализа существующих определений (в том числе и наших представлений) геоэкология – раздел наук о Земле – система знаний о законах *взаимодействия* литосферы и биосферы [Снакин, 2000];

– о *пространственно-временных закономерностях* возникновения, формирования, развития сферы жизни – географической оболочки – биосферы [Айбулатов, Артюхин, 1993; ЭЭС ..., 1999];

– наука об *организованности биосферы* [Горшков, 1998].

Геоэкологию часто рассматривают как науку, изучающую комплекс проблем, связанных с *взаимодействием природы и общества* [ГЭС ..., 1988].

Первое ключевое слово в этих определениях – законы. Но эти законы давно известны: закон развития природной системы за счет окружающей ее среды; закон динамического равновесия; закон оптимальности. Это теоретические постулаты для исследований зависимостей в природной системе, которые в том числе обусловлены связями, существующими между физической географией, ландшафтоведением, геологией и экологией: «*Всё связано со всем*» – закон развития природной системы за счет окружающей ее среды (следствие из начал термодинамики) [Природопользование ..., 1990; Лихачева, Тимофеев, 2004].

Второе ключевое слово – взаимодействие. Факт наличия взаимодействия необходимо доказать. Поэтому задачами геоэкологии было определено изучение: законов взаимодействия литосферы и биосферы [Бурдзиева и др., 2024]; структуры и функционирования природных комплексов; необратимых процессов и явлений в природной среде и биосфере, возникающих в результате антропогенного воздействия; механизмов разрушения биосферы.

Третье слово – организованность. Предполагается, что геоэкология исследует взаимосвязи и взаимозависимости компонентов биосферы, обеспечивающие ее существование и развитие. Нами предложен термин организованность геоморфологической системы: свойство, обеспечиваемое совокупностью связей и взаимозависимостей (иерархических, генетических, морфолитологических, морфодинамических), определяющих целостность и сбалансированное развитие геоморфологической системы. Вероятно, по отношению к биосфере, можно понятие организованность несколько расширить. А именно, ... определяющих развитие жизни – жизнетворящих условий и биогеоценоза, в целом.

Активное наполнение термина произошло в 1990-х годах. Но в основном внимание было акцентировано на антропогенном факторе, на изучении свойств, структуры, устойчивости, изменчивости геолого-географических (гидро-, био-, педо-) условий и ресурсов под влиянием техногенеза [Лихачева, Тимофеев, 2004; Поздеев, 2004; Trofimov, 2021; Trofimov et al., 2024].

Изучение ресурсов – это не новый аспект исследования, а акцентирование внимания на той совокупности условий среды, «которые позволяют удовлетворять или делают возможным удовлетворение нужд человека и которые способствуют достижению поставленных обществом целей». Следовательно, это совокупность *условий*, необходимых для: среды обитания всего живого – биосферы; среды жизни людей – антропосферы; среды активного существования и формирования экосистемы человека – социосферы. Эти условия можно назвать *геоэкологическими* (рис. 1).

Формирование геоэкологических условий среды жизни, определяется развитием комплекса геолого-географических процессов, формирующих *геоэкосистему*, то есть условий, необходимых для:

- 1) существования каких-либо определенных форм жизни (биогенез);
- 2) накопления, формирования, возникновения какого-либо нового компонента среды – биолита, который впоследствии определяется как ресурс – полезное ископаемое, необходимое для существования человечества. Но, в то же время и формирования геопатогенных зон, ограничивающих его развитие (биолитогенез);
- 3) существования человечества и формирования антропосферы (антропогенный морфолитогенез: первобытный, агрогенный, урбогенный, техногенный);
- 4) формирования и существования социосферы – «второй природы».

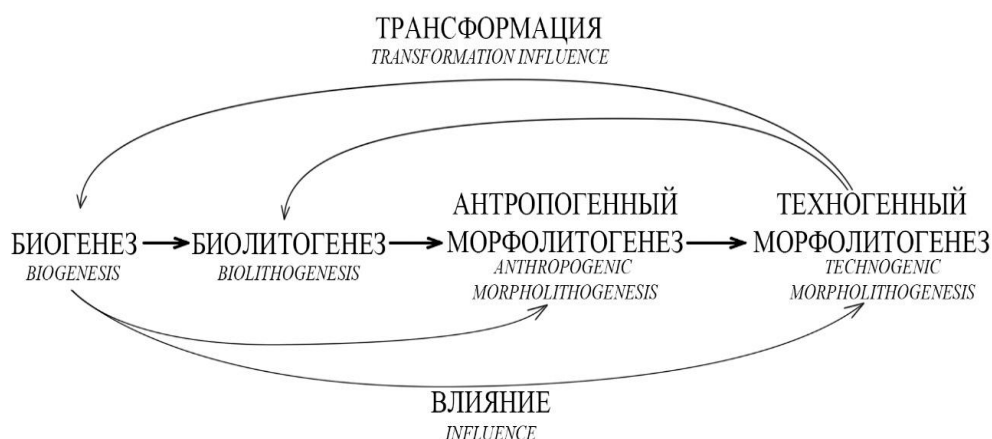


Рис. 1. Формирование геоэкологических условий /  
Fig. 1. Formation of geoeological conditions

Термин «*геоэкосистема*» не получил на наш взгляд определения как предмета исследований геоэкологии, поэтому предлагаем следующее: геолого-географическая система, обладающая свойствами (условиями и ресурсами) для развития жизни биогеоценозов – экосистем. Но, прежде всего, *экосистем человека*: наземные, подземные (которые все чаще осваиваются для жизни людей), водные, маргинальные (пограничные). Жизнетворящие и пагубные особенности функционирования определяют синтез процессов биогенеза, биолитогенеза, антропогенного и техногенного морфолитогенеза.

При формировании антропосферы происходит уничтожение структуры некоторых процессов саморазвития и самоочищения, и возникают новые, по аналогии с природными, условия. Возникающие «новоделы» хотя и созданы по образцу и подобию природным, представляют другое геоэкологическое образование, другую форму существования, которая требует изучения. И, в частности, это городские (урбанизированные) территории с их полномасштабными процессами урбогенного морфолитогенеза [Gomez-Marquez, 2025].

Этот блок исследований тесно связан с экономической и социальной географией и разработкой прогнозов развития территорий в связи с изменением климата, численности населения и приоритетов социально-экономического развития. Существует понятие «территориальная антропоэкосистема» [Гохман и др., 1971], которое наиболее широко используется при изучении пространственно выраженных



связей между здоровьем [Grishchenko et al., 2023] человека, состоянием и качеством окружающей его среды. Оно весьма существенно с позиций охраны и улучшения окружающей человека среды – геоэкосистемы [Охрана ландшафтов ..., 1982].

Общая логическая модель формирования и функционирования среды жизни людей представлена на рисунке 2.

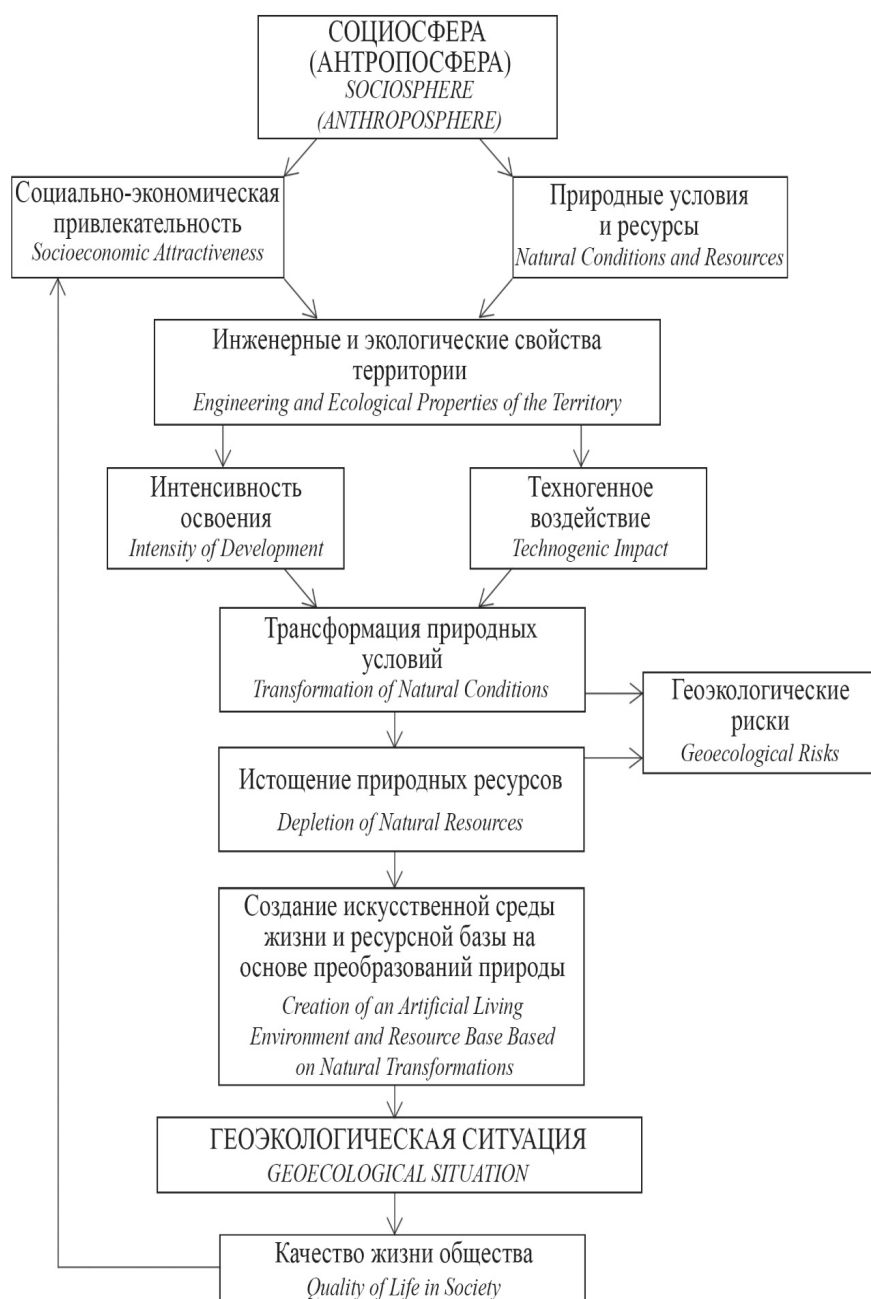


Рис. 2. Логическая модель формирования и функционирования среды жизни людей /  
Fig. 2. Logical model of the formation and functioning of the environment of people living

Геоэкология – наука междисциплинарная, так как рассматриваются экологические свойства ландшафта: геологические, геоморфологические, гидро-климатические, почвенно-ботанические условия для развития жизни. Связь геоэкологии с другими науками проиллюстрирована на рисунке 3.



Рис. 3. Схема соотношения геоэкологии с другими научными направлениями /  
Fig. 3. Scheme of the relationship between geoeology and other scientific fields

Геоэкология синтезирует теоретические и практические знания географии, биологии, геологии, на которых параллельно и во взаимосвязи развивается научное направление природопользование [Природопользование ..., 2014; Baryshev et al., 2019; Лихачева, Чеснокова, 2024]. Однако, если главной целью природопользования является исследование воздействия человеческого общества на среду жизни, т.е. антропогенный морфолитогенез, то геоэкология сосредотачивает свое внимание на формировании и развитии среды жизни или по А.А. Григорьеву географической оболочки. При этом в сферу исследований геоэкологии входят и биогеоценоз, и биолитогенез, и антропогенный морфолитогенез как ведущие процессы формирования геоэкосистемы.

### Выводы

Таким образом, можно выделить как минимум четыре блока исследований геоэкологии.

I – Палеогеоэкология – история развития и формирования среды жизни. Исследования, основанные на анализе и синтезе данных о формировании среды жизни – биосферы – в геологическом прошлом.

II – геофизика и геохимия биотехносферы. В основе исследований лежат данные о свойствах, составе и особенностях развития компонентов среды жизни. Для решения задач необходимы разработки структуры мониторинга, в том числе использование уже существующих данных в других отраслях науки.

III – Геоэкология природопользования или землепользования. На основе исторических данных, картографических материалов о преобразованиях, эксплуатации земельных, лесных, водных ресурсов разрабатываются методы их использования с пользой и выгодой для человечества и наименьшим ущербом для природы. Этот блок исследований тесно сотрудничает с природопользованием. Отличие – акцент на особенности функционирования *геоэкосистемы*. В этом блоке уже развивается региональный геоэкологический анализ. В структуру землепользования входят

процессы рекультивации и санитарно-гигиенические мероприятия – способы восстановления и нейтрализации негативного влияния техногенеза на геоэкосистему.

IV – Геоэкология антропоферы и социосферы – антропогеоэкология. У этого блока исследований есть один аспект, который ранее не рассматривался (или почти не рассматривался) – трансформация необходимых для существования людей компонентов среды и трансформация организма человека. Это скорее медицинский аспект антропогеоэкологии, который вяло развивается в рамках медицинской географии. Но, очевидно, что подобные исследования необходимо проводить и тогда можно будет ожидать прорыва в решении задачи «природа здоровья человека».

Таким образом, геоэкология – наука, изучающая сферу жизни, закономерности ее формирования, развития, трансформации, составляющие ее биогеоценозы, в том числе и в историческом (геолого-географическом) аспекте. А также наука о формировании и трансформации условий и ресурсов, необходимых для существования антропоферы и социосферы.

Предлагаемая нами структура научного направления может быть учтена и в паспорте научной специальности ВАК 1.6.21 «Геоэкология» в группе научных специальностей 1.6. «Науки о Земле и окружающей среде», и в учебных курсах, так как при всей её (структуры) ёмкости, остается простор для развития этой довольно молодой науки. И, в частности, развития новых технологий как в сфере эксплуатации и использования природных ресурсов, так и разработки новых технологий строительства, переработки отходов, приготовления и изобретения продуктов питания (как для людей, так и животных) и многое другое. И тогда более системно, как того и хотел основатель данного направления К. Тролль, «...будут развиваться комплексные исследования Земли и жизни на ней».

## Литература

1. Айбулатов Н.А., Артюхин Ю.В. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана. – СПб: Гидрометеиздат, 1993. – 304 с.
2. Анучин Д.Н. Избранные географические работы. / Под ред. Л.С. Берга. – М.: Гос. изд-во географической литературы, 1949. – 388 с.
3. Будыко М.И. Географическая оболочка и жизнь. // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. – 1984. – № 2. – С. 13–23.
4. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.
5. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. – 376 с.
6. Горшков С.П. Концептуальные основы геоэкологии: учебное пособие. Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного университета, 1998. – 448 с.
7. Гохман В.М., Минц А.А., Преображенский В.С. Системный подход в географии. // Вопросы географии. – 1971. – № 88. – С. 65–75.
8. Григорьев А.А. О некоторых взаимоотношениях основных элементов физико-географической среды и их эволюции. // Проблемы физической географии. – 1936. – Вып. 3. – С. 3.
9. ГЭС – географический энциклопедический словарь. Понятия и термины. / Гл. редактор А.Ф. Трёшников. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 432 с.
10. Лихачева Э.А., Тимофеев Д.А. Экологическая геоморфология: словарь-справочник. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2004. – 240 с.
11. Лихачева Э.А., Чеснокова И.В. Геоэкология: Развитие теоретических основ. // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии. Минск: БГУ, 2024. – С. 127–131.

12. Охрана ландшафтов. Толковый словарь. / Ред. Т.А. Ольсевич. – М.: Прогресс, 1982. – 272 с.
13. Поздеев В.Б. Становление и современное состояние геоэкологии. Смоленск: Маджента, – 2004. 324 с.
14. Природопользование в территориальном развитии современной России. / Под ред. И.Н. Волковой, Н.Н. Ключева. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2014. – 360 с.
15. Природопользование: словарь-справочник / Н.Ф. Реймерс. – М.: Мысль, 1990. – 639 с.
16. Сен-Марк Ф. Социализация природы. М.: Прогресс, 1977. – 435 с.
17. Снакин В.В. Экология и охрана природы. Словарь-справочник. / Ред. акад. А.Л. Яншин. – М.: Academia, 2000. – 384 с.
18. Сукачев В.Н. О соотношении понятий географический ландшафт и биогеоценоз. // Вопросы географии. – 1949. – № 16. – С. 45–60.
19. Тролль К. Ландшафтная экология (геоэкология) и биоценология. Терминологическое исследование. // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. – 1972. – № 3. С. 114–120.
20. ЭЭС – экологический энциклопедический словарь. / Отв. ред. В.И. Данилов-Данильян. – М.: Ноосфера, 1999. – 930 с.
21. Baryshev E., Shmakova K., Yakshina N. Types of geoecological research and areas of their application. // In: IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 572. No. 1. – Art. No. 012090. DOI: 10.1088/1757-899X/572/1/012090.
22. Gomez-Marquez J. The anthropogenic factor as a driver of ecosystem changes. // Anthropocene Science. – 2025. – Vol. 4. – pp. 59–65.
23. Grishchenko M.Y., Fazleeva N.M., Shartova N.V., Titova M.G. Satellite images interpretation for health studies of urban areas. // Geography, Environment, Sustainability. – 2023. – Vol. 16. Issue 3. – pp. 6–13.
24. Hamidi H.A Comprehensive exploration of Earth's systems: geography, ecology, and environmental dynamics. // Social Science Chronicle. – 2022. – Vol. 2. Issue 1. – pp. 1–21.
25. Rajakaruna N., Boyd R.S. Geoecology. 2014. Oxford Bibliographies in Ecology. 67 p. DOI: 10.1093/OBO/9780199830060-0125.
26. Trofimov V.T. The theoretical grounds of geoecology as an interdisciplinary science based on the concept of ecological functions of the Earth's abiotic spheres. // Moscow University Geology Bulletin. – 2021. – Vol. 76. – pp. 589–599.
27. Trofimov V.T., Korolev V.A., Kharkina M.A. ecological functions as fundamental integral characteristics of peculiarities of abiotic environments of ecosystem: lithosphere, pedosphere, atmosphere, and hydrosphere. // Moscow University Geology Bulletin. – 2024. – Vol. 79. – pp. 467–476.
28. Yu H., Liu X., Bo Kong, Li R., Landscape ecology development supported by geospatial technologies: A review. // Ecological Informatics. – 2019. – Vol. 51. – pp. 185–192.

## References

1. Aibulatov N.A. Artyukhin Yu.V. Geoecology of the shelf and coasts of the World Ocean. Saint Petersburg. Gidrometeoizdat. 1993. 304 p. (In Russ.)
2. Anuchin D.N. Selected geographical papers. Ed. L.S. Berg. Moscow. State Publishing House of Geographical Literature. 1949. 388 p. (In Russ.)
3. Budyko M.I. Geographical Shell and Life. Izvestiya Akademii Nauk USSR. Seriya Geograficheskaya. 1984. No. 2. pp. 13–23. (In Russ.)
4. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoecological load of a mountainous region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)
5. Vernadsky V.I. Biosphere. Moscow. Mysl. 1967. 376 p. (In Russ.)



6. Gorshkov S.P. Conceptual foundations of geoecology: textbook. Smolensk. Publishing house of Smolensk Humanitarian University. 1998. 448 p. (In Russ.)
7. Gokhman V.M., Mintz A.A., Preobrazhensky V.S. Systems approach in geography. Problems of Geography. 1971. No. 88. pp. 65–75. (In Russ.)
8. Grigoriev A.A. On some relationships between the main elements of the physical-geographical environment and their evolution. Problems of Physical Geography. 1936. Issue 3. p. 3. (In Russ.)
9. GED – geographical encyclopedic dictionary. Concepts and terms. Ed. A.F. Treshnikov. Moscow. Soviet Encyclopedia. 1988. 432 p. (In Russ.)
10. Likhacheva E.A., Timofeev D.A. Ecological Geomorphology: reference dictionary. Moscow. Media-PRESS. 2004. 240 p. (In Russ.)
11. Likhacheva E.A., Chesnokova I.V. Geoecology: Development of theoretical foundations. Modern Problems of Landscape Science and Geoecology. Minsk. BSU. 2024. pp. 127–131. (In Russ.)
12. Landscape Protection. Explanatory dictionary. Ed. T.A. Olsevich. Moscow. Progress. 1982. 272 p. (In Russ.)
13. Pozdeev V.B. Formation and current state of geoecology. Smolensk. Magenta. 2004. 324 p. (In Russ.)
14. Environmental management in the territorial development of modern Russia. Eds. I.N. Volkova, N.N. Klyuev. Moscow. Media-PRESS. 2014. 360 p. (In Russ.)
15. Environmental management: reference dictionary. Ed. N.F. Reimers. Moscow. Mysl. 1990. 639 p. (In Russ.)
16. Saint-Marc F. Socialization of nature. Moscow. Progress. 1977. 435 p. (In Russ.)
17. Snakin V.V. Ecology and nature conservation. Reference dictionary. Ed. academician A.L. Yanshin. Moscow. Academia. 2000. 384 p. (In Russ.)
18. Sukachev V.N. On the relationship between geographical landscape and biogeocenosis. Problems of Geography. 1949. No. 16. pp. 45–60. (In Russ.)
19. Troll K. Landscape ecology (geoecology) and biocenology. Terminological study. Izvestiya Akademii Nauk USSR. Seriya Geograficheskaya. 1972. No. 3. pp. 114–120. (In Russ.)
20. EED – ecological encyclopedic dictionary. Ed. V.I. Danilov-Danilyan. Moscow. Noosphere. 1999. 930 p. (In Russ.)
21. Baryshev E., Shmakova K., Yakshina N. Types of geoecological research and areas of their application. In: IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 572. No. 1. Art. No. 012090. DOI: 10.1088/1757-899X/572/1/012090.
22. Gomez-Marquez J. The anthropogenic factor as a driver of ecosystem changes. Anthropocene Science. 2025. Vol. 4. pp. 59–65.
23. Grishchenko M.Y., Fazleeva N.M., Shartova N.V., Titova M.G. Satellite images interpretation for health studies of urban areas. Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. Issue 3. pp. 6–13.
24. Hamidi H.A. Comprehensive exploration of Earth's systems: geography, ecology, and environmental dynamics. Social Science Chronicle. 2022. Vol. 2. Issue 1. pp. 1–21.
25. Rajakaruna N., Boyd R.S. Geoecology. 2014. Oxford Bibliographies in Ecology. 67 p. DOI: 10.1093/OBO/9780199830060-0125.
26. Trofimov V.T. The theoretical grounds of geoecology as an interdisciplinary science based on the concept of ecological functions of the Earth's abiotic spheres. Moscow University Geology Bulletin. 2021. Vol. 76. pp. 589–599.
27. Trofimov V.T., Korolev V.A., Kharkina M.A. ecological functions as fundamental integral characteristics of peculiarities of abiotic environments of ecosystem: lithosphere, pedosphere, atmosphere, and hydrosphere. Moscow University Geology Bulletin. 2024. Vol. 79. pp. 467–476.
28. Yu H., Liu X., Bo Kong, Li R., Landscape ecology development supported by geospatial technologies: A review. Ecological Informatics. 2019. Vol. 51. pp. 185–192.

УДК 556.54:551.48

DOI: 10.46698/n5011-3335-3252-f

Оригинальная статья

## Микроэлементный состав устьевых зон малых и средних рек северо-восточной части Чёрного моря

Ю.А. Моисеева<sup>✉</sup>, Т.К. Поливанова<sup>✉</sup>, Д.В. Пургина<sup>✉</sup>

Научно-технологический университет «Сириус», Россия, 354340,  
федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр., 1,  
e-mail: jamoiseeva@mail.ru

Статья поступила: 25.07.2025, доработана: 20.11.2025, принята к публикации: 24.11.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Микроэлементный состав рек и устьевых зон играет ключевую роль в понимании природных геохимических процессов и оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы. Это делает устьевые области критически важными объектами изучения миграции элементов, в том числе загрязняющих веществ и их поступления в морскую среду. **Целью исследования** является выявление характерных особенностей микроэлементного состава в устьевых зонах средних и малых рек северо-восточной части Чёрного моря. **Методы исследования.** Пробы речных и прибрежных морских вод были отобраны в начале ноября в сезон осенне-зимних паводков в устьевых зонах рр. Сочи, Мацеста, Хоста, Кудепста и Мзымта. Все пробы воды предварительно были отфильтрованы через мембранный фильтр 0,45 мкм. Определение микроэлементного состава вод выполнялось масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Определение гидрохимических характеристик pH, TDS и T° выполнялось с помощью портативных датчиков, а также в лабораторных условиях было выполнено определение pH по методике производителя и общей щелочности потенциометрическим методом прямого титрования. **Результаты исследования.** Выявлены аномально высокие значения общей щелочности (до 4,5 мг-экв/л) в р. Кудепста, а для речных вод Мзымты, наоборот, минимальные значения, что обусловлено геологическими особенностями их водосборных территорий. Наибольшие концентрации основного спектра микроэлементов, выявленные в р. Мацеста, в частности ртуть и йод, концентрации которых в других реках ниже предела обнаружения, связаны с гидрогеологическими особенностями бассейна р. Мацеста. Для всех исследуемых рек в переходной зоне река-море выявлен неконсервативный тип поведения для микроэлементов, концентрации которых выше в речных водах, чем в морских. При этом для таких элементов как Fe, Al, Ni динамика этого снижения происходит на 70–90 % уже при минерализации 4 г/л, а для Mn, Cu, Zn на 30–50 % при минерализации до 10 г/л.

**Ключевые слова:** устьевые области рек, Чёрное море, химический состав вод, микроэлементы, редкоземельные элементы.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

**Для цитирования:** Моисеева Ю.А., Поливанова Т.К., Пургина Д.В. Микроэлементный состав устьевых зон малых и средних рек северо-восточной части Чёрного моря. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 222–234. DOI: 10.46698/n5011-3335-3252-f

DOI: 10.46698/n5011-3335-3252-f

Original paper

## Trace element distribution in the estuaries of minor and intermediate rivers of the North-Eastern part of the Black Sea

Yu.A. Moiseeva<sup>ORCID</sup>, T.K. Polivanova<sup>ORCID</sup>, D.V. Purgina<sup>ORCID</sup>

Sirius University of Science and Technology, Federal territory "Sirius",  
1 Olympic Pr., 354340, Russian Federation, e-mail: jamoiseeva@mail.ru

Received: 25.07.2025, revised: 20.11.2025, accepted: 24.11.2025

**Abstract: Relevance.** The trace element composition of rivers and estuary zones plays a key role in understanding natural geochemical processes and in assessing anthropogenic impact on aquatic ecosystems. This makes estuaries critically important for objects for studying the migration of elements, including pollutants and their entry into the marine environment. **The aim** of the study is to identify characteristic features of the trace element composition in the estuary zones of medium and small rivers of the Black Sea coast of Russia. **Materials and methods.** Samples of river and coastal seawaters were collected in early November during the autumn-winter flood season in the estuary zones of the Sochi, Matsesta, Khosta, Kudepsta and Mzymta rivers. All water samples were pre-filtered through a 0.45 µm membrane filter. The microelement composition of waters was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The hydrochemical characteristics of pH, TDS and T° were determined using portable sensors, and pH was determined in laboratory conditions according to the manufacturer's method using three buffer solutions and total alkalinity using the potentiometric direct titration method. **Results.** The Kudepsta River exhibited abnormally high total alkalinity (up to 4.5 mg-eq/L), whereas the Mzymta River had the lowest levels – a difference linked to the geological characteristics of their watersheds. The highest concentrations of the main spectrum of microelements revealed in the Matsesta River, in particular mercury and iodine, the concentrations of which in other rivers are below the detection limit, are associated with the hydrogeological features of the Matsesta River basin. For all the studied rivers in the river-sea transition zone, a non-conservative type of behavior was revealed for microelements, the concentrations of which are higher in river waters than in sea waters. Moreover, for elements such as Fe, Al, Ni, their concentrations decreased by 70–90 % already at mineralization of 4 g/l, while for Mn, Cu, and Zn, the decrease was 30–50 % at salinities up to 10 g/L.

**Keywords:** river mouth areas, Black Sea, chemical composition of waters, trace elements, rare earth elements.

**Acknowledgements:** The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

**For citation:** Moiseeva Yu.A., Polivanova T.K., Purgina D.V. Trace element distribution in the estuaries of minor and intermediate rivers of the North-Eastern part of the Black Sea. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 222–234. DOI: 10.46698/n5011-3335-3252-f

### Введение

Трансформация химического состава речных вод в устьевых зонах играет ключевую роль в биогеохимических циклах, определяя перенос и распределение веществ в системе «река-море», в формировании качества прибрежных вод, а также в поддержании продуктивности морских экосистем, связанной с поступлением биогенных элементов и микроэлементов [Гордеев, 2012; Маккавеев, Завьялов, 2018; Гордеев, 2018].

Эти процессы напрямую связаны с ключевой ролью рек как индикаторов состояния окружающей среды. Реки, дренирующие обширные территории, служат интегральным показателем биогеохимического состояния своих бассейнов (Джаошвили, технический отчёт, 2002) [Литвиненко, Захарихина, 2022; Лесникова, 2023; Реутова и др., 2021]. Величина и химический состав стока отражают изменения гидрометеорологических условий и антропогенной нагрузки, а в устьевых областях происходит осаждение переносимых веществ, включая загрязняющие соединения [Гордеев, 2012; Harmesa et al., 2022; Ozseker et al., 2022].

Проблема загрязнения речных и морских вод с каждым годом приобретает все большую актуальность [Гордеев и др., 2015; Ozseker et al., 2022; Liu et al., 2023; Trinh et al., 2024]. Особенно остро данная проблема стоит для прибрежных морских вод в курортных зонах Причерноморья. Основными из возможных источников загрязнения вод Черного моря являются: прямой сброс неочищенных сточных вод из населенных пунктов, дождевой смыв с земной поверхности токсикантов в реки, которые в дальнейшем выносят все загрязняющие вещества в море, а также загрязнение прибрежных вод отходами производства и потребления.

Исследуемые реки относятся к Черноморскому бассейну, для которых характерно смешанное питание с преобладанием дождевого, за исключением р. Мзымта, в которой преобладает ледниковое и снеговое питание. Все реки претерпевают высокую рекреационную нагрузку, а также имеют локальные загрязнения от сбросов сточных вод и транспортной инфраструктуры вблизи устьевых участков. Стоит отметить, что р. Сочи протекает через центральную часть г. Сочи и её русло укреплено бетонными плитами, что препятствует разбавлению подземным стоком и способствует накоплению загрязняющих веществ. Отличительной особенностью р. Мацеста является то, что в её водосборе распространены минеральные сероводородные источники, в результате чего её состав отличен от других исследуемых рек.

Несмотря на достаточное количество исследований поверхностных вод черноморского побережья [Kostyleva et al., 2011; Маккавеев и др., 2013; Завьялов, 2014; Гордеев и др., 2015; Костылева, 2015; Часовников и др., 2016; Miladinova et al., 2020; Савенко, Покровский, 2022; Ozseker et al., 2022], вопрос о реальных концентрациях микроэлементов в речных водах Черноморского бассейна остаётся не до конца изученным и требует уточнений. Имеются отдельные исследования микроэлементного состава вод р. Мзымта [Литвиненко, Захарихина, 2022] и фрагментарные сведения для устьевых зон рр. Сочи, Кудепста и Мзымта [Гордеев и др., 2015; Гордеев, 2018]. Исключением является работа [Савенко, Покровский, 2022], в которой для устьевых зон рр. Кудепста и Мзымта приводится полный микрокомпонентный состав за май 2011 г. Все опубликованные данные по устьевым областям охватывают период до 2014 года в разные сезоны года. Поэтому проведение такого рода исследований приобретает особую актуальность в настоящее время, учитывая, что микроэлементный состав рек и устьевых зон играет ключевую роль в понимании природных геохимических процессов и оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы [Савенко, Покровский 2022; Ozseker et al., 2022; Harmesa et al., 2022]. Распределение металлов (Fe, Mn, Cu, Zn и др.) в поверхностных водах отражает взаимодействие множества факторов, включая выветривание горных пород, гидродинамику речного бассейна, биогеохимические циклы и влияние человеческой деятельности [Trinh et al., 2024]. Это делает устьевые области рек критически важными объектами изучения миграции элементов в морскую среду.



Таким образом, изучение поведения микроэлементов и особенностей их трансформации является важной составляющей комплексных исследований процессов формирования химического состава природных вод, а также ключевым инструментом экологического мониторинга, позволяющего оценить как естественную изменчивость, так и последствия хозяйственной деятельности.

Цель настоящей работы состояла в установлении общих черт и различий распределения растворенных форм микроэлементов в устьях средних и малых рек Северо-Восточной части Чёрного моря.

### Материалы и методы

Изучение микроэлементного состава вод устьевых областей рек Мзымта, Хоста, Кудепста, Мацеста, Сочи и прибрежных вод было выполнено на материалах, полученных в ходе единоразового отбора проб поверхностных вод в начале ноября 2024 года в сезон осенне-зимних паводков (рис. 1). Были отобраны пробы речных вод на расстоянии 0,7–1 км от устья рр. Сочи, Кудепста и Мзымта и на 0,2 км рр. Хоста и Мацеста, в зоне смешения речных и морских вод и морских прибрежных вод на расстоянии 10 и 200 м от устья.

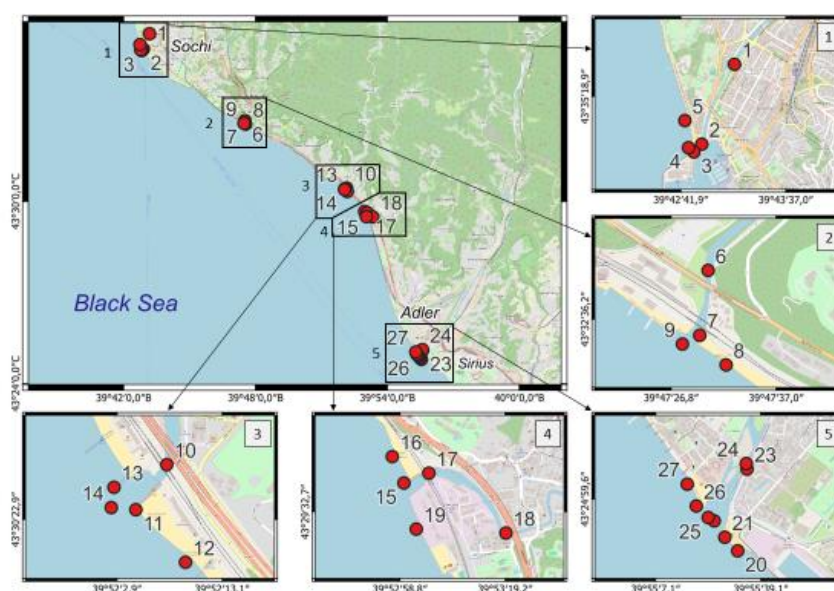


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб устьевых областей рек Северо-восточной части Чёрного моря: 1 – р. Сочи, 2 – р. Мацеста, 3 – р. Хоста, 4 – р. Кудепста, 5 – р. Мзымта /

Fig. 1. Location map of sampling points in river mouth areas of the Greater Sochi Region: 1 – Sochi River; 2 – Matsesta River; 3 – Khosta River; 4 – Kudepsta River; 5 – Mzymta River

Пробы отбирались в 50 мл пробирки для определения микроэлементного состава. Все пробы воды предварительно были отфильтрованы через мембранный фильтр 0,45 мкм. Определение микроэлементного состава вод выполнялось масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Определение общей щелочности (Alk) проводилось в стационарной лаборатории при 20°C с контролем температуры потенциометрическим методом прямого титрования [Dickson et al., 2007].

Измерения *In situ* pH выполнялись полевым pH-метром HM Digital PH-200, а также дополнительно в стационарной лаборатории на pH-метре Metrohm 913 по

методике производителя с применением трех буферных растворов 4,01, 7,00 и 10,01. На месте также определялись Eh, TDS и T° с помощью портативных влагозащищенных pH/EC/TDS-метра HI991300 и ОВП-метра HM Digital ORP-200.

## Результаты и обсуждение

### *Гидрохимические параметры*

В результате анализа гидрохимических характеристик для рр. Мзымта и Сочи был установлен рост значений общей щелочности и pH при переходе от речных вод к морским. В устьевых зонах рр. Хоста и Мацеста показатели щелочности демонстрируют относительную стабильность, варьируясь в узких пределах. Отдельно стоит выделить р. Кудепста, где зафиксированы максимальные значения щелочности (до 4,5 мг-экв/л), которые снижаются при смешении речных вод с морскими и минимальные значения среди всех исследованных водотоков для устьевого участка р. Мзымта (табл. 1). Аномально высокие значения щелочности в р. Кудепста связаны с геологическими особенностями строения водосбора реки с активно-развивающимися процессами карстообразования в её верхнем течении. В результате вода, обогащенная  $\text{HCO}_3^-$  из карстовых полостей с дождевыми паводками, поступает в реку, смещая карбонатное равновесие. Низкие значения величины общей щелочности в р. Мзымта, объясняются её ледниковым питанием, отличительной геологией водосбора, сложенным преимущественно магматическими и метаморфическими породами (в верхнем и среднем течении), в том числе её притоков горных рек. Полученные данные подтверждаются результатами ранее опубликованных работ [Kostyleva et al., 2011; Завьялов и др., 2014; Костылева, 2015; Маккавеев и др., 2013].

*Таблица 1 / Table 1*

**Гидрохимические параметры вод устьевых зон малых и средних рек  
Северо-восточной части Чёрного моря /  
Hydrochemical parameters of waters in river mouth areas of the**

|                            | Устьевые области рек / River mouth areas |                           |                       |                            |                        |
|----------------------------|------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|
|                            | р. Сочи<br>Sochi R.                      | р. Мацеста<br>Matsesta R. | р. Хоста<br>Khosta R. | р. Кудепста<br>Kudepsta R. | р. Мзымта<br>Mzymta R. |
| 0,1–3,9 г/л / g/L          |                                          |                           |                       |                            |                        |
| pH                         | 8,08±0,11                                | 8,17±0,05                 | 8,17±0,01             | 8,04±0,05                  | 8,14±0,06              |
| Alk, мг-экв/л /<br>mg-eq/L | 2,22±0,03                                | 3,66±0,01                 | 3,13±0,02             | 4,28±0,22                  | 1,69±0,09              |
| 4–18,8 г/л / g/L           |                                          |                           |                       |                            |                        |
| pH                         | 8,25±0,01                                | 8,33±0,01                 | 8,27±0,03             | 8,26±0,04                  | 8,32±0,04              |
| Alk, мг-экв/л /<br>mg-eq/L | 3,29±0,07                                | 3,43±0,01                 | 3,34±0,03             | 3,55±0,11                  | 3,07±0,45              |

### *Микроэлементный состав*

Анализ микроэлементного состава поверхностных вод устьевых зон рр. Мзымта, Кудепста, Хоста, Мацеста и Сочи показал, что наибольшие концентрации практически всех микроэлементов характерны для реки Мацеста (табл. 2, рис. 2 (а-в)). Стоит отметить, что концентрация железа здесь в два раза выше, чем в других устьях рек, а также в водах реки Мацесты присутствует йод (130,8 мкг/л) и ртуть (6 нг/л), на фоне других рек, где концентрации этих элементов находятся ниже предела обнаружения. Неоднородный микроэлементный состав с аномально высокими концентрациями отдельных элементов в р. Мацеста по сравнению с другими водо-

токами региона обусловлен гидрогеологическими особенностями строения бассейна с характерным распространением подземных термальных вод сульфидного типа, зоной разгрузки которых является р. Мацеста. Как известно, в сероводородных водах ртуть образует устойчивые комплексы (например,  $\text{HgS}_2^{2-}$ ), что повышает её миграционную способность [Dyrssen, Wedborg, 1991]. При выходе вод на поверхность возможна сорбция Hg на Fe-оксиды или осаждение в виде киновари ( $\text{HgS}$ ) [Slowey, Brown, 2007], но в Мацесте она может оставаться в растворе благодаря высокому содержанию  $\text{H}_2\text{S}$ . Что касается йода, то он хорошо растворим в восстановительных условиях (например, в присутствии  $\text{H}_2\text{S}$ ) [Muramatsu, Wedepohl, 1998], что характерно для Мацесты.

В таблице 2 средние концентрации микроэлементов представлены в двух диапазонах минерализации: 0,1–3,9 г/л – речные воды до зоны смешения и 4,0–18,8 г/л – морские воды от зоны смешения.

Таблица 2 / Table 2

**Средние концентрации Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn (мкг/дм<sup>3</sup>) в устьевых зонах малых и средних рек Северо-восточной части Чёрного моря / Average concentrations of Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn (μg/dm<sup>3</sup>) in the estuary zones of small and medium-sized rivers of the North-Eastern Black Sea**

|                   | Устьевые области рек / River mouth areas |                             |                           |                            |                         |
|-------------------|------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
|                   | р. Сочи / Sochi R.                       | р. Мацеста / Matsesta R.    | р. Хоста / Khosta R.      | р. Кудепста / Kudepsta R.  | р. Мзымта / Mzymta R.   |
| 0,1–3,9 г/л / g/L |                                          |                             |                           |                            |                         |
| Al                | <u>2,6–7,9</u><br>5,6                    | <u>2,9–8,1</u><br>4,8       | <u>1,6–7,4</u><br>4,5     | <u>1,2–3,4</u><br>2,3      | <u>1,1–3,8</u><br>2,9   |
| Mn                | <u>1,2–4,1</u><br>2,4                    | <u>13,8–17,0</u><br>15,8    | <u>0,1–3,4</u><br>1,8     | <u>16,6–19,6</u><br>18,1   | <u>2,7–4,8</u><br>3,6   |
| Fe                | <u>106,7–118,9</u><br>111,8              | <u>213,1–247,1</u><br>229,8 | <u>31,7–158,7</u><br>95,2 | <u>33,2–197,8</u><br>115,5 | <u>4,3–66,3</u><br>49,9 |
| Ni                | <u>1,5–1,6</u><br>1,5                    | <u>3,1–3,4</u><br>3,2       | <u>2,3–2,5</u><br>2,4     | <u>1,7–3,0</u><br>2,4      | <u>0,4–1,0</u><br>0,8   |
| Cu                | <u>0,4–0,6</u><br>0,5                    | <u>0,5–1,6</u><br>0,9       | <u>0,2–0,7</u><br>0,4     | <u>0,8–1,0</u><br>0,9      | <u>0,1–0,4</u><br>0,3   |
| Zn                | <u>0,7–3,3</u><br>1,7                    | <u>2,4–4,4</u><br>3,2       | <u>1,6–1,7</u><br>1,7     | <u>1,5–2,8</u><br>2,1      | <u>0,3–1,0</u><br>0,6   |
| 4–18,8 г/л / g/L  |                                          |                             |                           |                            |                         |
| Al                | <u>0,4–0,7</u><br>0,5                    | 0,3*                        | <u>0,5–0,7</u><br>0,6     | <u>0,4–0,6</u><br>0,5      | <u>0,3–0,8</u><br>0,5   |
| Mn                | <u>0,3–1,0</u><br>0,6                    | 6,7*                        | <u>0,2–0,9</u><br>0,5     | <u>0,8–2,3</u><br>1,5      | <u>2,3–2,7</u><br>2,6   |
| Fe                | <u>5,7–7,2</u><br>6,5                    | 3,6*                        | <u>4,1–4,7</u><br>4,5     | <u>2,3–3,9</u><br>3,1      | <u>2,4–2,7</u><br>2,5   |
| Ni                | <u>0,5–0,6</u><br>0,6                    | 0,4*                        | <u>0,4–0,8</u><br>0,7     | <u>0,5–0,5</u><br>0,6      | <u>0,3–0,4</u><br>0,4   |
| Cu                | <u>0,3–0,3</u><br>0,3                    | 0,5*                        | <u>0,4–0,6</u><br>0,5     | <u>0,1–0,2</u><br>0,2      | <u>0,1–0,1</u><br>0,1   |
| Zn                | <u>0,9–1,9</u><br>1,4                    | 0,7*                        | <u>1,0–1,1</u><br>1,1     | <u>1,1–1,6</u><br>1,3      | <u>0,4–1,1</u><br>0,6   |

*Примечание:* в числителе мин.–макс., в знаменателе среднее; \* – для р. Мацеста с минерализацией выше 4 г/л концентрации были получены с одной точки / *Note:* numerator shows min–max, denominator shows mean; \* – in the Matsesta River with mineralization above 4 g/l, the values were obtained from one point.

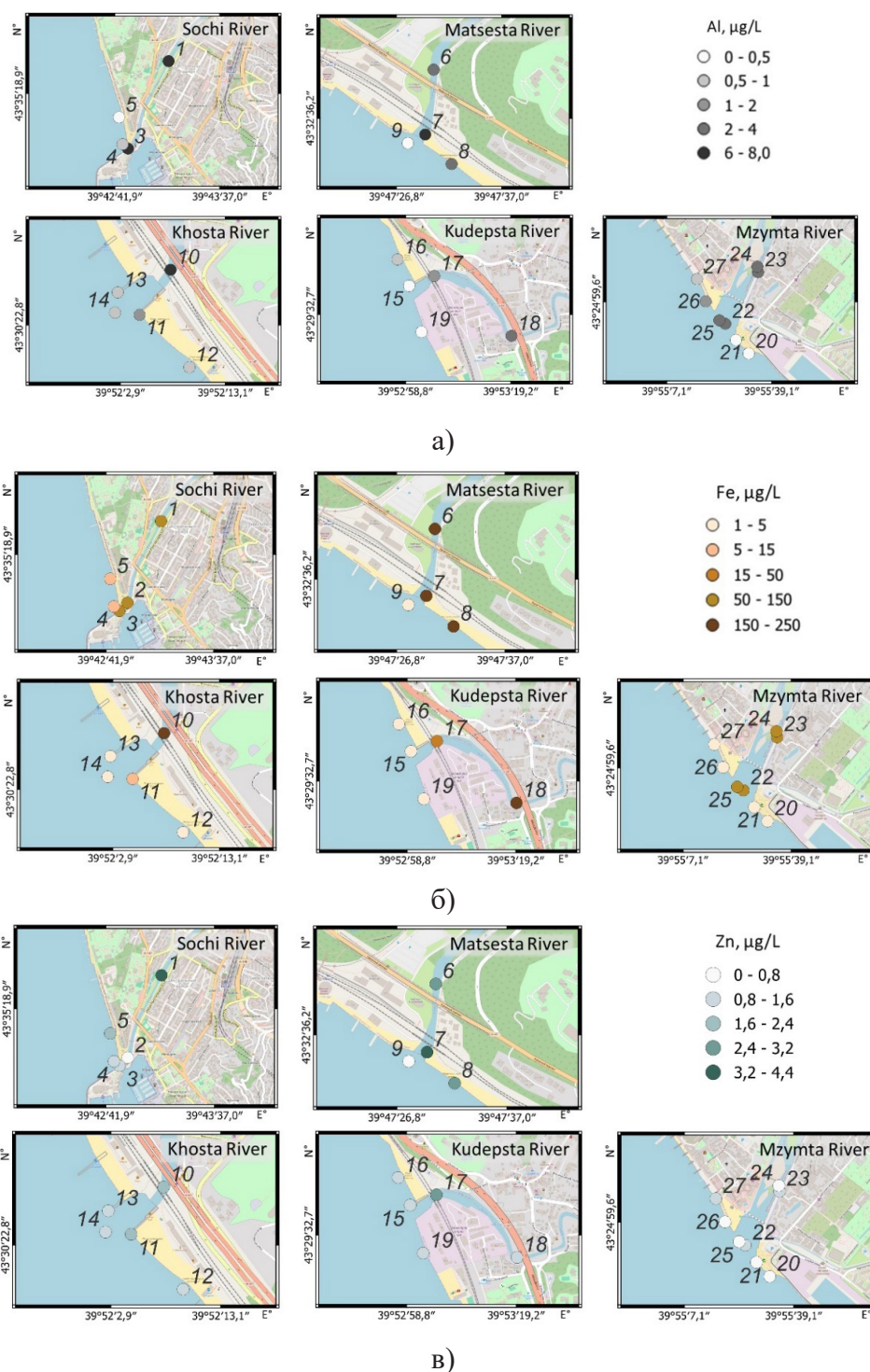


Рис. 2. Содержания растворенных Al (а), Fe (б) и Zn (в) в устьевых областях рр. Сочи, Мацеста, Хоста, Кудепста, Мзымта /

Fig. 2. Dissolved Al (a), Fe (b) и Zn (c) in mouth areas of the Sochi, Matsesta, Khosta, Kudepsta, Mzymta rivers

Минимальные концентрации микроэлементов зафиксированы в реках Мзымта и Хоста (табл. 2, рис. 2 (а-в)). Исключение составляют алюминий и никель: содержание алюминия в р. Хоста сопоставимо с таковым в р. Мацеста (4,5 и 4,8 мкг/л соответственно), однако в р. Сочи его концентрация достигает максимальных значений (5,64 мкг/л) относительно всех исследуемых рек. Концентрация никеля наиболее



высока в р. Мацеста (3,2 мкг/л), тогда как в Хосте его уровень соответствует показателям р. Кудепста (2,4 мкг/л). Сравнивая концентрации микроэлементов с опубликованными данными [Савенко, Покровский, 2022], можно отметить близкие значения для р. Кудепста, тогда как для р. Мзымта значения опубликованных данных превышают в два и более раза. Такое расхождение обусловлено сезонными различиями: данные по микрокомпонентному составу в [Савенко, Покровский, 2022] представлены за май, в период половодья р. Мзымта, а в данном исследовании отбор проб производился в ноябре. В фазе половодья резкое увеличение потока взвешенных веществ, выступающих основным сорбентом и переносчиком для многих микроэлементов, приводит к значительным сезонным колебаниям их концентраций.

Поведение Al, Mn, Fe, Cu, Ni, Zn демонстрирует общий тип распределения в градиенте «река-море» – снижение концентраций с ростом минерализации, что согласуется с классическими представлениями о геохимии эстуарной системы [Гордеев, 2012]. Однако динамика этого снижения различается между элементами: для Fe, Al и Ni характерно резкое уменьшение содержания (на 70–90%) уже при минерализации >4 г/л (рис. 3 а, б), что обусловлено процессами коагуляции и сорбции на взвешенных частицах [Гордеев, 2012]; для Cu, Zn и Mn выявлен более плавный градиент уменьшения концентраций (30–50 % при минерализации до 10 г/л), что отражает их повышенную миграционную способность в морских водах благодаря образованию устойчивых комплексов с органическим веществом и хлоридами. Аномальное повышение концентраций Cu, Zn и Mn в устьевой зоне р. Кудепста при минерализации 3,5 г/л (рис. 3 в), вероятнее всего, обусловлено ремобилизацией элементов из донных отложений в процессе смешения пресных и морских вод.

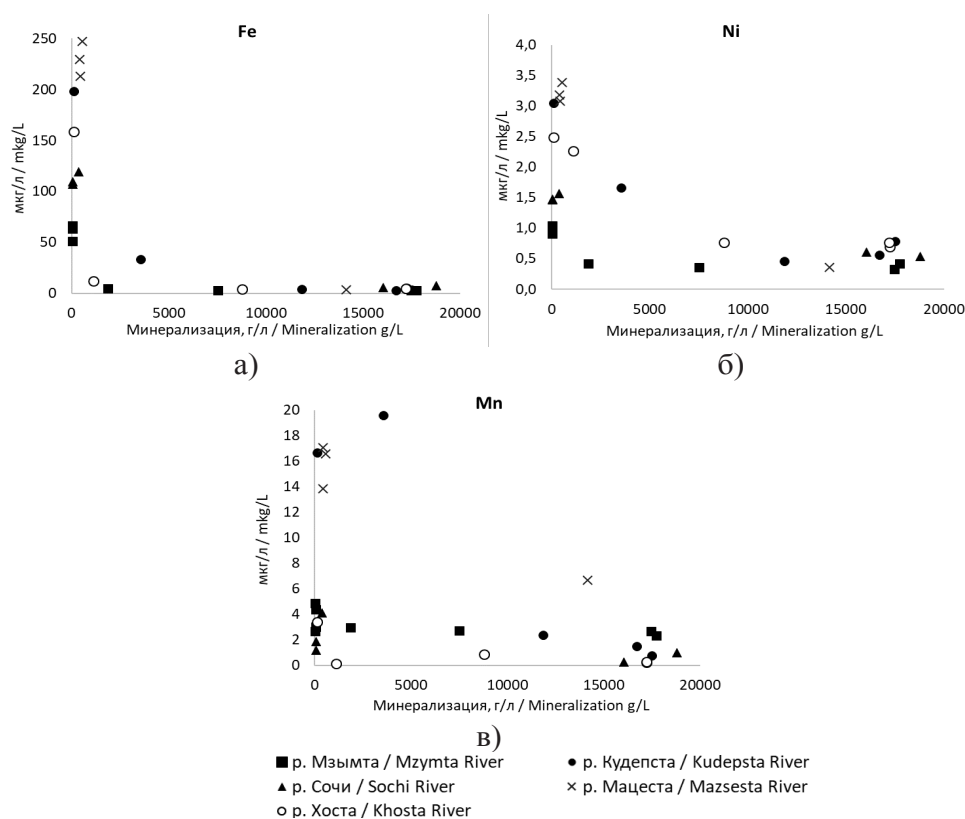


Рис. 3. Зависимость концентраций растворенных Fe (а), Ni (б), Mn (в) в устьевых областях рр. Сочи, Мацеста, Хоста, Кудепста, Мзымта от минерализации /

Fig. 3. Dependence of concentrations of dissolved Fe (a), Ni (b), Mn (c) in the mouth zones of the Sochi, Matsesta, Khosta, Kudepsta, Mzymta rivers on mineralization

Распределение микроэлементов, концентрация которых в морских водах выше, чем в речных (Li, V, Sr, Rb, Mo и др.) имеет консервативный тип поведения, то есть постепенный рост концентраций при смешении речных вод с морскими (рис. 4).

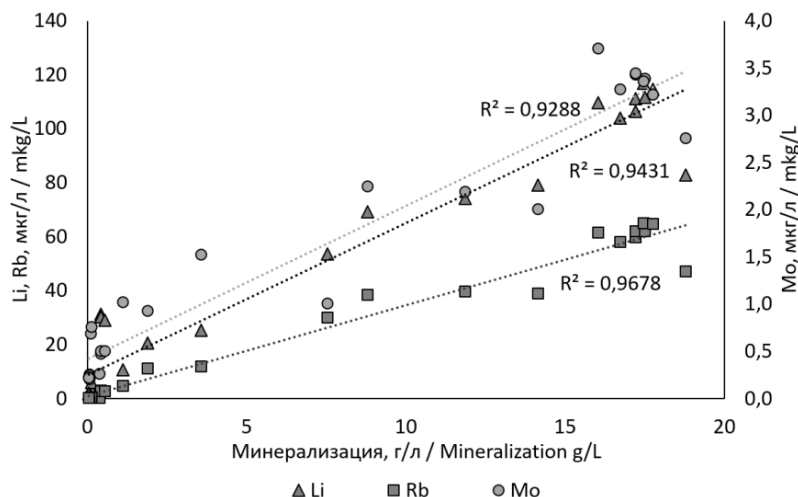


Рис. 4. Зависимость концентраций растворенных Li, Rb, Mo в устьевых областях рр. Сочи, Мацеста, Хоста, Кудепста, Мзымта от минерализации

Fig. 4. Dependence of concentrations of dissolved Li, Rb, Mo in the mouth zones of the Sochi, Matsesta, Khosta, Kudepsta, Mzymta rivers on mineralization

Концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) в исследуемых водах (как ΣРЗЭ) варьируются от 0,01 до 0,64 мкг/л. Наибольшие значения обнаружены в рр. Сочи (т. 1) и Мацеста (т. 7) (0,64 и 0,61 мкг/л соответственно), при этом средние значения для их устьевых зон составляют 0,25 и 0,26 мкг/л соответственно, так же, как и для р. Мзымта (0,26 мкг/л), но в речных водах нижнего течения р. Мзымта эти значения достигают 0,44–0,46 мкг/л (т. 23–24). Наименьшие значения зафиксированы в рр. Хоста и Кудепста (0,1 и 0,06 мкг/л).

Распределение РЗЭ в поверхностных водах может выступать в качестве индикатора геохимических процессов, протекающих в системе вода–порода, а также служить маркером трансформации водной среды под влиянием антропогенных факторов [Харитонов и др., 2022; Lafreniere et al., 2023; Song et al., 2025]. Термальные воды часто обогащены редкими элементами, поэтому их смешение с речными водами Мацесты может приводить к локальному повышению концентраций. В данном случае, как уже упоминалось ранее, сероводородные воды способствуют мобилизации РЗЭ, как и многих других микроэлементов, из вмещающих пород за счёт комплексообразования с сульфид-ионами ( $S^{2-}$ ) и бикарбонатами ( $HCO_3^-$ ). Что касается р. Сочи, то отбор проб проводился в городской зоне, где русло реки укреплено бетонными плитами. Это ограничивает естественное разбавление вод за счёт подземного стока и усиливает накопление растворённых веществ антропогенного происхождения, включая РЗЭ.

Среди всех микроэлементов Al имеет положительную корреляцию ( $R^2 > 0,52$ ,  $p < 0,05$ ) практически со всеми РЗЭ, что свидетельствует о преимущественном переносе РЗЭ в составе глинистых частиц.

## Выводы

Среди исследуемых устьевых областей рек Мзымта, Хоста, Кудепста, Мацеста, Сочи, река Кудепста отличается аномально высокой щелочностью (до 4,5 мг-экв/л) из-за карстообразования в её водосборе, тогда как река Мзымта имеет минимальные значения щелочности из-за ледникового питания и магматических пород в её верхнем и нижнем течении.

Для всех исследуемых рек в переходной зоне река–море выявлен неконсервативный тип поведения микроэлементов, концентрации которых выше в речных водах, чем в морских. При этом для одной группы (Fe, Al, Ni) элементов динамика этого снижения происходит на 70–90% уже при минерализации >4 г/л, а для другой (Mn, Cu, Zn) на 30–50% при минерализации до 10 г/л. Для элементов, концентрация которых в морских водах выше, чем в речных (Li, V, Sr, Br, Mo и др.) характерен консервативный тип поведения.

Несмотря на то, что Мзымта протекает по водосбору с различной металлогенией, в её устье концентрации микроэлементов ниже, чем в устьях других рек. Наибольшие концентрации основного спектра микроэлементов, выявленные в р. Мацеста, в частности ртуть и йод, концентрации которых в других реках ниже предела обнаружения, связаны с гидрогеологическими особенностями бассейна р. Мацеста.

В заключение можно отметить, что микроэлементный состав исследуемых устьевых областей преимущественно зависит от природных условий формирования химического состава рек и не превышает предельно допустимых концентраций для вод хозяйственно-бытового назначения.

## Литература

1. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. – 452 с.
2. Гордеев В.В. Особенности геохимии речного стока в Черное море. // Система Чёрного моря. М.: Научный мир, 2018. – С. 247–286. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.247-286.
3. Гордеев В.В., Маккавеев Е.П., Коченкова А.И. Тяжёлые металлы в воде и взвеси в устьях рек и прибрежной зоне российской части Кавказского побережья Чёрного моря. // Вода: химия и экология. – 2015. – № 11. – С. 7–21.
4. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А., Хлебопашев П.В., Пелевин В.В., Грабовский А.Б., Ижицкий А.С., Гончаренко И.В., Соловьев Д.М., Полухин А.А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря. // Океанология. – 2014. – Т. 54. № 3. – С. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150.
5. Костылева А.В. Распределение растворенного органического углерода в приустьевых районах Большого Сочи (северо-восточная часть Черного моря). // Океанология. – 2015. – Т. 55. № 2. – С. 224–230. DOI: 10.7868/S0030157415020082.
6. Лесникова П.С. Изменение макроэлементного состава речных вод в контрастных геологических условиях, река Сочи Черноморского побережья России. // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – 2023. – № 3. – С. 47–56. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56.
7. Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В. Геохимия и радиоэкология вод и донных отложений р. Мзымты черноморского побережья. // Геохимия. – 2022. – Т. 67. № 4. – С. 376–393. DOI: 10.31857/S0016752522030049.
8. Маккавеев П.Н., Завьялов П.О. Сток малых и средних рек российского побережья Черного моря и его влияние на характеристики вод. // Система Чёрного моря. М.: Научный мир, 2018. – С. 287–321. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.287-322.

9. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Степанова С.В. Работы по изучению приустьевых областей малых и средних рек в прибрежной зоне российского сектора Черного моря. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2013. – № 27. – С. 412–417.

10. Реутова Н. В., Реутова Т. В., Дреева Ф. Р., Хутуев А. М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. Т. 11. № 3. – С. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014.

11. Савенко А.В., Покровский О.С. Трансформация макро- и микроэлементного состава стока растворенных веществ в устьях средних и малых рек Черноморского побережья России. // Океанология. – 2022. – Т. 62. № 3. – С. 380–402. DOI: 10.31857/S003015742203011X.

12. Харитоновна Н.А., Филимонова Е.А., Кортуннов Е.А., Самарцев В.Н., Дробязко Е.В., Сорокоумова Я.В., Гречушников М.Г., Прошкина А.Л., Поздняков С.П. Изотопно-геохимические характеристики природных вод юго-западной части Крымского полуострова. // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. № 4. – С. 474–491. DOI: 10.31857/S0321059622040095.

13. Часовников В.К., Чжу В.П., Очередник О.А., Марьясова Е.С. Оценка уровня техногенных загрязнений в прибрежной зоне Черного моря в районе Геленджика. // Океанология. – 2016. – Т. 56. № 1. – С. 76–80.

14. Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. Guide to best practices for ocean CO<sub>2</sub> measurements. PICES Special Publication 3, 2007. – 191 p.

15. Dyrssen D., Wedborg M. The sulfur-mercury (II) system in natural waters. // Earth-Science Reviews. – 1991. – Vol. 30. Issue 3–4. – pp. 231–250.

16. Harmesa, Wahyudi A.J., Lestari, Taufiqurrahman E. Variability of trace metals in coastal and estuary: Distribution, profile, and drivers. // Marine Pollution Bulletin. – 2022. – Vol. 174. – Art. No. 113173. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.113173.

17. Kostyleva A.V., Podymov O.I., Makkaveev P.N., Polukhin A.A. Influence of small rivers runoff on the hydrochemical structure of coastal waters of the North-Eastern Black Sea. // Coastal Engineering Practice. – 2011. – pp. 286–297. DOI: 10.1061/41190(422)24.

18. Lafreniere M., Lapierre, J., Ponton D.E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2023. – Vol. 353. – pp. 129–141. DOI: 10.1016/j.gca.2023.05.019.

19. Liu Y., Su B., Mu H., Zhang Y., Chen L., Wu B. Effects of point and nonpoint source pollution on urban rivers: From the perspective of pollutant composition and toxicity. // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 460. – Art. No. 132441. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132441.

20. Miladinova S., Stips A., Macias Moy D., Garcia-Gorrioz E., Pathways and mixing of the North Western river waters in the Black Sea. // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2020. – Vol. 236. – Art. No. 106630. DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106630.

21. Muramatsu Y., Wedepohl K.H. The distribution of iodine in the Earth's crust. // Chemical Geology. – 1998. – Vol. 147. Issue 3–4. – pp. 201–216.

22. Ozseker K., Eruz C., Terzi Y. Spatial distribution and ecological risk evaluation of toxic metals in the southern Black Sea coastal sediments. // Marine Pollution Bulletin. – 2022. – Vol. 182. – Art. No. 114020. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114020.

23. Slowey A.J., Brown G.E. Transformations of mercury, iron, and sulfur during the reductive dissolution of iron oxyhydroxide by sulfide. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2007. – Vol. 71. Issue 4. – pp. 877–894.

24. Song W., Wu Z., Yi W., Wang S., Zhang H., Liu J. Rare earth elements in the Yellow River estuary, China: Composition, distribution, and pollution insights. // Marine Pollution Bulletin. – 2025. – Vol. 212. – Art. No. 117599. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.117599.

25. Trinh D.A., Do N.T., Panizzo V.N., McGowan S., Salgado J., Large A.R., Henderson A.C., Vu T.T. Anthropogenic impacts on the water chemistry of a transboundary river system in Southeast Asia. // Journal of Asian Earth Sciences: X. – 2024. – Vol. 12. Issue. 1. – Art. No. 100183. DOI: 10.1016/j.jaesx.2024.100183.



## References

1. Gordeev V.V. Geochemistry of the river-sea system. Moscow. Matushkina I.I. 2012. 452 p. (In Russ.)
2. Gordeev V.V. Features of the geochemistry of river runoff into the Black Sea. The Black Sea System. Moscow. Scientific World. 2018. pp. 247–286. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.247-286. (In Russ.)
3. Gordeev V.V., Makkaveev E.P., Kochenkova A.I. Heavy metals in water and suspended matter in river mouths and coastal zone of the Russian part of the Caucasian coast of the Black Sea. Water: Chemistry and Ecology. 2015. No. 11. pp. 7–21. (In Russ.)
4. Zavyalov P.O. Makkaveev P.N., Konovalov B.V., Osadchiv A.A., Khlebopashev P.V., Pelevin V.V., Grabovsky A.B., Izhitsky A.S., Goncharenko I.V., Soloviev D.M., Polukhin A.A. Hydrophysical and hydrochemical characteristics of marine waters near the mouths of small rivers of the Russian Black Sea coast. Oceanology. 2014. Vol. 54. No. 3. pp. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150. (In Russ.)
5. Kostyleva A.V. Distribution of dissolved organic carbon in the estuarine areas of Greater Sochi (northeastern Black Sea). Oceanology. 2015. Vol. 55. No. 2. pp. 224–230. DOI: 10.7868/S0030157415020082. (In Russ.)
6. Lesnikova P.S. Changes in the macroelement composition of river waters in contrasting geological conditions, the Sochi River of the Black Sea coast of Russia. VSU Bulletin. Series: Geography. Geoecology. 2023. No. 3. pp. 47–56. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56. (In Russ.)
7. Litvinenko Yu.S., Zakharikhina L.V. Geochemistry and radioecology of waters and bottom sediments of the Mzymta River of the Black Sea coast. Geochemistry. 2022. Vol. 67. No. 4. pp. 376–393. DOI: 10.31857/S0016752522030049. (In Russ.)
8. Makkaveev P.N., Zavyalov P.O. Runoff of small and medium-sized rivers of the Russian Black Sea coast and its influence on water characteristics. Black Sea System. Moscow. Scientific World. 2018. pp. 287–321. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.287-322. (In Russ.)
9. Makkaveev P.N., Polukhin A.A., Stepanova S.V. Works on the study of estuary areas of small and medium-sized rivers in the coastal zone of the Russian sector of the Black Sea. Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources. 2013. No. 27. pp. 412–417. (In Russ.)
10. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014. (In Russ.)
11. Savenko A.V., Pokrovsky O.S. Transformation of the macro- and microelement composition of dissolved matter runoff in the mouths of medium and small rivers of the Black Sea coast of Russia. Oceanology. 2022. Vol. 62. No. 3. pp. 380–402. DOI: 10.31857/S003015742203011X. (In Russ.)
12. Kharitonova N.A., Filimonova E.A., Kortunov E.A., Samartsev V.N., Drobiazko E.V., Sorokoumova Ya.V., Grechushnikova M.G., Proshkina A.L., Pozdnyakov S.P. Isotope and geochemical characteristics of natural waters in the southwestern part of the Crimean Peninsula. Water Resources. 2022. Vol. 49. No. 4. pp. 474–491. DOI: 10.31857/S0321059622040095. (In Russ.)
13. Chasovnikov V.K., Zhu V.P., Ocherednik O.A., Maryasova E.S. Assessment of the level of technogenic pollution in the coastal zone of the Black Sea near Gelendzhik. Oceanology. 2016. Vol. 56. No. 1. pp. 76–80. (In Russ.)
14. Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. Guide to best practices for ocean CO<sub>2</sub> measurements. PICES Special Publication 3. 2007. 191 p.
15. Dyrssen D., Wedborg M. The sulfur-mercury (II) system in natural waters. Earth-Science Reviews. 1991. Vol. 30. Issue 3–4. pp. 231–250.

16. Harmesa, Wahyudi A.J., Lestari, Taufiqurrahman E. Variability of trace metals in coastal and estuary: Distribution, profile, and drivers. *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 174. Art. No. 113173. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.113173.
17. Kostyleva A.V., Podymov O.I., Makkaveev P.N., Polukhin A.A. Influence of small rivers runoff on the hydrochemical structure of coastal waters of the North-Eastern Black Sea. *Coastal Engineering Practice*. 2011. pp. 286–297. DOI: 10.1061/41190(422)24.
18. Lafreniere M., Lapierre, J., Ponton D.E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2023. Vol. 353. pp. 129–141. DOI: 10.1016/j.gca.2023.05.019.
19. Liu Y., Su B., Mu H., Zhang Y., Chen L., Wu B. Effects of point and nonpoint source pollution on urban rivers: From the perspective of pollutant composition and toxicity. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 460. Art. No. 132441. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132441.
20. Miladinova S., Stips A., Macias Moy D., Garcia-Gorritz E., Pathways and mixing of the North Western river waters in the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020. Vol. 236. Art. No. 106630. DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106630.
21. Muramatsu Y., Wedepohl K.H. The distribution of iodine in the Earth's crust. *Chemical Geology*. 1998. Vol. 147. Issue 3–4. pp. 201–216.
22. Ozseker K., Eruz C., Terzi Y. Spatial distribution and ecological risk evaluation of toxic metals in the southern Black Sea coastal sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 182. Art. No. 114020. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114020.
23. Slowey A.J., Brown G.E. Transformations of mercury, iron, and sulfur during the reductive dissolution of iron oxyhydroxide by sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. Vol. 71. Issue 4. pp. 877–894.
24. Song W., Wu Z., Yi W., Wang S., Zhang H., Liu J. Rare earth elements in the Yellow River estuary, China: Composition, distribution, and pollution insights. *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 212. Art. No. 117599. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.117599.
25. Trinh D.A., Do N.T., Panizzo V.N., McGowan S., Salgado J., Large A.R., Henderson A.C., Vu T.T. Anthropogenic impacts on the water chemistry of a transboundary river system in Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences: X*. 2024. Vol. 12. Issue. 1. Art. No. 100183. DOI: 10.1016/j.jaesx.2024.100183.

УДК 551.510.42

DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x

Оригинальная статья

## Усовершенствованный инверсионный метод восстановления потоков $\text{CO}_2$ над территориями со сложным рельефом на основе атмосферных измерений

Ю.В. Мухартова<sup>1,2</sup>, А.В. Ольчев<sup>1,2</sup>, И.А. Керимов<sup>2,3</sup>, Е.С. Обаев<sup>1</sup><sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, ГСП-1, e-mail: muhartova@yandex.ru;<sup>2</sup> Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100;<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1

Статья поступила: 29.09.2025, доработана: 05.12.2025, принята к публикации: 09.12.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Изменение концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере является одним из ключевых факторов глобального изменения климата. Для корректного понимания вклада различных экосистем в углеродный баланс необходимо количественно оценивать поверхностные потоки ПГ. Однако существующие методы, в частности метод турбулентных пульсаций, ограниченно применимы на территориях со сложным рельефом и мозаичной структурой растительного покрова. Это обуславливает необходимость разработки новых подходов, обеспечивающих надёжную оценку потоков ПГ в условиях пространственной неоднородности ландшафтов. **Цель работы.** Разработка и тестирование усовершенствованного инверсионного алгоритма восстановления поверхностных потоков ПГ в холмистой местности на основе данных концентраций ПГ в приземном слое атмосферы, получаемых, в том числе, с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). **Методы исследования.** Предложенный подход основан на решении прямой задачи для концентрации ПГ с последующей минимизацией расхождения между измеренными и смоделированными значениями на двух контрольных высотах в пределах приземного слоя. Для верификации алгоритма проведены численные эксперименты с использованием трёхмерной гидродинамической модели высокого разрешения, позволяющей воспроизводить поля скоростей, турбулентных характеристик и концентраций ПГ в реальных топографических условиях. **Результаты работы.** Модель апробирована для покрытого лесом холмистого участка в предгорьях Большого Кавказского хребта (Чеченская Республика, Россия). Численные эксперименты показали, что усовершенствованный алгоритм обеспечивает достоверное восстановление пространственной структуры потоков  $\text{CO}_2$  при перепадах высот до 100 м. Сравнение с предыдущей версией модели выявило существенное повышение точности расчётов и снижение систематических ошибок при учёте топографических эффектов. Практическая значимость. Разработанный метод открывает возможности для количественной оценки потоков ПГ на участках, где традиционные микрометеорологические подходы неприменимы. Он может использоваться в системах дистанционного мониторинга углеродного баланса экосистем с использованием БПЛА и наземных платформ, а также адаптироваться для анализа пространственно неоднородных потоков других парниковых газов.

**Ключевые слова:** потоки парниковых газов, инверсионное моделирование, моделирование турбулентного переноса, наблюдения с БПЛА, карбоновые полигоны.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках реализации темы госзадания ГГНТУ имени академика М.Д. Миллионщикова, FZNU-2024-0002.

**Для цитирования:** Мухартова Ю.В., Ольчев А.В., Керимов И.А., Обаев Е.С. Усовершенствованный инверсионный метод восстановления потоков  $\text{CO}_2$  над территориями со сложным рельефом на основе атмосферных измерений. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 235–248. DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x

DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x

Original paper

## An improved inversion method for recovering CO<sub>2</sub> fluxes over complex terrain areas based on atmospheric measurements

I.V. Mukhartova<sup>1,2</sup>, A.V. Olchev<sup>1,2</sup>, I.A. Kerimov<sup>2,3</sup>, E.S. Obaev<sup>1</sup><sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation, e-mail: muhartova@yandex.ru;<sup>2</sup> Grozny State Oil Technical University, 100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364024, Russian Federation;<sup>3</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation

Received: 29.09.2025, revised: 05.12.2025, accepted: 09.12.2025

**Abstract. Relevance.** Changes in the concentration of greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere are a key factor in global climate change. To correctly understand the contribution of different ecosystems to the carbon balance, it is necessary to quantitatively assess surface GHG fluxes. However, existing methods, particularly the eddy covariance method, are limited in their applicability to areas with complex terrain and varied vegetation. Therefore, new approaches are needed to reliably estimate GHG fluxes in spatially heterogeneous landscapes. **The aim** of this study is to develop and test an improved inversion algorithm for estimating surface GHG fluxes in hilly terrain. The algorithm will be based on GHG concentration data obtained from the surface layer of the atmosphere using unmanned aerial vehicles (UAVs). **Methods.** The proposed approach involves first solving the direct problem of GHG concentration and then minimizing the discrepancy between the measured and modeled values at two control heights within the surface layer. Numerical experiments were conducted using a high-resolution, three-dimensional hydrodynamic model to verify the algorithm. This model can reproduce velocity fields, turbulent characteristics, and GHG concentrations in real topographic conditions. **Results.** The model was tested in a forested, hilly area in the foothills of the Greater Caucasus Range in the Chechen Republic of Russia. The numerical experiments showed that the improved algorithm reliably reconstructs the spatial structure of CO<sub>2</sub> fluxes at elevation differences of up to 100 meters. Comparing the results with those of the previous model version revealed a significant increase in calculation accuracy and a reduction in systematic errors when accounting for topographic effects. **Practical significance.** The developed method provides an opportunity to quantitatively assess GHG fluxes in areas where classic micrometeorological approaches are not applicable. The method can be used in remote monitoring systems to assess the carbon balance of ecosystems using UAVs and ground platforms. It can also be adapted to analyze spatially heterogeneous fluxes of other GHGs.

**Keywords:** greenhouse gas fluxes, inverse modeling, turbulent transfer modeling, UAV measurements, carbon supersites.

**Acknowledgements:** The work was supported by the State Assignment of the Grozny State Oil Technical University (Project Reg. No. FZNU-2024-0002).

**For citation:** Mukhartova I.V., Olchev A.V., Kerimov I.A., Obaev E.S. An improved inversion method for recovering CO<sub>2</sub> fluxes over complex terrain areas based on atmospheric measurements. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 15(4): 235–248. DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x



## Введение

Изучение потоков парниковых газов (ПГ) в наземных экосистемах имеет ключевое значение для понимания механизмов современного изменения климата. Повышение глобальной температуры и рост повторяемости экстремальных погодных явлений большинство экспертов по климату связывают со стремительным увеличением концентрации ПГ в атмосфере [IPCC ..., 2022]. Наземные экосистемы при этом играют важнейшую роль в формировании глобального баланса углерода и других парниковых газов, выступая как их источниками, так и поглотителями. Для корректной оценки региональных и глобальных потоков  $\text{CO}_2$  и других ПГ, а также для подготовки национальных отчётов об их эмиссии и поглощении, необходима достоверная информация о величине и пространственно-временной изменчивости поверхностных потоков.

В настоящее время во всём мире реализуется множество проектов, направленных на наблюдение потоков ПГ у поверхности Земли, создание глобальных сетей мониторинга, совершенствование технологий наземных измерений и разработку методов дистанционной оценки потоков [Olchev, 2025]. Наиболее широко применяемыми методами измерения потоков являются метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) [Aubinet et al., 2012; Burba, 2013; Baldocchi et al., 2001; Villarreal, Vargas, 2021] и метод экспозиционных камер [Pumpanen et al., 2004]. Первый метод обеспечивает измерения потоков на уровне экосистемы и интегрирован в региональные и глобальные наблюдательные сети (ICOS, AmeriFlux, AsiaFlux, ChinaFlux, RuFlux, Fluxnet), что гарантирует сопоставимость данных на национальном и международном уровнях. Однако существенным недостатком данного подхода является его полная неприменимость для измерений над сложными, горизонтально неоднородными поверхностями. Метод экспозиционных камер, напротив, обеспечивает высокую точность локальных измерений потоков и не требует учёта ландшафтной неоднородности, однако чрезвычайно плохо масштабируется до уровня экосистемы.

Потребность в получении данных о потоках ПГ на региональном и глобальном уровнях, включая труднодоступные и топографически сложные территории, стимулировала развитие математических моделей различной степени сложности, основанных на использовании спутниковых наблюдений [Jagermeyr et al., 2014; Junttila et al., 2021; Maksyutov et al., 2021]. В подобных подходах обратные алгоритмы оценки потоков ПГ опираются на значения концентраций в приземном слое атмосферы, верифицируемые по данным наземных станций мониторинга. При этом в инверсионных схемах нередко используются региональные модели атмосферного переноса, позволяющие уточнять пространственное распределение потоков. Однако спутниковые методы обладают рядом ограничений: дискретностью наблюдений, влиянием облачности, неравномерным расположением наземных контрольных станций и недостаточным пространственным разрешением, что приводит к расхождениям между результатами различных инверсионных алгоритмов [Jin et al., 2024].

В последние годы активно развиваются методы оценки поверхностных потоков ПГ на основе данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [Shaw et al., 2021; Kunz et al., 2020; Reuter et al., 2021; Bolek et al., 2024]. Преимущество таких методов заключается в возможности оперативного получения пространственно детализированных данных над участками с различными типами подсти-

лающей поверхности, включая районы со сложным рельефом и мозаичной структурой растительного покрова, где традиционные наземные методы оказываются малоэффективными. Эти подходы рассматриваются как физически обоснованный инструмент восстановления потоков с высоким пространственным разрешением, позволяющий получать оценки на локальном и мезомасштабном уровнях без необходимости детального знания биогеохимических характеристик источников и стоков ПГ в почве и растительности.

Несмотря на очевидные преимущества, применение дистанционных методов оценки потоков ПГ остаётся затруднительным в условиях пересечённого рельефа и мозаичной структуры растительного покрова. В таких случаях существенное влияние на формирование полей концентраций оказывают локальные турбулентные процессы и горизонтальные градиенты скоростей ветра, что осложняет интерпретацию измерений и повышает неопределённость оценок потоков. Поэтому совершенствование существующих технологий и разработка новых алгоритмов восстановления потоков ПГ для сложных ландшафтов остаются актуальной научной задачей.

В настоящей работе представлен усовершенствованный подход к обратному моделированию потоков парниковых газов на основе трёхмерной гидродинамической модели типа RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes), позволяющий восстанавливать пространственное распределение поверхностных потоков с высоким уровнем детализации. В отличие от ранее предложенных схем, разработанный алгоритм сочетает преимущества высокоразрешающего моделирования турбулентного переноса с данными дистанционных измерений, получаемыми с БПЛА. Основное внимание уделено оценке возможности восстановления потоков на границах различных типов землепользования и в районах со сложным рельефом.

Для проверки эффективности алгоритма проведены численные эксперименты с использованием результатов прямого моделирования, в которых в качестве «истинных» потоков и прокси-данных о распределении концентраций  $\text{CO}_2$  применялись решения трёхмерной модели высокого разрешения [Mukhartova et al., 2024]. В качестве модельного примера рассмотрен поток  $\text{CO}_2$  над холмистой поверхностью, характеризующейся множественными пространственно-неоднородными источниками и стоками в пределах растительного покрова и почвы. Более ранняя версия инверсионного алгоритма была представлена в работах [Мухартова и др., 2023; Mukhartova et al., 2024]. Модификация схемы аппроксимации граничных условий и структуры расчётной сетки позволила существенно повысить точность восстановления потоков и сократить вычислительные затраты.

## Материалы и методы

В качестве экспериментальной территории был выбран покрытый лесом холмистый участок в предгорьях Большого Кавказского хребта, расположенный вблизи посёлка Рошни-Чу (43°03'47.0»с.ш., 45°23'13.3»в.д., Чеченская Республика, Россия). Территория входит в состав карбонового полигона “Way Carbon” [Керимов и др., 2023] и характеризуется выраженной топографической неоднородностью (перепад высот около 200 м) при относительно однородном лесном покрове. В летние сезоны 2022 и 2023 годов на площадке проводились полевые измерения скорости дыхания почвы, фотосинтеза и стволового дыхания деревьев. Полученные данные использовались как входные параметры для расчёта концентраций  $\text{CO}_2$  в приземном слое атмосферы с применением прямой модели.

Для генерации прокси-данных о пространственном распределении концентраций  $\text{CO}_2$  и расчёта целевого потока, с которым в дальнейшем сравнивались результаты решения обратной задачи, использовалась трёхмерная гидродинамическая RANS-модель [Mukhartova et al., 2024], описывающая поля скорости воздушного потока ( $\vec{V}$ ) и позволяющая оценивать коэффициенты турбулентности для потока импульса ( $K$ ) и переноса  $\text{CO}_2$  ( $K_c$ ). После определения полей скорости ветра и коэффициентов турбулентности при заданном распределении почвенного дыхания ( $q_h$ ) вычислялось поле концентраций  $\text{CO}_2$  в приземном слое атмосферы ( $C$ ) для заданных источников ( $F_b$ ) и стоков ( $F_{ph}$ ) в растительном пологом:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla)C = \text{div}(K_c \nabla C) + F_b - F_{ph}, & t > 0, (x, y) \in \Pi, z \in (h(x, y), H), \\ C|_{t=0} = C_0, \quad \frac{\partial C}{\partial z}\bigg|_{z=H} = \frac{\partial C}{\partial x}\bigg|_{x=0, x=L_x} = \frac{\partial C}{\partial y}\bigg|_{y=0, y=L_y} = 0, \quad -K_c \frac{\partial C}{\partial z}\bigg|_{z=h(x, y)} = q_h(x, y). \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Pi$  – участок местности прямоугольной формы  $\{(x, y) \in \Pi : x \in (0, L_x), y \in (0, L_y)\}$ , в пределах которого рельеф описывается функцией  $h(x, y)$ . Начальное распределение концентрации принималось равным некоторому среднему значению  $C_0$ . На боковых границах области задавались однородные условия сноса [Елизарова, 2007], что соответствует пренебрежимо малому горизонтальному градиенту  $C$  вблизи границ. Вертикальный поток  $\text{CO}_2$  может быть определен по формуле [Blanken et al., 2009; Feigenwinter et al., 2008; Leuning et al., 2008]:

$$q_w(x, y, z) = -K_c \frac{\partial C}{\partial z} + \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \text{sgn}(w)w \frac{\partial C}{\partial z} dz. \quad (2)$$

Полученное по формуле (2) распределение вертикального потока на заданной высоте далее будет рассматриваться как целевой поток при тестировании обратной задачи.

Главным ограничением прямой модели является необходимость знания пространственного распределения источников и стоков  $\text{CO}_2$ , а также параметров, описывающих физиологические процессы (устычная проводимость, световая кривая фотосинтеза и др.). Для преодоления этих трудностей в предыдущих работах [Мухартова и др., 2023; Mukhartova et al., 2024] был предложен инверсионный метод, не требующий детализированной информации о распределении источников и стоков ПГ. Для решения обратной задачи необходимо иметь измерения концентраций ПГ на нескольких (как минимум двух) высотных уровнях над растительным пологом, что может быть реализовано с помощью БПЛА, оснащённых инфракрасными газоанализаторами. Постановка обратной задачи требует знания поля скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии, которые могут быть определены на основе данных о рельефе (например, по результатам лидарной съёмки) и структуре растительности (LAD – Leaf Area Density), а также известных параметров ветрового режима на заданной высоте.

Предположим, что нужно оценить вертикальный поток ( $q_w^*(x, y)$ ) на некоторой высоте  $h_{\text{flux}}$  над поверхностью. Обратное моделирование сводится к многократному решению прямой задачи в области выше  $h_{\text{flux}}$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla)C = \operatorname{div}(K_C \nabla C), \quad z \in (h_{flux}, H), \quad (x, y) \in \Pi, \quad t > 0, \\ C|_{t=0} = C_0, \quad \frac{\partial C}{\partial z}\bigg|_{z=H} = \frac{\partial C}{\partial x}\bigg|_{x=0, x=L_x} = \frac{\partial C}{\partial y}\bigg|_{y=0, y=L_y} = 0, \quad -K_C \frac{\partial C}{\partial z}\bigg|_{z=h_{flux}} = q_w(x, y, h_{flux}) \end{cases} \quad (3)$$

с изменением искомого граничного потока ( $q_w(x, y, h_{flux})$ ) таким образом, чтобы минимизировать функционал расхождения между измеренными и рассчитанными концентрациями на контрольных высотах:

$$M[q_w(x, y, h_{flux})] = \|C - C^{meas}\|^2 = \frac{1}{L_x L_y I} \sum_{i=1}^I \int_{\Pi} (C(x, y, h_i) - C_i^{meas}(x, y))^2 dx dy, \quad (4)$$

где  $I$  – число измерительных уровней,  $C(x, y, h_i)$  – смоделированные значения концентрации на уровне  $h_i$ ,  $C_i^{meas}(x, y)$  – измеренные значения на том же уровне.

Минимизация функционала выполнялась итерационным методом внутренней точки для нелинейного программирования с контролем невыполнимости [Nocedal et al., 2014]. В качестве начального приближения потока использовалась оценка, полученная из выражения (2) заменой градиента концентрации конечной разностью по двум высотным уровням:

$$\begin{aligned} q_w^{ini}(x, y) = & -K_C(x, y, h_{flux}) \frac{C_2^{meas}(x, y) - C_1^{meas}(x, y)}{h_2 - h_1} + \\ & + \operatorname{sgn}(w(x, y, h_{flux})) w(x, y, h_{flux}) \frac{C_2^{meas}(x, y) - C_1^{meas}(x, y)}{h_2 - h_1} \Delta z. \end{aligned} \quad (5)$$

При проведении измерений целесообразно брать за уровень  $h_1$  сам уровень  $h_{flux}$ . В качестве критерия завершения итерационного процесса при оценке функции  $q_w(x, y, h_{flux})$  использовалось условие достижения функционалом  $\|C - C^{meas}\|^2$  значений порядка квадрата инструментальной погрешности измерений концентрации. Такой подход позволяет контролировать сходимость и предотвращать переоптимизацию при наличии шумов в экспериментальных данных. Следует отметить, что метод обладает высокой чувствительностью к точности измерений концентрации, поэтому минимизация систематических ошибок при полевых наблюдениях имеет ключевое значение для корректного восстановления потоков.

Ранее было показано, что предложенный инверсионный подход обеспечивает удовлетворительное качество восстановления потоков над горизонтальными поверхностями с мозаичной растительностью, однако даёт существенные ошибки при наличии выраженного рельефа [Mukhartova et al., 2024]. В упомянутой работе в качестве поверхности потока  $h_{flux}$  принималась поверхность, огибающая рельеф на постоянной высоте от поверхности земли, при этом потоки оценивались одновременно для всей исследуемой территории в ряде дискретных точек, равномерно распределённых по площади, без учёта локальных уклонов. Несмотря на то, что результаты подтвердили принципиальную возможность применения подхода, в районах со значительными перепадами вы-



сот ошибки восстановления достигали 50 %. Численное решение задачи (3) при этом выполнялось на той же расчётной сетке с неравномерным шагом по высоте, что и в прямой задаче (1). В усовершенствованной версии алгоритма, представленной в данной работе, расчёт выполнялся по отдельным подобластям, что позволило существенно сократить вычислительное время и повысить горизонтальное разрешение. В новой схеме поверхность  $h_{flux}$  задавалась в виде горизонтальной плоскости, что обеспечило более корректную аппроксимацию граничных условий в разностной схеме задачи (3). Для увеличения точности расчётов была применена новая структура сетки с вертикальным сгущением узлов вблизи поверхности  $h_{flux}$ . Контрольные уровни  $h_1$  и  $h_2$  также задавались в виде горизонтальных плоскостей, причём уровень  $h_1$  совпадал с  $h_{flux}$ . Такое построение расчётной области позволило существенно уменьшить погрешность при восстановлении потока и повысить устойчивость итерационного процесса в условиях сложного рельефа.

### Результаты численных экспериментов

Численные эксперименты проводились для полуденного времени ясного летнего дня 2023 года при преобладающем юго-западном направлении ветра. Для проверки работоспособности и точности инверсионной модели использовались прокси-поля концентраций  $CO_2$ , рассчитанные с помощью прямой модели, а также соответствующее им распределение целевого потока. Входными параметрами прямой модели служили результаты полевых измерений скорости дыхания почвы и фотосинтеза, данные о направлении и скорости ветра, температуре, влажности воздуха и приходящей фотосинтетически активной радиации (ФАР). Для имитации измерений концентрации добавлялась инструментальная погрешность (1 ppm), соответствующая типичным характеристикам используемых датчиков.

Смоделированное пространственное распределение вертикальных потоков  $CO_2$ , полученное с использованием полной прямой модели, а также ошибка их восстановления исходной версией алгоритма [Mukhartova et al., 2024] представлены на рисунке 1. Отрицательные значения потока соответствуют переносу  $CO_2$  из атмосферы к подстилающей поверхности, положительные – направлению потока от растительного полога в атмосферу.

Для тестирования инверсионного алгоритма восстановления вертикального потока  $CO_2$  в качестве целевого распределения использовались потоки, смоделированные прямой моделью для выбранной подобласти (обозначенной рамкой на рис. 2а и 2с), где исходная версия алгоритма демонстрировала значительные ошибки. Заданный уровень  $h_{flux}$ , на котором производилась оценка потока, был расположен на высоте 5 м над пологом растительности в точке максимальной отметки рельефа. Имитация измерений концентрации выполнялась для двух уровней:  $h_1 = h_{flux}$  и  $h_2 = h_1 + 10$  м.

На первом этапе исследования проводилась верификация согласованности между результатами упрощённой модели (3) и полной прямой модели. Для этой подобласти поля концентраций  $CO_2$  рассчитывались на двух высотах  $h_1$  и  $h_2$  с использованием целевого потока в качестве граничного условия задачи (3).

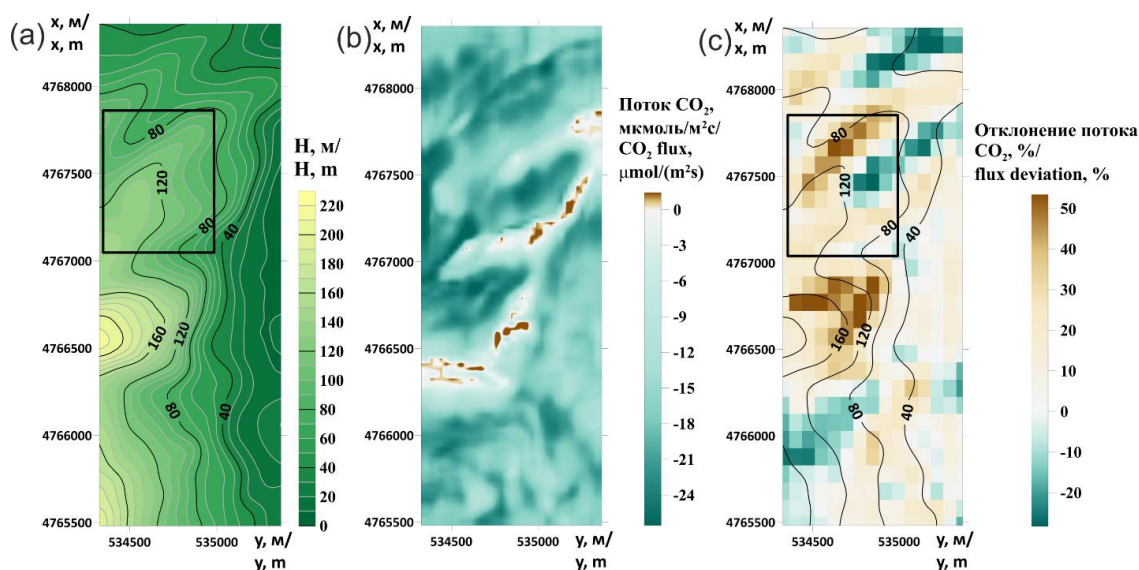


Рис. 1. (a) Рельеф экспериментальной площадки и выбранной подобласти (указана рамкой); (b) смоделированное пространственное распределение вертикальных потоков  $\text{CO}_2$ , полученное с использованием полной прямой модели; (c) ошибка восстановления вертикальных потоков  $\text{CO}_2$  исходной версией инверсионного алгоритма [Mukhartova et al., 2024]. Изолинии соответствуют относительной высоте поверхности /

Fig. 1. (a) Topography of experimental site and selected test subdomain (indicated by the frame); (b) modeled vertical  $\text{CO}_2$  flux distribution obtained from the full forward model; (c) errors in retrieving vertical  $\text{CO}_2$  fluxes with the original version of the inverse algorithm [Mukhartova et al., 2024]. Contour lines correspond to the relative height of the surface

Сравнение полученных распределений концентраций показало их хорошее соответствие результатам полной модели (рис. 2). Наилучшее совпадение наблюдалось в юго-западной части подобласти, где уровень  $h_{\text{flux}}$  был минимально удалён от поверхности. Наибольшие расхождения отмечены в северо-западной и восточной частях, соответствующих понижению рельефа. Это свидетельствует о снижении точности решения обратной задачи с увеличением высоты, на которой выполняются измерения концентрации  $\text{CO}_2$ . Различия между результатами упрощённой и полной моделей объясняются тем, что в задаче (3) на нижней границе задаётся только вертикальный поток без учёта горизонтальной адвекции, а также тем, что обе задачи решаются на разных расчётных сетках. Однако величина этих различий оказалась меньше предполагаемой инструментальной погрешности, что позволяет считать их допустимыми в рамках данного исследования.

На следующем этапе эксперимента выполнялось восстановление полей вертикальных потоков  $\text{CO}_2$ . Результаты численного моделирования показали, что точность восстановления остаётся высокой для участков с ровным рельефом, но снижается при уклонах поверхности более  $20^\circ$ . Это обусловлено уменьшением вертикальных и горизонтальных градиентов концентрации на удалении от поверхности вследствие интенсивного турбулентного перемешивания, а также снижением чувствительности алгоритма при низких контрастах концентраций (менее 1 ppm), сопоставимых с инструментальной погрешностью. В связи с этим расчёты ограничивались подобластями, где расстояние между поверхностью земли и горизонтальным уровнем измерений ( $h_{\text{flux}}$ ) не превышало 100 м.

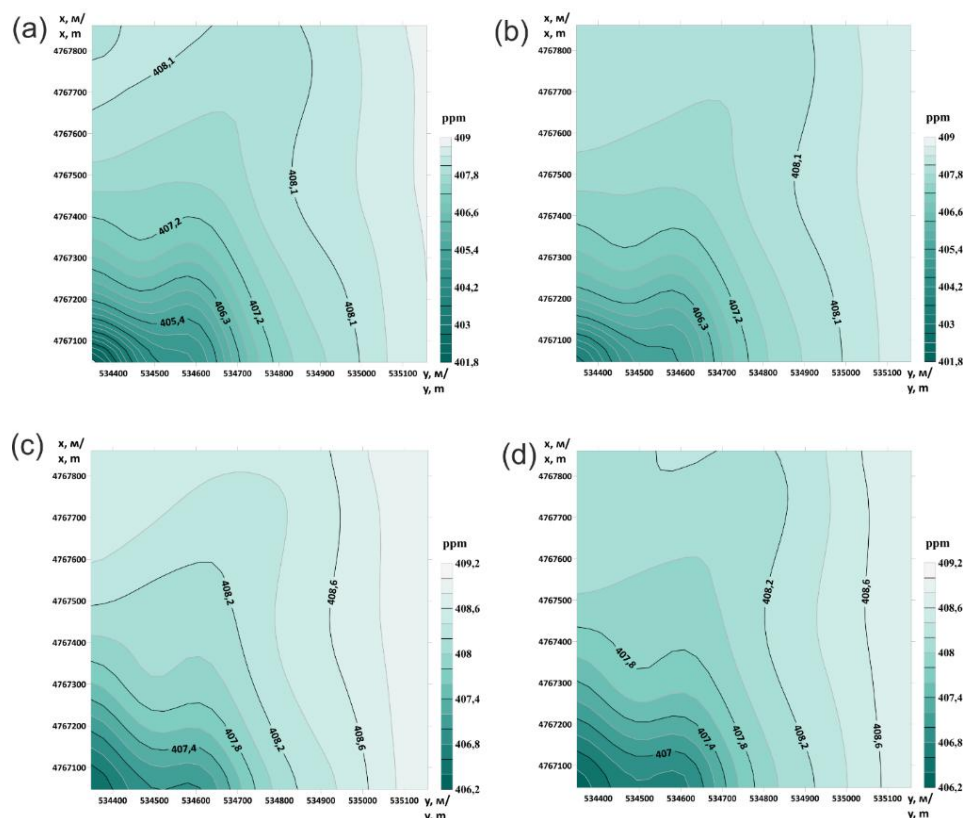
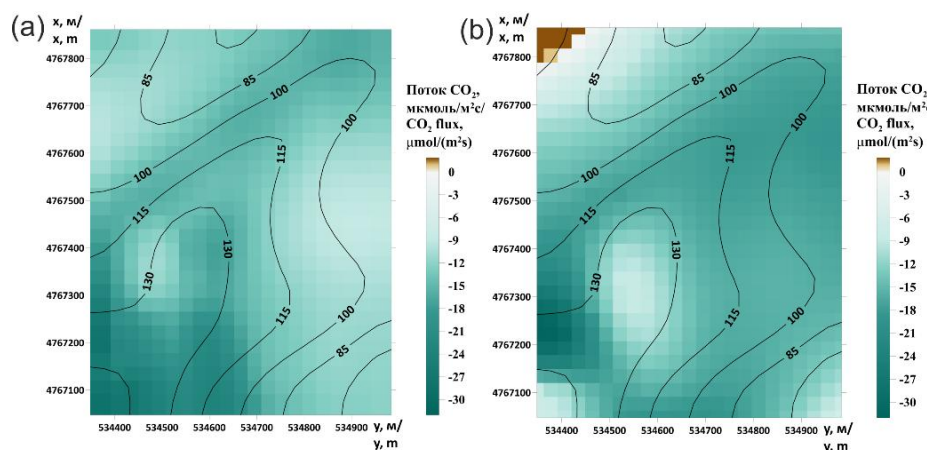


Рис. 2. Пространственное распределение концентраций  $\text{CO}_2$ : (a) и (c) – вычисленные с помощью полной прямой задачи на уровнях  $h_1$  и  $h_2$  соответственно; (b) и (d) – вычисленные на уровнях  $h_1$  и  $h_2$  из упрощенной задачи (3) с целевым потоком в качестве входных данных /

Fig. 2. Spatial distribution of  $\text{CO}_2$  concentrations: (a) and (c) calculated from solving the full forward problem at levels  $h_1$  and  $h_2$ , respectively; (b) and (d) calculated at levels  $h_1$  and  $h_2$  from the simplified model (3) with the target flux as input data

На рисунке 3 приведены распределения целевого потока  $\text{CO}_2$ , его начального приближения, полученного по формуле (5), восстановленного потока и карты отклонений относительно целевых значений. Начальное приближение верно передаёт порядок величины потока, но не отражает пространственную структуру. В отличие от него, потоки, восстановленные с помощью инверсионного алгоритма, демонстрируют как качественное, так и количественное совпадение с целевыми значениями, что указывает на существенное повышение точности по сравнению с исходной версией алгоритма, особенно в центральной части тестовой подобласти.



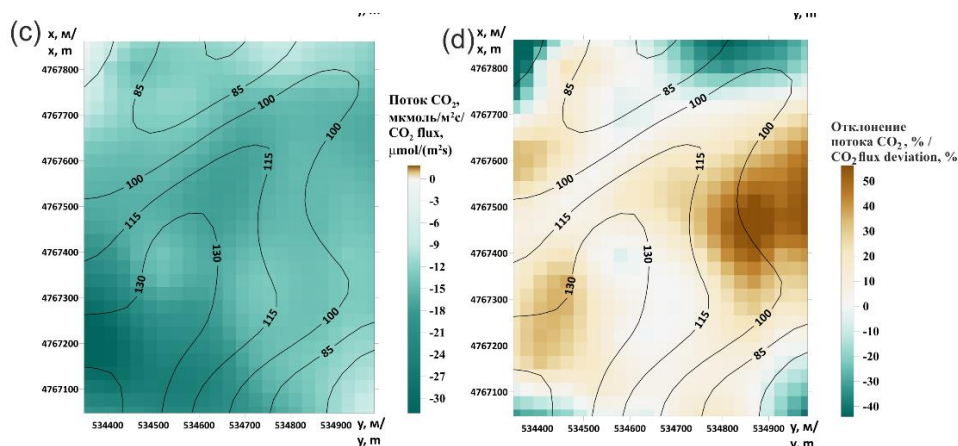


Рис. 3. Пространственные распределения: целевого потока  $\text{CO}_2$  (a); начального приближения вертикального потока  $\text{CO}_2$  (b); потока  $\text{CO}_2$ , полученного из инверсионного моделирования (c); отклонения оцененного потока от целевого (d) (в % с учетом знака отклонения).

Изолинии соответствуют относительной высоте поверхности /

Fig.3. Spatial distributions of: target  $\text{CO}_2$  flux (a); initial approximation of the vertical  $\text{CO}_2$  flux (b); the  $\text{CO}_2$  flux retrieved from the inverse modeling (c); deviation of the retrieved flux from the target flux (d) (in %, taking into account the sign of the deviation). Contour lines correspond to the relative height of the surface

### Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что усовершенствованный инверсионный алгоритм демонстрирует стабильное восстановление пространственного распределения потоков  $\text{CO}_2$  в условиях сложного рельефа. Улучшение точности по сравнению с предыдущей версией метода связано, прежде всего, с модификацией расчётной сетки, обеспечивающей сгущение узлов вблизи поверхности ( $h_{\text{flux}}$ ), и новой схемой аппроксимации граничных условий. Эти изменения позволили повысить чувствительность модели к вертикальным градиентам концентрации и уменьшить влияние ошибок, связанных с усреднением по высоте.

Сопоставление результатов инверсионного моделирования с данными прямых расчётов показало, что алгоритм адекватно воспроизводит как величины потоков, так и их пространственную структуру в пределах основной части модельного домена. Наибольшее согласие отмечено для областей с плавным рельефом и однородной растительностью, где турбулентный перенос имеет квазистационарный характер. Напротив, на склонах с уклонами более  $20^\circ$  погрешность восстановления возрастает вследствие усиления горизонтальной адвекции и формирования локальных зон вихревого обмена. Эти особенности согласуются с результатами других работ, указывающих на сложность применения инверсионных методов в условиях сильной топографической неоднородности [Feigenwinter et al., 2008; Mukhartova et al., 2024].

Важным результатом численных экспериментов является выявление зависимости точности восстановления потоков от высоты измерения концентраций  $\text{CO}_2$ . Как показали тесты, при увеличении расстояния между уровнями  $h_1$  и  $h_2$  чувствительность алгоритма снижается, особенно в зонах интенсивного турбулентного перемешивания. Это связано с уменьшением вертикального градиента концентрации и, как следствие, с потерей информативности данных. Таким образом, для обеспечения устойчивого решения обратной задачи измерение концентраций должно выполняться в нижней части приземного слоя, предпочтительно в пределах 10–20 м от поверхности полого растительности.



Дополнительным фактором, влияющим на качество восстановления потоков, является пространственная неоднородность растительного покрова. Даже при небольших изменениях плотности листовой поверхности и высоты деревьев локальные различия в сопротивлении переносу могут вызывать искажения в полях концентрации. В перспективе планируется включить в алгоритм параметризацию неоднородности растительности по данным лидарной съёмки (LAD), что позволит уточнить структуру турбулентных потоков и повысить точность инверсии.

Сравнение результатов с аналогичными исследованиями, выполненными для равнинных участков [Mukhartova et al., 2024; Kunz et al., 2020], показывает, что эффективность инверсионного подхода в условиях холмистой местности снижается не более чем на 20–25 % при перепадах высот до 100 м. Это свидетельствует о высокой устойчивости метода и возможности его практического применения для оценки потоков ПГ в природных экосистемах, где традиционные микрометеорологические методы неприменимы.

Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает компромисс между вычислительной эффективностью и физической достоверностью и может рассматриваться как инструмент для высокоточной реконструкции пространственно неоднородных потоков парниковых газов в пределах ограниченных территорий. В дальнейшем планируется расширить подход за счёт адаптации его к многоуровневым данным наблюдений и интеграции с региональными моделями атмосферного переноса.

### Заключение

Проведённые численные эксперименты подтвердили эффективность усовершенствованного инверсионного алгоритма восстановления потоков ПГ в условиях сложного рельефа. Модель, основанная на трёхмерной гидродинамической RANS-схеме, обеспечивает достоверное воспроизведение пространственной структуры потоков  $\text{CO}_2$  и демонстрирует устойчивость к вариациям исходных параметров.

Модификация схемы аппроксимации граничных условий и структуры расчётной сетки позволила повысить горизонтальное разрешение модели, улучшить аппроксимацию вблизи поверхности и сократить вычислительные затраты. В результате средняя ошибка восстановления потоков значительно снизилась по сравнению с ранее применяемой версией алгоритма, особенно в областях с умеренным рельефом и плавными изменениями высот.

Установлено, что точность восстановления потоков  $\text{CO}_2$  зависит от высоты измерений, характера турбулентного перемешивания и топографических особенностей. Наибольшие расхождения наблюдаются в зонах с резкими изменениями уклонов и выраженной горизонтальной адвекцией, где формируются локальные турбулентные структуры. Тем не менее, даже в этих условиях погрешность остаётся в пределах, приемлемых для практического применения метода.

Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанного подхода для оценки пространственно неоднородных потоков ПГ в природных экосистемах, где применение традиционных микрометеорологических методов затруднено. Алгоритм может быть использован при мониторинге потоков  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов на карбоновых полигонах, а также при дистанционных исследованиях с применением беспилотных летательных аппаратов.

В дальнейшем планируется адаптация алгоритма для многоуровневых измерений концентраций ПГ и интеграция с региональными моделями атмосферного переноса. Это позволит расширить масштаб применения метода, повысить точность

оценки пространственно-временной изменчивости углеродного обмена и обеспечить более полное понимание роли экосистем в региональном углеродном балансе.

### Литература

1. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. М.: Научный мир, 2007. – 351 с.
2. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской республики. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004.
3. 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. – 149–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012.
4. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012. – p. 438.
5. Baldocchi D., Falge E., Gu L. et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2001. – Vol. 82. Issue 11. – pp. 2415–2434.
6. Blanken P.D., Williams M.W., Burns S.P., Monson R.K., Knowles J., Chowanski K., Ackerman T. A comparison of water and carbon dioxide exchange at a windy alpine tundra and subalpine forest site near Niwot Ridge. // *Colorado Biogeochemistry*. – 2009. – Vol. 95. – pp. 61–76.
7. Bolek A., Heimann M., Gockede M. UAV-based in situ measurements of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes over complex natural ecosystems. // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2024 – Vol. 17. – pp. 5619–5636. DOI: 10.5194/amt-17-5619-2024.
8. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln- Nebraska: LI-COR Biosciences, 2013. – 354 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.4247.8561.
9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D. et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO<sub>2</sub> fluxes at three forest sites. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2008. – Vol. 148. Issue 1. – pp. 12–24.
10. IPCC, 2022: Climate Change – 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of working group ii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. / Eds. H.-O. Portner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. et al. – Cambridge: Cambridge University Press, 2022. – 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
11. Jagermeyr J., Gerten D., Lucht W., Hostert P., Migliavacca M., Nemani R. A high-resolution approach to estimating ecosystem respiration at continental scales using operational satellite data. // *Global Change Biology*. – 2014. – Vol. 20. Issue 4. – pp. 1191–1210.
12. Jin Z., Tian X., Wang Y., Zhang H., Zhao M., Wang T., Ding J., Piao S. A global surface CO<sub>2</sub> flux dataset (2015–2022) inferred from OCO-2 retrievals using the GONGGA inversion system. // *Earth System Science Data*. – 2024. – Vol. 16. Issue 6. – pp. 2857–2876. DOI: 10.5194/essd-16-2857-2024.
13. Junttila S., Kelly J., Kljun N. et al. Upscaling northern peatland CO<sub>2</sub> fluxes using satellite remote sensing data. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – Art. No. 818. DOI: 10.3390/rs13040818.
14. Kunz M., Lavric J.V., Gasche R., Gerbig C., Grant R.H., Koch F.T., Schumacher M., Wolf B., Zeeman M. Surface flux estimates derived from UAS-based mole fraction measurements by means of a nocturnal boundary layer budget approach. // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2020. – Vol. 13. – pp. 1671–1692. DOI: 10.5194/amt-13-1671-2020.
15. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO<sub>2</sub> within a forest canopy. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2008. – Vol. 148. – pp. 1777–1797.

16. Maksyutov S., Oda T., Saito M. et al. Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes based on the NIES-TM-FLEXPART coupled transport model and its adjoint. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021. – Vol. 21. – pp. 1245–1266. DOI: 10.5194/acp-21-1245-2021.
17. Mukhartova I., Sogachev A., Gibadullin R., Pridacha V., Kerimov I., Olchev A. An Inverse Modeling approach for retrieving high-resolution surface fluxes of greenhouse gases from measurements of their concentrations in the atmospheric boundary layer. // *Remote Sensing*. – 2024 – Vol. 16. – Art. No. 2502. DOI: 10.3390/rs16132502.
18. Nocedal J., Oztoprak F. Waltz R.A. An interior point method for nonlinear programming with infeasibility detection capability. // *Optimization Methods and Software*. – 2014. – Vol. 29. – pp. 837–854.
19. 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.
20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T. et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2004. – Vol. 123. – pp. 159–176.
21. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K. et al. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO<sub>2</sub> emissions of anthropogenic point sources. // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2021. – Vol. 14. – pp. 153–172. DOI: 10.5194/amt-14-153-2021.
22. Shaw J.T., Shah A., Yong H., Alle G. Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: A review. // *Philosophical Transactions A*. – 2021. – Vol. 379. – pp. 1–21. DOI: 10.1098/rsta.2020.0450.
23. Villarreal S., Vargas R. Representativeness of FLUXNET sites across Latin America. // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2021. – Vol. 126. – pp. 1–18. DOI: 10.1029/2020JG006090.

## References

1. Elizarova T.G. Quasi-gas dynamic equations and methods for calculating viscous flows. Moscow. Nauchnyi Mir. 2007. 351 p. (In Russ.)
2. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Geophysical research on the carbon polygon on the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004. (In Russ.)
3. Mukhartova I.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.)
4. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 2012. p. 438.
5. Baldocchi D., Falge E., Gu L. et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001. Vol. 82. Issue 11. pp. 2415–2434.
6. Blanken P.D., Williams M.W., Burns S.P., Monson R.K., Knowles J., Chowanski K., Ackerman T. A comparison of water and carbon dioxide exchange at a windy alpine tundra and subalpine forest site near Niwot Ridge. *Colorado Biogeochemistry*. 2009. Vol. 95. pp. 61–76.
7. Bolek A., Heimann M., Gockede M. UAV-based in situ measurements of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes over complex natural ecosystems. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2024 Vol. 17. pp. 5619–5636. DOI: 10.5194/amt-17-5619-2024.
8. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln- Nebraska: LI-COR Biosciences. 2013. 354 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.4247.8561.

9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D. et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO<sub>2</sub> fluxes at three forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148. Issue 1. pp. 12–24.
10. IPCC, 2022: Climate Change – 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of working group ii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. H.-O. Portner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. et al. Cambridge. Cambridge University Press. 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
11. Jagermeyr J., Gerten D., Lucht W., Hostert P., Migliavacca M., Nemani R. A high-resolution approach to estimating ecosystem respiration at continental scales using operational satellite data. *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. Issue 4. pp. 1191–1210.
12. Jin Z., Tian X., Wang Y., Zhang H., Zhao M., Wang T., Ding J., Piao S. A global surface CO<sub>2</sub> flux dataset (2015–2022) inferred from OCO-2 retrievals using the GONGGA inversion system. *Earth System Science Data*. 2024. Vol. 16. Issue 6. pp. 2857–2876. DOI: 10.5194/essd-16-2857-2024.
13. Junttila S., Kelly J., Kljun N. et al. Upscaling northern peatland CO<sub>2</sub> fluxes using satellite remote sensing data. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Art. No. 818. DOI: 10.3390/rs13040818.
14. Kunz M., Lavric J.V., Gasche R., Gerbig C., Grant R.H., Koch F.T., Schumacher M., Wolf B., Zeeman M. Surface flux estimates derived from UAS-based mole fraction measurements by means of a nocturnal boundary layer budget approach. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. Vol. 13. pp. 1671–1692. DOI: 10.5194/amt-13-1671-2020.
15. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO<sub>2</sub> within a forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148. pp. 1777–1797.
16. Maksyutov S., Oda T., Saito M. et al. Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes based on the NIES-TM–FLEXPART coupled transport model and its adjoint. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. pp. 1245–1266. DOI: 10.5194/acp-21-1245-2021.
17. Mukhartova I., Sogachev A., Gibadullin R., Pridacha V., Kerimov I., Olchev A. An Inverse Modeling approach for retrieving high-resolution surface fluxes of greenhouse gases from measurements of their concentrations in the atmospheric boundary layer. *Remote Sensing*. 2024 Vol. 16. Art. No. 2502. DOI: 10.3390/rs16132502.
18. Nocedal J., Oztoprak F. Waltz R.A. An interior point method for nonlinear programming with infeasibility detection capability. *Optimization Methods and Software*. 2014. Vol. 29. pp. 837–854.
19. 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.
20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkinen K., Vesala T. et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004. Vol. 123. pp. 159–176.
21. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K. et al. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO<sub>2</sub> emissions of anthropogenic point sources. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. pp. 153–172. DOI: 10.5194/amt-14-153-2021.
22. Shaw J.T., Shah A., Yong H., Alle G. Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: A review. *Philosophical Transactions A*. 2021. Vol. 379. pp. 1–21. DOI: 10.1098/rsta.2020.0450.
23. Villarreal S., Vargas R. Representativeness of FLUXNET sites across Latin America. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. Vol. 126. pp. 1–18. DOI: 10.1029/2020JG006090.



УДК 556.535.8+556.164

DOI: 10.46698/v4085-2895-7461-d

Оригинальная статья

## Влияние р. Северский Донец на ионный состав воды нижнего течения р. Дон

А.Д. Сазонов 

Гидрохимический институт, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 198;  
Южный научный центр Российской академии наук,  
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41,  
e-mail: alexei.sazonow2016@ya.ru

Статья поступила: 23.09.2025, доработана: 10.11.2025, принята к публикации: 12.11.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Нижнее течение р. Дон имеет важное хозяйственное значение на Юге России. Это диктует необходимость исследования наиболее значимых факторов воздействия на гидролого-гидрохимический режим реки. Река Северский Донец – самый крупный приток р. Дон, поэтому ее влияние на р. Дон представляет научный интерес и практическую значимость. **Цель исследования** – изучить влияние р. Северский Донец на трансформацию ионного состава воды р. Дон с современным период (2000–2024 гг.). **Методы.** Влияние р. Северский Донец на ионный состав воды р. Дон было оценено при сравнении многолетних гидрохимических данных пунктов наблюдений, расположенных выше и ниже впадения притока в р. Дон (г. Константиновск и г. Семикаракорск). Работа выполнена на основе данных Государственной наблюдательной сети Росгидромета о содержании в воде р. Дон главных ионов (по сумме), хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, кальция, соединений магния, натрия и калия (по сумме) за период с 2000 по 2024 гг. Также были использованы материалы экспедиционных исследований об удельной электропроводности речной воды, измеренной с применением гидрологического зонда Fuscini FS080114 (экспедиция ЮНЦ РАН на НИС «Профессор Панов» в апреле 2025 г.). **Результаты.** В результате статистического анализа используемых материалов было выявлено влияние р. Северский Донец на увеличение в нижнем течении р. Дон показателя минерализации воды и содержания в ней хлоридов и кальция. Эти результаты были подтверждены экспедиционными материалами, которые свидетельствуют об увеличении удельной электрической проводимости воды в нижнем течении р. Дон. Ниже впадения притока также отмечалось изменение класса и группы вод (по классификации О.А. Алекина). Полученные результаты могут стать основой для проведения дополнительных исследований влияния р. Северский Донец на содержание в воде нижнего течения р. Дон других веществ.

**Ключевые слова:** минерализация, смешение вод, главные ионы, электропроводность, приток, р. Северский Донец.

**Благодарности:** Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № гос. рег. 125012100503-4.

**Для цитирования:** Сазонов А.Д. Влияние р. Северский Донец на ионный состав воды нижнего течения р. Дон. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 249–258. DOI: 10.46698/v4085-2895-7461-d

DOI: 10.46698/v4085-2895-7461-d

Original paper

## The influence of the Seversky Donets River on the ionic composition of the water in the lower reaches of the Don River

A.D. Sazonov 

Hydrochemical Institute, 198 Stachki Ave., Rostov-on-Don 344090,  
Russian Federation;  
Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,  
41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation,  
e-mail: alexei.sazonow2016@ya.ru

Received: 23.09.2025, revised: 10.11.2025, accepted: 12.11.2025

**Abstract: Relevance.** The lower reaches of the Don River are of great economic importance for Southern Russia. This necessitates the study of the most significant factors influencing the hydrological and hydrochemical regime of the river. The Seversky Donets River is the largest tributary of the Don River, so its impact on the Don River is of scientific interest and practical significance. **Aim.** The aim of the study is to study the impact of the Seversky Donets River on the transformation of the ionic composition of the Don River water in the modern period (2000–2024). **Methods.** The impact of the Seversky Donets River on the ionic composition of the Don River water was assessed by comparing long-term hydrochemical data from observation points located upstream and downstream of the tributary's mouth in the Don River (Konstantinovsk and Semikarakorsk). The work was based on the data of the State Observation Network of Roshydromet on the ion content in the water of the Don River main ions (in total), chlorides, sulfates, bicarbonates, calcium, magnesium, sodium and potassium compounds (in total) for the period from 2000 to 2024. The materials of expeditionary studies on the specific electrical conductivity of river water, measured using the Fuscin FS080114 hydrological probe (expedition of the Southern Scientific Center of the RAS on the research vessel "Professor Panov" in April 2025) were also used. **Results.** Statistical analysis of the used materials revealed the influence of the Seversky Donets River on the increase in water mineralization and the content of chlorides and calcium in the lower reaches of the Don River. These results were confirmed by the expeditionary data, which indicate an increase in the specific electrical conductivity of water in the lower reaches of the Don River. A change in the water class and group (according to O.A. Alekin's classification) was also noted below the tributary's confluence. The obtained results can serve as a basis for conducting additional research on the influence of the Seversky Donets River on the content of other substances in the water of the lower Don River.

**Keywords:** mineralization, water mixing, main ions, electrical conductivity, tributary, Seversky Donets River.

**Acknowledgments:** The publication was prepared within the framework of the State Assignment of the SSC RAS for 2025, No. 125012100503-4.

**For citation:** Sazonov A.D. The influence of the Seversky Donets River on the ionic composition of the water in the lower reaches of the Don River. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 249–258. DOI: 10.46698/v4085-2895-7461-d

### Введение

Река Северский Донец – самый крупный приток р. Дон, впадающий в него в нижнем течении с правого берега на расстоянии 185 км от устья в пределах Ростовской области. Площадь водосборного бассейна р. Северский Донец составляет 23 %

от общей площади Донского бассейна [Лурье, Панов, 2018]. Бассейн р. Северский Донец расположен в пределах территории, испытывающей значительную антропогенную нагрузку. В результате поступления в речную сеть загрязненных подземных вод отмечалось увеличение минерализации воды и содержания в ней главных ионов из-за последствий угледобычи в Донецком угольном бассейне [Гавришин, 2019; Закруткин и др., 2022; Мохов, 2023; Сазонов, Закруткин, 2024; Kosolapov et al., 2018].

Начиная с 2007 г. по настоящее время наблюдается самый длительный за всю историю наблюдений маловодный период р. Дон, вызванный масштабными климатическими изменениями [Матишов, Григоренко, 2024; Georgiadi et al., 2023]. По причине сокращения водного стока в последние годы, особое внимание следует уделить наиболее значимым потенциальным источникам поступления растворенных веществ в реки, поскольку потенциал разбавления загрязняющих веществ в современных климатических условиях снижен [Michelle et al., 2023]. Целью настоящего исследования являлось изучение влияния р. Северский Донец на трансформацию ионного состава воды р. Дон в современный период (2000–2024 гг.).

### Материалы и методы исследований

Материалами настоящей работы послужили первичные гидрохимические данные Государственной наблюдательной сети Росгидромета за период 2000–2024 гг. по данным пунктов наблюдений г. Константиновск и г. Семикаракорск, расположенных соответственно на расстоянии 18 км выше и 7 км ниже впадения р. Северский Донец в р. Дон (рис. 1).



Рис. 1. Схема участка впадения р. Северский Донец в р. Дон /  
Fig. 1. Scheme of the confluence of the Seversky Donets river into the Don river

Общий объем первичных гидрохимических данных составил более 2300 определений о концентрациях в воде р. Дон суммарного содержания главных ионов (минерализация), сульфатов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), хлоридов ( $\text{Cl}^-$ ), гидрокарбонатов ( $\text{HCO}_3^-$ ), соединений магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ), кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), суммы натрия и калия ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ).

Сравнительный статистический анализ гидрохимических данных производился с использованием критерия Вилкоксона [Hinton, 2024]. За порог статистической значимости принимался 5%-ный уровень ( $p \leq 0,05$ ). Графическое отображение полученных результатов производилось в Microsoft Office Excel (версия Excel 2019).

Также в работе использованы материалы экспедиционных исследований: данные об удельной электропроводности (УЭ) воды, полученные в ходе экспедиционного рейса на НИС «Профессор Панов» 5 апреля 2025 г. с применением гидрологического зонда Fuscin FS080114.

Как известно, УЭ природной воды зависит от степени ее минерализации [Beygian et al., 2025; Ita, 2022; McCleskey et al., 2011; Pouchoulin et al., 2020]. Привлечение данных по показателю УЭ воды хорошо себя зарекомендовало с точки зрения изучения процессов смешивания вод различного происхождения [Aluwong et al., 2024; Horiguchi et al., 2023]. В 2024 году нами были проведены исследования УЭ воды нижнего течения р. Дон, в результате которых было показано, что в направлении вниз по течению реки наблюдается увеличение УЭ воды [Сазонов, Клещенко, 2025]. Полученные результаты согласовались с пространственной неоднородностью минерализации воды р. Дон, которая была изучена ранее с привлечением массива многолетних гидрохимических данных [Никаноров и др., 2004; Хованский, Приваленко, 1990]. Это подтверждает целесообразность использования показателя УЭ в контексте настоящей работы.

Результаты исследований и их обсуждения

При рассмотрении влияния водных объектов друг на друга целесообразно сопоставить их гидрологические параметры. Наблюдения за расходами воды в р. Северский Донец проводятся в г. Белая Калитва, р. Дон – в ст-це Раздорской (34 км ниже впадения притока). На гистограмме представлена информация об их водном стоке (рис. 2).

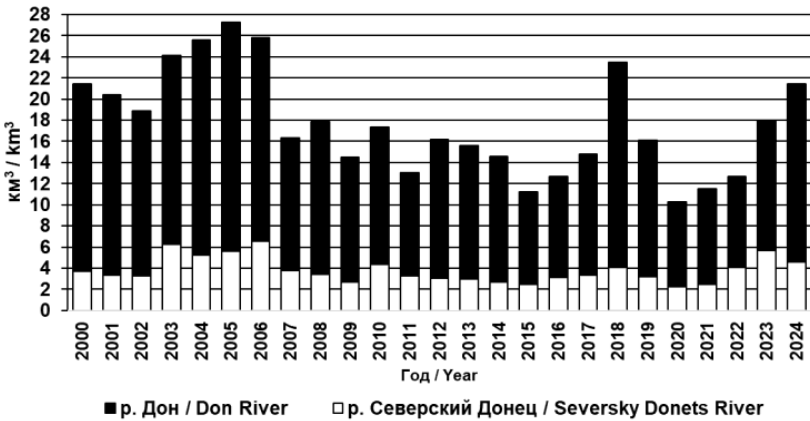


Рис. 2. Доля водного стока р. Северский Донец в водном стоке р. Дон /  
Fig. 2. The share of water flow of the Seversky Donets river in the water flow of the Don river

Среднемноголетний водный сток р. Дон составлял 17,6 км³, р. Северский Донец – 3,8 км³: р. Северский Донец за последние десятилетия обеспечивала от 16 до 32 % водного стока нижнего течения р. Дон (в среднем 22 %). Дополнительно был рассчитан перенос веществ с водой р. Северский Донец по методике согласно РД 52.24.748-2010 (табл. 1). Полученные результаты характеризуют масштаб поступления веществ в р. Дон с водой притока.

Таблица 1 / Table 1

Перенос веществ в р. Северский Донец, тыс. тонн /  
Transport of substances into the Seversky Donets river, thousand tons

| Вещество / Dissolved substance             | Период / Period       |                       |
|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                            | 2001–2012 гг. / years | 2013–2024 гг. / years |
| Сумма главных ионов / Main ions (by total) | 5450                  | 5115                  |
| Сульфаты / Sulfates                        | 1639                  | 1448                  |



|                                                        |      |      |
|--------------------------------------------------------|------|------|
| Гидрокарбонаты / Hydrocarbonates                       | 1216 | 1115 |
| Хлориды / Chlorides                                    | 980  | 994  |
| Сумма натрия и калия / Sodium and potassium (in total) | 733  | 866  |
| Кальций / Calcium                                      | 657  | 461  |
| Соединения магния / Magnesium compounds                | 225  | 231  |

Стоит отметить, что в 2001–2012 гг. среднемноголетний водный сток реки достигал 4,2 км<sup>3</sup>, в 2013–2024 гг. – 3,4 км<sup>3</sup>, что неоднозначно отразилось на изменении переноса вышеперечисленных веществ. Наблюдалось заметное сокращение переноса с водой р. Северский Донец главных ионов (по сумме), сульфатов и кальция. Транспорт суммы натрия и калия, напротив, возрос. Перенос гидрокарбонатов, хлоридов и соединений магния находился на относительно стабильном уровне.

Рассмотрим влияние р. Северский Донец на изменение ионного состава воды р. Дон. Ниже представлены результаты сопоставления среднемноголетних значений минерализации донской воды и содержания в ней главных ионов выше и ниже впадения притока (рис. 3). По итогам проведенного анализа было выявлено статистически значимое отличие содержания в воде суммы главных ионов (минерализация), хлоридов и кальция – их содержание в р. Дон после впадения притока возрастало.

Медианное значение минерализации воды по данным пункта наблюдений г. Константиновск за период 2000–2024 гг. составляло 593 мг/л, в г. Семикаракорск – 798 мг/л (на 35 % больше). Содержание в воде хлоридов отличалось на 31 % (99 и 133 мг/л), кальция – на 20 % (61 и 73 мг/л). Концентрации других веществ в значимой степени не отличались.

В качестве подтверждения представленных результатов дополнительно служат данные об УЭ воды, полученные в ходе экспедиции на 5 станциях (рис. 4).

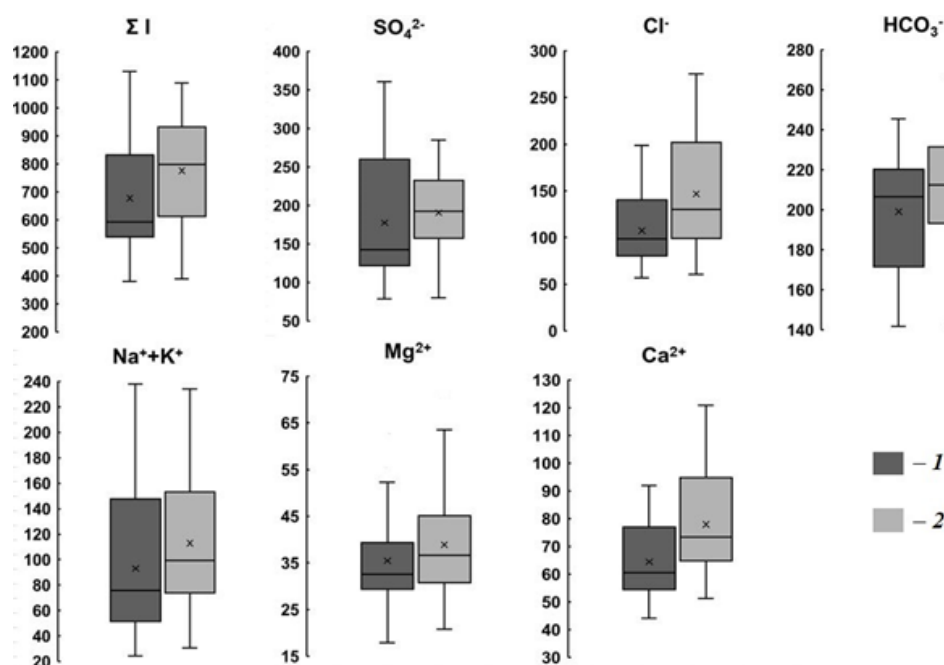


Рис. 3. Диаграммы размаха среднегодовых значений минерализации воды ( $\Sigma I$ ) р. Дон и содержания в ней главных ионов выше (1) и ниже (2) впадения р. Северский Донец, мг/л /

Fig. 3. Diagrams of the range of average annual values of mineralization ( $\Sigma I$ ) of the Don river water and the content of the main ions in it above (1) and below (2) the confluence of the Seversky Donets river, mg/l

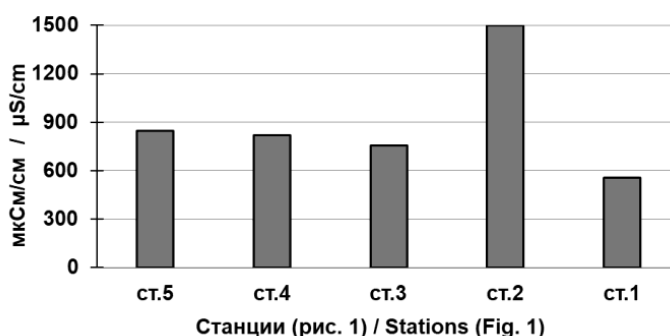


Рис. 4. Электропроводность воды в рр. Дон и Северский Донец /  
Fig. 4. Electrical conductivity of water in the Don and Seversky Donets rivers

Измерение этого параметра в донской воде было проведено на станциях, расположенных на р. Дон и на устьевом участке р. Северский Донец (рис. 1). Было отмечено, что выше впадения притока УЭ донской воды (ст. 1) составляла 557 мкСм/см. УЭ воды р. Северский Донец была равна 1500 мкСм/см. Ниже впадения р. Северский Донец УЭ воды р. Дон поэтапно возрастала: на ст. 3 она составляла 758 мкСм/см, на ст. 4 – 819 мкСм/см, на ст. 5 – 847 мкСм/см, ниже впадения притока рассматриваемый показатель возрастал соответственно на 36, 47 и 52 %.

Постепенное увеличение электропроводности на фоне отсутствия каких-либо других крупных источников поступления главных ионов в р. Дон может указывать на поэтапный процесс перемешивания воды р. Северский Донец с водой р. Дон. Одним из факторов интенсивного перемешивания вод может служить Кочетовский гидроузел, расположенный на р. Дон (рис. 1).

Для оценки степени влияния притока на ионный состав р. Дон была также рассмотрена трансформация класса и группы донской воды выше и ниже впадения р. Северский Донец согласно общепринятой классификации О.А. Алекина [Алекин, 1953] (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Классификация воды р. Дон по ионному составу выше и ниже впадения р. Северский Донец / Classification of water of the Don River by ionic composition above and below the confluence of the Seversky Donets river**

| Год / Year | Выше впадения /<br>Above the confluence |                | Ниже впадения /<br>Below the confluence |                |
|------------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
|            | Класс / Class                           | Группа / Group | Класс / Class                           | Группа / Group |
| 2000       | SCl                                     | CaMg           | CCl                                     | Ca             |
| 2001       | C                                       | MgCa           | C                                       | Ca             |
| 2002       | SCl                                     | NaCa           | SCl                                     | Na             |
| 2003       | CCl                                     | CaMg           | SC                                      | NaCa           |
| 2004       | CS                                      | Ca             | SC                                      | CaMg           |
| 2005       | C                                       | CaMg           | CS                                      | CaMg           |
| 2006       | C                                       | CaMg           | CS                                      | CaMg           |
| 2007       | CS                                      | Na             | CS                                      | Na             |
| 2008       | CS                                      | NaMg           | S                                       | Na             |
| 2009       | CS                                      | NaMg           | SC                                      | Na             |
| 2010       | CS                                      | CaMg           | CS                                      | CaNa           |

|      |     |      |     |      |
|------|-----|------|-----|------|
| 2011 | CS  | NaCa | SC  | NaCa |
| 2012 | ClS | Na   | SCl | NaMg |
| 2013 | S   | Ca   | SCl | NaCa |
| 2014 | S   | Na   | ClS | Na   |
| 2015 | S   | Na   | ClS | Na   |
| 2016 | S   | Na   | SCl | Na   |
| 2017 | CS  | Na   | Cl  | Na   |
| 2018 | S   | Na   | ClS | Na   |
| 2019 | S   | Na   | Cl  | CaMg |
| 2020 | ClC | CaMg | ClC | CaMg |
| 2021 | Cl  | CaMg | Cl  | NaCa |
| 2022 | SCl | Mg   | SCl | Na   |
| 2023 | S   | Na   | ClC | Ca   |
| 2024 | Cl  | Na   | SCl | CaNa |

Согласно полученным результатам, наблюдалась трансформация ионного состава донской воды ниже впадения р. Северский Донец: изменение класса и группы вод (по среднегодовым значениям) отмечено в 92 % случаев, что свидетельствует о значительном влиянии притока. Осреднение данных за многолетние периоды позволяет сделать вывод, что в 2000–2012 гг. ионный состав воды ниже впадения притока изменялся от гидрокарбонатно-сульфатного класса кальциево-магниевого группы до сульфатно-гидрокарбонатного класса натриево-кальциевой группы, в 2013–2024 гг. – от сульфатно-хлоридного класса натриевой группы в сторону хлоридно-сульфатного класса натриево-кальциевой группы.

### Выводы

1. За период с 2000 по 2024 гг. доля водного стока р. Северский Донец составляла в среднем 22 % от водного стока в нижнем течении р. Дон.
2. Результаты обработки многолетних гидрохимических данных свидетельствуют о влиянии р. Северский Донец на увеличение минерализации воды нижнего течения р. Дон (на 35 %) и содержания в ней хлоридов (на 31 %) и кальция (на 20 %).
3. Результаты экспедиционных исследований выявили влияние р. Северский Донец на увеличение удельной электропроводности воды нижнего течения р. Дон.
4. В 92 % случаев наблюдалась трансформация воды по ионному составу по классификации А.О. Алекина: изменялись класс и группа вод.

### Литература

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1953. – 296 с.
2. Гавришин А.И. Оценка качества химического состава поверхностных вод в восточном Донбассе. // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. – № 4. – С. 61–67. DOI: 10.31857/S0869-78092019461-67.
3. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк В.Н. Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002.
4. Лурье П.М., Панов В.Д. Река Дон: Гидрография и режим стока. Ростов н/Д: Донской издательский дом, 2018. – 592 с.

5. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Геоэкологический феномен в условиях маловодья и зарегулирования реки Дон. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2024. – Т. 519. № 1. – С. 560–566. DOI: 10.31857/S2686739724110201.
6. Мохов А.В. Минерогенический аспект накопления сульфат- и гидрокарбонат-ионов в шахтных водах (на примере Восточного Донбасса). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 188–197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015.
7. Никаноров А.М., Иваник В.М., Пирумова Е.И. Тенденции многолетних изменений солевого состава воды р. Дон в нижнем течении. // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 11. – С. 83–89.
8. Сазонов А.Д., Закруткин В.Е. Гидрохимические особенности реки Тузлов как индикатор последствий хозяйственной деятельности в Восточном Донбассе (Ростовская область). // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2024. – № 1. – С. 73–82. DOI: 10.31857/S0869780924010084.
9. Сазонов А.Д., Клещенков А.В. О результатах инструментальных измерений удельной электрической проводимости воды в нижнем течении р. Дон в 2024 г. // Астраханский вестник экологического образования. – 2025. – № 2(86). – С. 21–24. DOI: 10.36698/2304-5957-2025-2-21-24.
10. Хованский А.Д., Приваленко В.В. Геохимическая оценка состояния речной системы Нижнего Дона. Ростов н/Д: Издательство Ростовского университета, 1990. – 144 с.
11. Aluwong K.C., Hashim M.H.M., Ismail S., Shehu S.A. Modeling pH changes and electrical conductivity in surface water as a result of mining activities. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2024. – No. 1. – pp. 122–131. DOI: 10.33271/nvngu/2024-1/122.
12. Beygian A.M., Alamdari E.K., Kargari A. Ion concentrations models utilizing convenient pH and electrical conductivity measurements. // *Journal of Molecular Liquids*. – 2025. – Vol. 427. – Art. No. 127444. DOI: 10.1016/j.molliq.2025.127444.
13. Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water flow changes in the Don River (European Russia) during 1891–2019. // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2023. – Vol. 16. No. 2. – pp. 6–17. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-083.
14. Hinton P.R. *Statistics explained*. – Routledge. Taylor & Francis Group, 2024. – 358 p.
15. Horiguchi H., Shigemura K., Kitakawa M., Nakazawa M., Noyori T., Inoue M., Onishi R., Moriwaki M., Yoshimura C., Kobayashi M., Suzuki T. Electrical conductivity as an indicator to assess the suitability of river water for recreational use. // *Journal of Water and Environment Technology*. – 2023. – Vol. 21. No. 4. – pp. 204–212. DOI: 10.2965/jwet.22-127.
16. Kosolapov A.E., Usova E.V., Lysenko V.S., Krasnov V.P. 15-year dynamics of nitrate and ammonium ion concentrations in Seversky Donets river, Azov sea basin. // *International Journal of Environmental Research*. – 2018. – Vol. 12. No. 6. – pp. 921–927. DOI: 10.1007/s41742-018-0147-2.
17. Ita Eregho U. Relationship between electrical conductivity and some mineral composition of Benin Rivers. // *Pakistan Journal of Scientific & Industrial Research Series A: Physical Sciences*. – 2022. – Vol. 65. No. 2. – pp. 104–111.
18. McCleskey R.B., Nordstrom D.K., Ryan J.N. Electrical conductivity method for natural waters. // *Applied Geochemistry*. – 2011. – Vol. 26. – pp. 227–229. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.03.110.
19. Michelle T.H. van Vliet, Thorslund J., Strokal M., Hofstra N., Florke M., Macedo H.E., Nkwasa A., Tang T., Kaushal S.S., Kumar R., A. van Griensven, Bouwman L., Mosley L.M. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2023. – Vol. 4. No. 10. – pp. 687–702. DOI: 10.1038/s43017-023-00472-3.
20. Pouchoulin S., Coz J. Le., Mignot E., Gond L., Riviere N. Predicting transverse mixing efficiency downstream of a river confluence. // *Water Resources Research*. – 2020. – Vol. 56. No. 10. – Art. No. e2019WR026367. DOI: 10.1029/2019WR026367.



## References

1. Alekin O.A. Basics of Hydrochemistry. Leningrad. Hydrometeorological Publishing House. 1953. 296 p. (In Russ.)
2. Gavrishin A.I. Evaluation of chemical composition quality of surface water in the Eastern Donbass. *Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2019. No. 4. pp. 61–67. DOI: 10.31857/S0869-78092019461-67. (In Russ.)
3. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak V.N. Chemical composition and certain features of mineral formation in the river sediments of the Seversky Donets River basin (within the Rostov region). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002. (In Russ.)
4. Lurye P.M., Panov V.D. The Don River: Hydrography and flow regime. Rostov-on-Don. Don Publishing House. 2018. 592 p. (In Russ.)
5. Matishov G.G., Grigorenko K.S. Geoecological phenomenon in the lack of water conditions and regulation of the Don River. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2024. Vol. 519. No. 1. pp. 560–566. DOI: 10.31857/S2686739724110201. (In Russ.)
6. Mokhov A.V. Mineragenic aspect of the accumulation of sulfate and hydrocarbonate ions in mine waters (on the example of Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13, No. 4. pp. 188–197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015. (In Russ.)
7. Nikanorov A.M., Ivanik V.M., Pirumova E.I. Trends in long-term changes in the salt composition of the Don River water in the lower reaches. *Meteorology and Hydrology*. 2004. No. 11. pp. 83–89. (In Russ.)
8. Sazonov A.D., Zakrutkin V.E. Hydrochemical features of the Tuzlov River as an indicator of the consequences of economic activity in the Eastern Donbass (Rostov Region). *Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2024. No. 1. pp. 73–82. DOI: 10.31857/S0869780924010084. (In Russ.)
9. Sazonov A.D., Kleshchenkov A.V. On the results of instrumental measurements of the specific electrical conductivity of water in the lower reaches of the Don River in 2024. *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2025. No. 2(86). pp. 21–24. DOI: 10.36698/2304-5957-2025-2-21-24. (In Russ.)
10. Khovansky A.D., Privalenko V.V. Geochemical assessment of the state of the Lower Don river system. Rostov-on-Don. Rostov University Publishing House. 1990. 144 p. (In Russ.)
11. Aluwong K.C., Hashim M.H.M., Ismail S., Shehu S.A. Modeling pH changes and electrical conductivity in surface water as a result of mining activities *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. No. 1. pp. 122–131. DOI: 10.33271/nvngu/2024-1/122.
12. Beygian A.M., Alamdari E.K., Kargari A. Ion concentrations models utilizing convenient pH and electrical conductivity measurements. *Journal of Molecular Liquids*. 2025. Vol. 427. Art. No. 127444. DOI: 10.1016/j.molliq.2025.127444.
13. Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water flow changes in the Don River (European Russia) during 1891–2019. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. Vol. 16. No. 2. pp. 6–17. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-083.
14. Hinton P.R. *Statistics explained*. Routledge Taylor & Francis Group. 2024. 358 p.
15. Horiguchi H., Shigemura K., Kitakawa M., Nakazawa M., Noyori T., Inoue M., Onishi R., Moriwaki M., Yoshimura C., Kobayashi M., Suzaki T. Electrical conductivity as an indicator to assess the suitability of river water for recreational use. *Journal of Water and Environment Technology*. 2023. Vol. 21. No. 4. pp. 204–212. DOI: 10.2965/jwet.22-127.
16. Kosolapov A.E., Usova E.V., Lysenko V.S., Krasnov V.P. 15-year dynamics of nitrate and ammonium ion concentrations in Seversky Donets river, Azov sea basin. *International Journal of Environmental Research*. 2018. Vol. 12. No. 6. pp. 921–927. DOI: 10.1007/s41742-018-0147-2.
17. Ita Eregho U. Relationship between electrical conductivity and some mineral composition of Benin Rivers. *Pakistan Journal of Scientific & Industrial Research Series A: Physical Sciences*. 2022. Vol. 65. No. 2. pp. 104–111.

18. McCleskey R.B., Nordstrom D.K., Ryan J.N. Electrical conductivity method for natural waters. *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26. pp. 227–229. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.03.110.
19. Michelle T.H. van Vliet, Thorslund J., Strokal M., Hofstra N., Flörke M., Macedo H.E., Nkwasa A., Tang T., Kaushal S.S., Kumar R., A. van Griensven, Bouwman L., Mosley L.M. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. No. 10. pp. 687–702. DOI: 10.1038/s43017-023-00472-3.
20. Pouchoulin S., Coz J. Le., Mignot E., Gond L., Riviere N. Predicting transverse mixing efficiency downstream of a river confluence. *Water Resources Research*. 2020. Vol. 56. No. 10. Art. No. e2019WR026367. DOI 10.1029/2019WR026367.

УДК 551.435.6(470.64)

DOI: 10.46698/q1139-5846-0507-q

Оригинальная статья

## Селевая активность в горах Центрального Кавказа в 2025 году

В.А. Караваев<sup>1</sup>, А.Н. Гуня<sup>1</sup>, С.В. Харченко<sup>1,2</sup>, С.С. Семиноженко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт географии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 4,  
е-mail: vadimka\_ig@mail.ru; a.n.gunya@igras.ru; har4enkkoff@yandex.ru;

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1;

<sup>3</sup> Рослесинфорг, Россия, 109316, г. Москва, Волгоградский пр., 45, стр. 1,  
е-mail: grey\_wolf.88@mail.ru

Статья поступила: 07.11.2025, доработана: 15.12.2025, принята в печать: 18.12.2025

**Резюме:** Актуальность исследования вызвана необходимостью выявления причин схода крупных селей, участвовавших в последние десятилетия. **Цель исследования** – выявление специфики течения экзогенных процессов, проявляющихся циклично, и оценка вклада основных факторов в их активность. **Методы исследования** включают полевой мониторинг ключевых объектов – очагов развития экзогенных процессов, анализ графиков основных факторов их развития – осадков, температуры воздуха и сейсмичности, а также диаграмм расчётной величины – переходов температуры через 0° С. Обследования в поле сопровождались высокоточной лидарной съёмкой территории исследования с квадрокоптера, которая позволяет отследить последствия экстремальных экзогенных процессов для ключевых природных территориальных комплексов. Мониторинг экзогенных процессов проводился в долинах рек Черек Балкарский и Карасу на Центральном Кавказе для выявления специфики течения экзогенных процессов и оценки вклада основных факторов в их активность. **Результаты.** Анализ сошедших в 2012 и 2017 гг. крупных селей привел к следующим выводам: сходы были спровоцированы сложением неявных проявлений факторов селевой активности и накоплением критической массы обломочного материала различными склоновыми процессами. По достижении критической массы, даже при слабом воздействии любого из факторов, происходит следующий сход. Факторы: осадки, температура воздуха, сейсмичность, морозное выветривание, морфологию рельефа, состав обломочного материала и его морфологические особенности. На сходы в обоих случаях повлияли слабые землетрясения, а в 2017 г. дополнительно – небольшое повышение температуры воздуха в высокогорье. В июле 2025 г. снова сошли многочисленные крупные сели, в некоторых местах в два этапа.

**Ключевые слова:** цикл, сели, факторы, кумулятивный эффект, Центральный Кавказ.

**Благодарности:** Полевые экспедиционные работы с использованием БПЛА, положенные в основу представленного исследования, проведены при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-17-00143. Анализ данных проводился в соответствии с Государственным заданием Института географии РАН, FMWS 2024-0005 и FMWS 2024-0007.

**Для цитирования:** Караваев В.А., Гуня А.Н., Харченко С.В., Семиноженко С.С. Селевая активность в горах Центрального Кавказа в 2025 году. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 259–296. DOI: 10.46698/q1139-5846-0507-q

DOI: 10.46698/q1139-5846-0507-q

Original paper

## Debris flow activity in the Central Caucasus Mountains in 2025

V.A. Karavaev<sup>1</sup>, A.N. Gunya<sup>1</sup>, S.V. Kharchenko<sup>1,2</sup>, S.S. Seminozhenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,  
29/4 Staromonetnyi per., Moscow 119017, Russian Federation,  
e-mail: vadimka\_ig@mail.ru; a.n.gunya@igras.ru; xar4enkkoff@yandex.ru;

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991,  
Russian Federation;

<sup>3</sup> Roslesinforg, 45/1 Volgogradsky pr., Moscow 109316, Russian Federation,  
e-mail: grey\_wolf.88@mail.ru

Received: 07.11.2025, revised: 15.12.2025, accepted: 18.12.2025

**Abstract:** The relevance of the study is caused by the need to identify the causes of large mudflows, which have become more frequent in recent decades. **The aim** of the study is to identify the specific features of cyclical exogenous processes and assess the contribution of the main factors to their activity. **Research methods** include field monitoring of key objects – the sources of exogenous processes, analysis of graphs showing the main factors of their development (precipitation, air temperature and seismicity), as well as diagrams of the calculated value – temperature transitions through 0° C. Field surveys were accompanied by high-precision LiDAR survey of the study area from a quadcopter, which allows tracking the consequences of extreme exogenous processes on key natural territorial complexes. Monitoring of exogenous processes was carried out in the valleys of the Cherek Balkarsky and Karasu rivers in the Central Caucasus to identify the specific features of the exogenous processes and assess the contribution of the main factors to their activity. **Results.** Analysis of large mudflows that occurred in 2012 and 2017 led to the following conclusion: the flows were triggered by the combination of subtle manifestations of mudflow activity factors, including the accumulation of a critical mass of debris by various slope processes. Once the critical mass is reached, even a weak impact from any of the factors, triggers the next mudflow. The factors include precipitation, air temperature, seismicity, frost weathering, morphology of relief, the composition of the debris, and its morphological features. In both cases, the flows were influenced by weak earthquakes and, in 2017, by a slight increase in air temperature in the highlands. In July 2025, numerous large mudflows occurred again, in some places in two stages.

**Keywords:** cycle, mudflow, factors, cumulative effect, Central Caucasus.

**Acknowledgments:** The based fieldwork, which formed the basis of this study, was supported by Russian Science Foundation Grant No. 25-17-00143. Data analysis was conducted in accordance with State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. FMWS 2024-0005 and No. FMWS 2024-0007.

**For citation:** Karavaev V.A., Gunya A.N., Kharchenko S.V., Seminozhenko S.S. Debris flow activity in the Central Caucasus Mountains in 2025. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 259–269. DOI: 10.46698/q1139-5846-0507-q

### Введение

Цикличность природных процессов, как краткосрочная, так и долговременная, отмечается во многих исследованиях. К последней относится мегацикличность геологической истории Земли, на которую наложены вариации более высоких порядков – циклы Бертрана (150–200 млн лет), Штилле (40–45 млн лет), циклы с пе-



риодом 3–5 млн лет, длительность которых соотносится с ярусным расчленением стратиграфической шкалы фанерозоя, циклами с периодами от 400–100 тыс. лет до 1–2 тыс. лет, наноциклическостью – от 452 до 11–9 лет, а кроме того, годовая и суточная циклическости, связанные со сменой времён года, а также дня и ночи [Хаин, 2003, 2010].

Магнитное поле Земли также подвержено циклическости – геофизической. Так, периодическим 30...45-летним изменениям климата Русской равнины соответствуют фазы активности в этом же временном диапазоне многих метеорологических и геофизических явлений – от тектоники и вулканизма до полярных сияний и магнитных бурь [Боголепов, 1908]. Зависимость геофизических явлений на Земле и в околоземном пространстве – магнитного поля, вулканизма и тектоники – от их космического начала была подтверждена А.Л. Чижевским [Chizhevsky, 1938].

Согласно современным представлениям, георитмы Земли проявляются в диапазонах 2...5, 7...12, 19...22, 80...100, 1800...2000 лет, отражаясь в квазициклическости эндогенных и экзогенных процессов и являясь результатом влияния на литосферу циклически меняющихся космогенных и глобальных геофизических факторов [Максимов, 2005].

В контексте представляемого в статье исследования важно дискуссионное положение о том, что активизация снежных лавин в горах и селей, цунами и землетрясений приходится на максимумы внутривековых и, в особенности, вековых прохладно-влажных периодов и циклов солнечной активности и наиболее проявляется в начале и в конце таковых периодов [Кривенко, 1992]. Как показывают исследования динамики экзогенных процессов в горных регионах, наложение разных факторов значительно осложняет выявление закономерностей, вынуждая детализировать событийную историю, укрупнять масштаб, обращая при этом особое внимание на триггерный эффект [Кюнтцель, 1992; Chen et al., 2022; La Porta et al., 2024; Bhambri et al., 2019; Prenner et al., 2019; Donnini et al., 2023].

### Постановка задачи: цикл экстремальных экзогенных процессов

В горах формируются особенные типы геосистем, обязанные своим происхождением экзогенным процессам – лавинные, селевые, обвально-осыпные и т.д. Выявление и исследование таких комплексов представляет как теоретическую, так и прикладную ценность. Для этого на территории исследования, расположенной на среднегорных и высокогорных участках, с 2009 г. регулярно обследуется 10 ключевых, наиболее репрезентативных, очагов развития экстремальных экзогенных процессов: селево-лавиновых комплексов Метиан-Суу<sup>1</sup> (в верховьях р. Черка Балкарского), Тютюн-Су (в среднем его течении), Ахсу и Ортозюрк (притоки р. Карасу в её верхнем течении), безымянного ручья в долине р. Лъкези, оползня в долине р. Карасу, очагов активности обвально-осыпных процессов в долине Лъкези и на участках, примыкающих к ледникам Штулу Западный и Штулу Восточный, а также осыпи в верхнем течении р. Черка Балкарского. Мониторинг экзогенных процессов и анализ факторов их активности проводится для выявления специфики течения, оценки вклада основных факторов в их активность и отслеживания динамики природных территориальных комплексов ключевых объектов.

<sup>1</sup> Мы приводим название этой реки по дорожному знаку, установленному на федеральной трассе. В Реестре зарегистрированных в АГКГН географических названий объектов на 24.03.2025 Кабардино-Балкарской Республики и на многих картах она называется Ортозюрк.

В 2012 г. и 2017 г. в отсутствие существенных осадков и высокой температуры воздуха в высокогорье, которая обеспечила бы таяние ледников и снежников, питающих селево-лавиновые геосистемы, там сошли крупные сели. Это подвело нас к гипотезе, согласно которой сходы были спровоцированы сложением, возможно, неявных, одновременных или предварительных проявлений как основных, так и второстепенных факторов селевой активности по накоплению критической массы обломочного материала различными склоновыми процессами [Караваев, Семиоженко, 2016]. В таких условиях даже небольшое поступление воды способно вывести систему из равновесия. Также мы предположили, что подобная ситуация повторяется периодически, а процессы, предвещающие сходы селей и обеспечивающие накопление материала и влагозарядку грунта, образуют цикл.

Суть цикла состоит в том, что экстремальные экзогенные процессы, связанные с накоплением и перемещением обломочного материала – обвально-осыпные процессы и сели – подвержены цикличности. Схема цикла: после схода крупных селей в горном ландшафте в результате обвально-осыпных, русловых процессов, сходов лавин начинает накапливаться обломочный материал. По достижении критической массы, даже при слабом воздействии любого из факторов, случается следующий сход. Основные факторы, приводящие к формированию цикла: осадки, температура воздуха, сейсмичность [Караваев и др., 2022]<sup>2</sup>, морозное выветривание, морфометрические показатели рельефа, состав обломочного материала и его морфологические особенности<sup>3</sup>, ландшафт в целом [Васьков и др., 2023]. Новизной подхода является совместный анализ различных факторов, который позволил выявлять «кумулятивный эффект», при котором складываются даже слабые их проявления, способные вызвать финальный сход селя, завершающий цикл. Стабильному его течению способствует соответствие средним многолетним трендам как абсолютных показателей факторов, меняющихся во времени – температуры воздуха, осадков, морозного выветривания, сейсмичности, – так и их временного хода – суточного, недельного, месячного и т.д. После схода селей отмечаются часто медленные процессы динамики и эволюции, которые могут привести к следующему сходу [Novak et al., 2025].

В связи с массовыми сходами крупных селей в различных горных районах Центрального Кавказа во второй половине июля 2025 года возникла необходимость в анализе основных факторов их формирования в предшествующее этому время.

### Методика исследования

Методика исследования основывается с одной стороны, на полевом мониторинге ключевых объектов – очагов развития экзогенных процессов, с другой – на совместном анализе графиков основных факторов их развития – осадков, температуры воздуха и сейсмичности, а также диаграмм расчётной величины – переходов температуры через 0° С, которые характеризуют морозное выветривание, разрушающее горные породы. В 2025 г. методика была дополнена высокоточной лидарной съёмкой территории исследования с квадрокоптера, которая позволяет отследить

<sup>2</sup> Район исследования входит в сейсмически активную южную часть Европейской России – полосу в 200...300 км шириной вдоль государственной границы, где возможны землетрясения интенсивностью до 10 баллов (по 12-балльной шкале интенсивности землетрясений Медведева–Шпонхойера–Карника – MSK-64) [Уломов, 2008].

<sup>3</sup> Учёт этого фактора предполагает изучение характеристик грунтов, провоцирующих их ответные реакции на действия других факторов [Зеркаль, Фоменко, 2016]. В частности, оценку нелинейных свойств грунтов, проявляющихся при сейсмических воздействиях [Заалишвили и др., 2021].

последствия экстремальных экзогенных процессов для ключевых природных территориальных комплексов, которые подверглись их воздействию и оценить восстановительную динамику местных ландшафтов [Ma et al., 2025; Weidner et al., 2021].

### Результаты и их обсуждение

Сошедшие во 2-й половине июля 2025 г. серии крупных селей не только по р. Герхожану (рис. 1), но и в других районах Центрального Кавказа (в частности, в долинах р. Черёка Балкарского, его истоков и притоков) свидетельствуют о завершении цикла экстремальных экзогенных процессов в этом регионе, который продлился 8 лет.



Рис. 1. Прохождение селевого потока через лоток в г. Тырнаузе 31 июля 2025 г. /

Fig. 1. Debris flow passing through a chute in the Tynda city on July 31, 2025

В бассейне Черёка Балкарского во 2-й половине июля 2025 г. сошли многочисленные крупные сели. Очевидной метеорологической предпосылкой послужил сильный ливень, накрывший эти места во второй половине дня 21 июля. В 2025 г. в бассейне Черёка Балкарского летняя погода была в целом теплее и дождливее, чем в предыдущем, но с относительно сухим июлем – месяцем, когда в горах как раз и сошли крупные многочисленные сели: в мае средняя температура составляла  $8,3^{\circ}\text{C}$  – на  $2,3^{\circ}$  выше, чем годом ранее и значительно более влажным –  $146,7\text{ мм}$  – на  $40\text{ мм}$  больше, июнь был значительно, на  $3,5^{\circ}$ , холоднее и влажнее июня прошлого года –  $10,3^{\circ}\text{C}$  при  $90,4\text{ мм}$  осадков, что на  $23\text{ мм}$  больше; в июле, наиболее важном для 2025 года месяце с точки зрения селевой активности, –  $14,6^{\circ}\text{C}$  – на градус выше, чем годом раньше при меньших – на  $30\text{ мм}$ , чем в июле 2024 г. – осадках ( $81,6\text{ мм}$ ); в первой декаде августа –  $14,2^{\circ}\text{C}$  при  $67,1\text{ мм}$  осадков [Архив погоды в Терсколе // [https://rp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2\\_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B\\_%D0%B2\\_%D0%A2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5](https://rp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%A2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5)].

Морозное выветривание в горах Центрального Кавказа в осенне-зимний период 2024/25 годов было намного менее активным по сравнению с аналогичным сезоном

Рис. 2. Факторы формирования экстремальных экзогенных процессов в 2021–25 гг.:  
1 – Фактическая средняя месячная температура воздуха, °C; 2 – Многолетняя средняя месячная температура воздуха, °C; 3 – Температурная аномалия, °C (факт минус многолетнее среднее);



4 – Фактическая месячная сумма осадков, мм; 5 – Многолетняя средняя месячная сумма осадков, мм; 6 – Аномалия осадков, мм (факт минус многолетнее среднее); 7 – Число дней за месяц с переходами температуры через 0 °C; 8 – Расчётная интенсивность землетрясений в баллах по шкале MMI согласно глобальной модели Allen-Wald-Worden (2012), калиброванной для активной коры; 9 – Интенсивность землетрясений в баллах по шкале ШСИ-17, вычисленная по уравнению макросейсмического поля из ГОСТ Р 57546–2017 с коэффициентами для Северного Кавказа /

Fig. 2. Factors forming extreme exogenous processes in 2021–25:

1 – Actual average monthly air temperature, °C; 2 – Long-term average monthly air temperature, °C; 3 – Temperature anomaly, °C (actual minus long-term average); 4 – Actual monthly precipitation, mm; 5 – Long-term average monthly precipitation, mm; 6 – Precipitation anomaly, mm (actual minus long-term average); 7 – Number of days per month with temperature transitions through 0 °C; 8 – Estimated earthquake intensity on the MMI scale according to the global Allen–Wald–Worden model (2012), calibrated for the active crust; 9 – Earthquake intensity in points on the SHSI-17 scale, calculated using the macroseismic field equation from GOST R 57546–2017 with coefficients for the North Caucasus

За последнее пятилетие на территории исследования и в близлежащих районах произошло 10 землетрясений интенсивностью от 2,9 до 5,6 баллов<sup>4</sup>. Наиболее заметное из них случилось в феврале 2023 г.: две волны, прошедшие в один день, имели интенсивность 3,8 и 5,6 баллов. Однако в зимнее, неселеопасное время они могли спровоцировать только сходы снежных лавин. Два аналогичных землетрясения, случившихся утром 2 июня 2024 г. в Кабардино-Балкарии с эпицентрами вблизи Нальчика и села Сармаково соответственно [Терещенко К. Два землетрясения произошли в горах Северного Кавказа // <https://kubnews.ru/obshchestvo/2024/06/02/dva-zemletryaseniya-proizoshli-v-gorakh-severnogo-kavkaza/>. Дата обращения 02.11.2024] не выступили «спусковым механизмом» для селей, как в 2017 г.

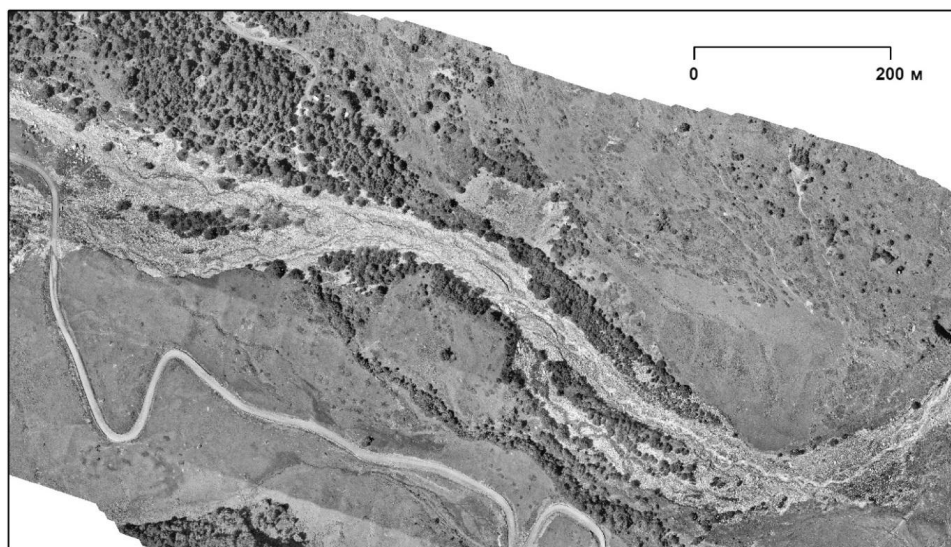
Эти землетрясения случились ещё слишком рано, в самом начале лета, а прохладная погода с небольшим равномерным увлажнением, отличавшая летний сезон 2024 г., не располагавшая к таянию ледников и снежников в высокогорье, питающих селевые потоки, предопределила спокойное течение экзогенных процессов в горных районах, как Западного Кавказа, так и Центрального. Кроме того, количество обломочного материала ещё не достигло тогда критического уровня. А вот землетрясение на Камчатке, которое произошло 30 июля 2025 г. и отозвалось в исследуемом районе интенсивностью 4,2 балла в тот день, когда прошёл 2-й этап сходов селей, вероятно, послужило провоцирующим фактором.

Во второй половине июля 2025 г. сели сошли в разных районах Центрального Кавказа: 22 июля вдоль дороги, ведущей к верховьям р. Черёка Балкарского (к слиянию Карасу и Дых-су) и далее вдоль р. Карасу нами отмечались 3 селевых выноса из сравнительно небольших долин длиной не более 2 км, но с крутым продольным профилем. Во всех трёх случаях сели диагностировались по свежим навалам глыбово-щебнистого материала на дороге в виде конусов выноса до 40–50 м в поперечнике. Традиционно селеносные Гюльчи-Су и Метиан-Суу в нижних частях, вдоль дороги, не содержали следы свежих селевых наносов, однако, по второму ручью сошёл селевой паводок (рис. 3), размывший дорогу и временно разорвавший транспортное сообщение (для невыездного транспорта) расположенных выше альплагерей с ближайшим населённым пунктом – селом Верхняя Балкария. Сравнение результатов лазерного сканирования 2025 г. с аэрофотосъёмкой 2022 г. показывает,

<sup>4</sup> Для большей репрезентативности мы использовали 2 источника данных. В связи с этим, расчётные значения могут несущественно отличаться: ANSS Comprehensive Earthquake Catalog (ComCat) Documentation | U.S. Geological Survey // <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/anss-comprehensive-earthquake-catalog-comcat-documentation>. Дата обращения 22.11.2025.

что каких-либо существенных перестроек дна долины р. Метиан-Суу – за исключением боковых русловых деформаций – не было.

В то же время, заложенные в 2022 г. стационары на передвижение крупных обломков (окрашенные глыбы тремя поперечными профилями через днище с интервалом вниз по течению примерно 400–500 м) в днище были частично уничтожены, из них уцелел только верхний. Это в совокупности свидетельствует, вероятно, об активности селевых паводков, при отсутствии селей за рассмотренный период.



*Рис. 3. Нижняя часть селеносной долины р. Метиан-Суу после схода селя 21 июля 2025 г. /*

*Fig. 3. The lower part of the debris flow-bearing valley of the Metian-Suu River after the debris flow on July 21, 2025*



*Рис. 4. Разрыв дороги селевым паводком 21 июля 2025 г. Область разрыва заштрихована /*

*Fig. 4. Road erosion by debris flow on July 21, 2025. The erosion area is shaded*

### Выводы

1. В июле 2025 г. сходами крупных селей цикл экстремальных экзогенных процессов закончился не только на исследуемой территории в Верхней Балкарии, но и в других районах Центрального Кавказа. Он продлился 8 лет. За это время накопи-

лась критическая масса обломочного материала. В некоторых местах сели сходили в два этапа.

2. «Спусковым механизмом» в 2025 г. послужили ливневые осадки и небольшое превышение температуры воздуха в зонах формирования для обоих этапов и, для 2-го этапа, вероятно, – землетрясение на Камчатке, произошедшее 30 июля и сказавшееся в исследуемом районе интенсивностью в 4,2 балла.

## Литература

1. Боголепов М.А. О колебаниях климата Европейской России в историческую эпоху. М.: Тип. И.Н. Кушнерова и К°, 1908. – 112 с.
2. Васьков И.М., Гуня А.Н., Караев Ю.И. Ландшафты как индикаторы эндогенных энергопотоков планеты Земля. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. № 1(31). – С. 6–16. DOI: 10.25744/genb.2023.66.94.001.
3. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и Геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.
4. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов. // Инженерная геология. – 2016. – № 1. – С. 16–21.
5. Караваев В.А., Горбунов А.С., Семиноженко С.С. Роль слабых землетрясений в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.24.001.
6. Караваев В.А., Семиноженко С.С. Цикл экстремальных геоморфологических процессов в бассейне реки Черек Балкарский. // Геоморфология. – 2016. – № 2. – С. 34–40. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-2-34-40.
7. Кривенко В.Г. Концепция внутривековой и многовековой изменчивости климата как предпосылка прогноза. // В сборнике: Климаты прошлого и климатический прогноз. М.: Ин-т охраны природы и заповедного дела, 1992. – С. 39–40.
8. Кюнтцель В.В. Универсальная система циклов в природе. // В сборнике: Циклы природных процессов, опасных явлений и экологическое прогнозирование. Вып. 2. М.: АЕНР, 1992. – С. 92–96.
9. Максимов Е.В. Ритмы на Земле и в Космосе. Тюмень: Мандр и Ка, 2005. – 312 с.
10. Уломов В.И. Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе. // Коллективная монография: «Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы». Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. / Под редакцией А.О. Глико. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 127–146.
11. Хаин В.Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли. // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. № 6. – С. 753–760.
12. Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. 2-е изд. М.: Научный мир, 2003. – 348 с.
13. Bhambri R., Hewitt K., Kawishwar P., Kumar A., Verma A. et al. ice-dams, outburst floods, and movement heterogeneity of glaciers, Karakoram. // Global and Planetary Change. – 2019. – Vol. 180. – pp. 100–116. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.05.004.
14. Chen H., Ruan H., Chen J., Li X., Yu Y. Review of investigations on hazard chains triggered by river-blocking debris flows and dam-break floods. // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. – Art. No. 830044.
15. Chizhevsky A.L. Les epidemies et les perturbations electromagnetiques du milieu exterieur. Paris: Hippocrate, 1938. – 239 p.
16. Donnini M., Santangelo M., Gariano S.L. et al. Landslides triggered by an extraordinary



rainfall event in Central Italy on September 15, 2022. // *Landslides*. – 2023. – Vol. 20. – pp. 2199–2211. DOI: 10.1007/s10346-023-02109-4.

17. La Porta G., Leonardi A., Pirulli M. et al. Time-resolved triggering and runout analysis of rainfall-induced shallow landslides. // *Acta Geotechnica*. – 2024. – Vol. 19. – pp. 1873–1889. DOI: 10.1007/s11440-023-01996-0.

18. Ma J., Luo B., Zhao Y. et al. Detection and automatic identification of landslide areas from the LiDAR point clouds using improved DBSCAN. // *Landslides*. – 2025. – Vol. 22. – pp. 3843–3854. DOI: 10.1007/s10346-025-02569-w.

19. Novak A., Vrabec M., Smuc A. Long-term post-event processes and major reactivation of a complex landslide: 2000–2023 evolution of the Ciprnik landslide, Julian Alps, Slovenia. // *Landslides*. – 2025. – Vol. 22. – pp. 4013–4027. DOI: 10.1007/s10346-025-02598-5.

20. Prenner D., Hrachowitz M., Kaitna R. Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. // *The Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 658. – pp. 958–972. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.206.

21. Weidner L., van Veen M., Lato M., Walton G. An algorithm for measuring landslide deformation in terrestrial lidar point clouds using trees. // *Landslides*. – 2021. – No. 18(11). – pp. 3547–3558.

## References

1. Bogolepov M.A. On climate fluctuations in European Russia during the Historical Era. Moscow. Typography of I.N. Kushnerev and Co. 1908. 112 p. (In Russ.)

2. Vaskov I.M., Gunya A.N., Karaev Yu.I. Landscapes as indicators of endogenous energy flows planet Earth. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2023. Vol. 8. No. 1(31). pp. 6–16. DOI: 10.25744/genb.2023.66.94.001. (In Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006. (In Russ.)

4. Zerkal O.V., Fomenko I.K. Influence of various factors on the results of probabilistic analysis of landslide processes activation. *Engineering Geology*. 2016. No. 1. pp. 16–21. (In Russ.)

5. Karavaev V.A., Gorbunov A.S., Seminozhenko S.S. Role of weak earthquakes in the cycle of extreme exogenous processes in the mountains of the Central Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.24.001. (In Russ.)

6. Karavaev V.A., Seminozhenko S.S. The extreme geomorphologic processes cycle in the Balkar Cherek river basin. *Geomorfologiya*. 2016. No. 2. pp. 34–40. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-2-34-40. (In Russ.)

7. Krivenko V.G. The concept of intra-century and multi-century climate variability as a prerequisite for forecasting. In: *Climates of the past and climate forecast*. Moscow. Institute of Nature Conservation and Nature Reserves. 1992. pp. 39–40. (In Russ.)

8. Kyuntzel V.V. Universal system of cycles in nature. In: *Cycles of natural processes, hazardous phenomena and ecological forecasting*. Issue 2. Moscow. Russian Academy of Natural Sciences, 1992. pp. 92–96. (In Russ.)

9. Maksimov E.V. *Rhythms on Earth and in Space*. Tyumen. Mandr and Ka. 2005. 312 p. (In Russ.)

10. Ulomov V.I. Identification of potential sources and long-term forecast of strong earthquakes in the North Caucasus. Collective monograph: “Environmental and climate change. Natural and related anthropogenic disasters”. Vol. 1. Seismic processes and disasters. Ed. A.O. Gliko. Moscow. IPE RAS. 2008. pp. 127–146. (In Russ.)

11. Khain V.E. On the basic principles of constructing a truly global model of earth dynamics. *Geology and Geophysics*. 2010. Vol. 51. No. 6. pp. 753–760. (In Russ.)

12. Khain V.E. *Main problems of modern geology*. 2nd ed. Moscow. Scientific World. 2003. 348 p. (In Russ.)



13. Bhambri R., Hewitt K., Kawishwar P., Kumar A., Verma A. et al. ice-dams, outburst floods, and movement heterogeneity of glaciers, Karakoram. *Global and Planetary Change*. 2019. Vol. 180. pp. 100–116. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.05.004.
14. Chen H., Ruan H., Chen J., Li X., Yu Y. Review of investigations on hazard chains triggered by river-blocking debris flows and dam-break floods. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Art. No. 830044.
15. Chizhevsky A.L. *Les epidemies et les perturbations electromagnetiques du milieu exterieur*. Paris. Hippocrate. 1938. 239 p.
16. Donnini M., Santangelo M., Gariano S.L. et al. Landslides triggered by an extraordinary rainfall event in Central Italy on September 15, 2022. *Landslides*. 2023. Vol. 20. pp. 2199–2211. DOI: 10.1007/s10346-023-02109-4.
17. La Porta G., Leonardi A., Pirulli M. et al. Time-resolved triggering and runout analysis of rainfall-induced shallow landslides. *Acta Geotechnica*. 2024. Vol. 19. pp. 1873–1889. DOI: 10.1007/s11440-023-01996-0.
18. Ma J., Luo B., Zhao Y. et al. Detection and automatic identification of landslide areas from the LiDAR point clouds using improved DBSCAN. *Landslides*. 2025. Vol. 22. pp. 3843–3854. DOI: 10.1007/s10346-025-02569-w.
19. Novak A., Vrabec M., Smuc A. Long-term post-event processes and major reactivation of a complex landslide: 2000–2023 evolution of the Ciprnik landslide, Julian Alps, Slovenia. // *Landslides*. 2025. Vol. 22. pp. 4013–4027. DOI: 10.1007/s10346-025-02598-5.
20. Prenner D., Hrachowitz M., Kaitna R. Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *The Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 658. pp. 958–972. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.206.
21. Weidner L., van Veen M., Lato M., Walton G. An algorithm for measuring landslide deformation in terrestrial lidar point clouds using trees. *Landslides*. 2021. No. 18(11). pp. 3547–3558.

DOI: 10.46698/o0885-5581-1938-j

Original paper

## Stress environment and roof support needs for roadways ahead of the coal face: Case study from Ha Lam coal mine

L.Q. Phuc<sup>1</sup>, N.K. Linh<sup>1</sup>, N.V. Babyr<sup>2</sup>, N.V. Thang<sup>2</sup><sup>1</sup> Hanoi University of Mining and Geology, 18 Pho Vien Str.,  
Dong Ngac, Hanoi, Vietnam;<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, 21 Line 2, Saint Petersburg 199106,  
Russian Federation, e-mail: [nguyenkhaclinh@humg.edu.vn](mailto:nguyenkhaclinh@humg.edu.vn)*Received: 15.09.2025, revised: 19.11.2025, accepted: 24.11.2025*

**Abstract:** Underground coal mining is characterized by confined working conditions and significant occupational safety hazards. Specifically, development headings driven along the coal seam ahead of the longwall face present a high risk of roof falls and challenging roof control conditions. **The aim** of this study is to analyse the stress distribution and the development of plastic failure zones in the surrounding rock mass, based on the mining conditions of Seam No. 10 at the Ha Lam coal mine. **The relevance** of the work is driven by the critical need to ensure the stability of development headings under the abutment pressure influence of the advancing longwall face, in order to enhance both safety and extraction efficiency. The main method employed involves numerical modelling of the rock mass stress-strain state, validated with in-situ monitoring data. **As a result**, it was established that the roadway ahead of the longwall face is consistently subjected to an asymmetric stress regime, with the horizontal-to-vertical stress ratio exceeding 2.5. The plastic zone in the surrounding rock develops asymmetrically between the two ribs of the roadway, leading to an unbalanced load. The magnitude of the stress and the extent of the plastic deformation zone around the ventilation roadway are significantly greater than those around the haulage roadway. Consequently, a supplemental support strategy is required to enhance roadway stability as it approaches the longwall face during mining operations. This paper provides a reliable foundation for the Ha Lam mine and other underground coal mines in Vietnam in developing plans to ensure roadway stability, improve production efficiency, and enhance occupational safety.

**Keywords:** coal face, roadway, numerical simulation, stress distribution, plastic deformation.

**Acknowledgments:** *The study was supported by the Ministry of Education and Training of Vietnam, Grant No. B2024-MDA-03.*

**For citation:** Phuc L.Q., Linh N.K., Babyr N.V., Thang N.V. Stress environment and roof support needs for roadways ahead of the coal face: Case study from Ha Lam coal mine. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 270–284. DOI: 10.46698/o0885-5581-1938-j

УДК 622.23.05

DOI: 10.46698/00885-5581-1938-j

Оригинальная статья

## Напряженно-деформированное состояние и требования к креплению для выработок перед угольным забоем: пример угольной шахты «ХаЛам»

Л.К. Фук<sup>1</sup>, Н.К. Линь<sup>1</sup>, Н.В. Бабырь<sup>2</sup>, Н.В. Тханг<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ханойский университет горного дела и геологии,  
Вьетнам, г. Ханой, ул. Фо Вьен, Донг Нгак, 18;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106,  
г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2,  
e-mail: [nguyenkhaclinh@humg.edu.vn](mailto:nguyenkhaclinh@humg.edu.vn)

Статья поступила: 15.09.2025, доработана: 19.11.2025, принята к публикации: 24.11.2025

**Резюме:** Подземная добыча угля связана с ограниченными условиями работы и значительными рисками безопасности труда. В частности, горные выработки, проводимые по угольному пласту впереди очистного забоя, представляют собой зону повышенного риска обрушения кровли и сложностей с управлением кровлей. **Целью** данного исследования является анализ распределения напряжений и развития зон пластической деформации во вмещающих породах на основе условий отработки пласта № 10 шахты «Ха Лам». **Актуальность работы** обусловлена необходимостью обеспечения устойчивости подготовительных выработок в зоне опережающего влияния очистных работ для повышения безопасности и эффективности добычи. В качестве основного метода использовано компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива, верифицированное данными натурных наблюдений. **В результате** установлено, что выработка, расположенная впереди очистного забоя, постоянно находится в условиях асимметричного напряженного состояния, при этом коэффициент соотношения горизонтального и вертикального напряжений достигает значений свыше 2,5. Зона пластических деформаций развивается асимметрично между двумя боками выработки, что приводит к неравномерной нагрузке. Величина напряжений и степень распространения зоны пластической деформации вокруг вентиляционной выработки значительно больше, чем у транспортной выработки. Следовательно, необходим план дополнительного крепления для повышения устойчивости выработки по мере ее приближения к очистному забою. Данная статья служит надежной основой для шахты «Ха Лам» и других подземных угольных шахт Вьетнама при разработке планов по обеспечению устойчивости горных выработок, повышению эффективности добычи и безопасности труда.

**Ключевые слова:** угольный забой, выработка, численное моделирование, распределение напряжений.

**Благодарности:** Исследование поддержано Министерством образования и профессиональной подготовки Вьетнама, грант № B2024-MDA-03.

**Для цитирования:** Фук Л.К., Линь Н.К., Бабырь Н.В., Тханг Н.В. Напряженно-деформированное состояние и требования к креплению для выработок перед угольным забоем: пример угольной шахты «ХаЛам». *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 270–284. DOI: 10.46698/00885-5581-1938-j

## Introduction

The longwall mining method is the primary approach adopted by underground coal mines [Babyr, 2024; Zuev et al., 2020; Szurgacz, 2024]. It is considered one of the safest, most productive, and efficient methods for coal extraction. In this approach, the stability of roadways along the seam plays a crucial role in production efficiency and occupational safety [Kuranov et al., 2020; Kongar-Syuryun et al., 2025], especially in the area ahead of the coal face and at the intersection between the coal face and the roadway along the seam [Esterhuizen et al., 2019; Zhu et al., 2022]. According to studies, this area is affected by the superimposition of static stress, lateral stress, and front support stress at the coal face. The roadway along the seam is susceptible to deformation due to the combined effects of support pressure exerted by the advancing coal face and the tendency of roof strata to shift into the excavated space. This results in a significant risk of collapse, as documented in references. Additionally, this area has a large space due to the intersection of the coal face and the roadway along the seam, serving as a location for multiple transport equipment installations, pedestrian access, and ventilation [Burtan et al., 2022; Kongar-Syuryun et al., 2025].

Therefore, a critical task for underground coal mines is maintaining the stability of the roadways to ensure safe and efficient production [Linh et al., 2021; He et al., 2023]. The stress distribution patterns, surrounding rock displacement, and deformation of the roadway at the coal face-roadway intersection and ahead of the coal face in Vietnam's underground coal mines have yet to be the subject of comprehensive study. Consequently, the measures for ensuring roadway stability have been based on production experience rather than scientific grounds [Kovalsky et al., 2025]. Currently, single hydraulic props are used as the reinforcement method in these areas at underground coal mines in Vietnam (see fig. 1). However, the issue of maintaining roadway dimensions for production and safety, while reducing repair costs, remains unresolved.



*Fig. 1. Current support conditions at the coal face-roadway intersection and ahead of the coal face in some underground coal mines in Vietnam*

A number of studies have been conducted on a global scale with the objective of gaining insight into the deformation mechanisms of roadways and the technology employed for the control of surrounding rock. A mechanical model was developed to provide support for roadways ahead of the coal face [Esterhuizen et al., 2020]. This was achieved by analysing the distribution of support pressure in hard roof rock, with the proposed solution being the use of cable bolts in place of single hydraulic props. A computational model



was established to evaluate the support capability and potential for roof rock subsidence. A methodology for determining the parameters of the support system to secure the roadway ahead of the coal face was proposed [Tyulyaeva et al., 2024]. In their research works [Liu et al., 2022; Sasaoka et al., 2020; Fan et al., 2023], the authors introduced active support technology, utilising cable bolts throughout the entire lifespan of the roadway. This was achieved by establishing a prediction model for the deformation of surrounding rock under the impact of longwall mining. Furthermore, the stress and deformation of the surrounding rock at the coal face-roadway intersection and ahead of the coal face were investigated, with the suggestion that the support structure of the roadway should be determined based on the stress distribution and deformation characteristics of the surrounding rock [Qiang et al., 2023; Mao et al., 2020]. The mechanical properties of the surrounding rock were studied when the roadway was supported by hydraulic props combined with cable bolts, resulting in the proposal of a heterogeneous support strategy [Koteleva et al., 2021]. A corresponding support theory was proposed for the roadway position ahead of the coal face, along with a method for relocating hydraulic supports. This was done in order to address issues where the roof and roadway anchor system fail due to high support pressure and significant roof subsidence [Zhao et al., 2024, Kongar-Syuryun et al., 2025]. Their research indicated that enhancing the adaptability of support systems in roadways ahead of the coal face could improve stability. In addition, a movable support device for roadways ahead of the coal face was developed, along with advanced mechanized support principles [Guo et al., 2024; Kongar-Syuryun et al., 2025].

The preceding analysis demonstrates that the extant research agenda is oriented towards elucidating the relationship between the deformation of the surrounding rock and the support system. However, it should be noted that geological conditions vary significantly, which in turn gives rise to notable differences in the deformation patterns of the surrounding rock. The deformation of roadways in the coal face-roadway intersection area and ahead of the coal face, as well as the stress distribution of surrounding rock in Vietnam's underground coal mines, are subjects that have yet to be adequately addressed in the academic literature. It is therefore evident that further research is required in order to develop advanced, safe and efficient support technologies. The present study focuses on Seam 10 at the Ha Lam coal mine in Vietnam. In-depth analysis is conducted on the stress distribution and deformation of the roadway situated ahead of the coal face, as well as at the coal face-roadway intersection. The findings of this research will serve as a foundation for the development and implementation of mechanized support systems in this region.

## Methods

### Characteristics of the Study Area

The Ha Lam coal mine is located in Ha Long City, Quang Ninh Province, Vietnam. The coal seam in the area has a gentle dip. The roof and pillar rocks are primarily composed of siltstone and shale, while in many areas, the pillar and roof rocks are sandstone, which is of low strength and unstable. The geological drill column is presented (see fig. 2). The study area is the mechanized longwall face CGH 10.3 of Seam 10, with a thickness ranging from 2 to 4 meters. The coal seam thickness across the entire longwall face is relatively stable, with an average depth of approximately 300 m. The immediate roof of the seam is shale, with a thickness varying from 0 to 6 meters. The preparation of the mining block is conducted through two parallel roadways along the seam, one of which is designated to serve the adjacent mining block (see fig. 3). The coal pillar between the

two roadways has a width of 25 m.

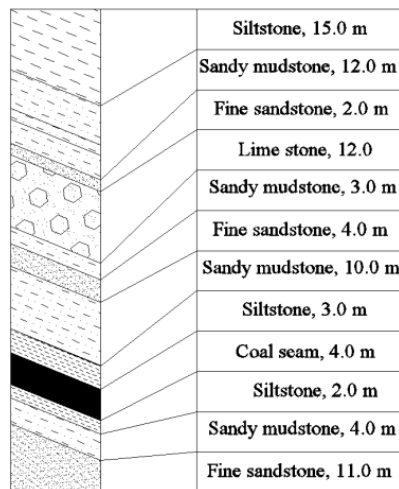


Fig. 2. Geological drill column in the study area

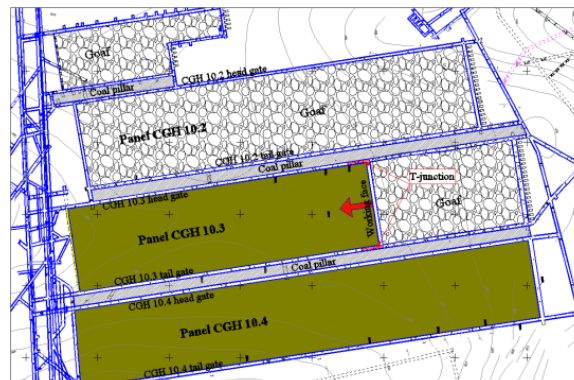


Fig. 3. Roadway layout in the study area

#### Occurrence Range of Hazardous Mining Stress Zones and Load Impact on Support Structures at the Intersection Area Ahead of the Coal Face

##### *Occurrence Range of Hazardous Mining Stress Zones:*

In the longwall mining system, a hazardous stress zone (see fig. 4) always appears at the intersection between the coal face and the roadway along the seam and ahead of it. The cause is believed to be the advancement of the coal face and the collapse of the roof rock in the excavated space, which disrupts the structure of the roof rock mass and continuously creates new equilibrium stress states. At the front abutment stress zone ahead of the coal face, mining stress reaches a peak, generating a large load, and roof sagging occurs, directly impacting the support structures of the roadway along the seam. At the intersection between the coal face and the roadway along the seam, mining stress diminishes, resulting in roof rock collapse and a tendency for the roadway to experience severe compression and deformation [Phuc et al., 2022]. According to the collapse arch hypothesis, the occurrence range of the hazardous mining stress zone ahead of the coal face can be determined by formula (1):

$$L = 0,1 \sqrt{\frac{nmH(1+\cos\alpha)}{2f}} \quad (1)$$

In which:  $n$  – coefficient for calculating the influence of other longwall faces in the calculation area, determined by formula (2):

$$n = 1 + n_1 + \frac{m_1}{h_1} \quad (2)$$

where: coefficient accounting for the influence of adjacent longwall face (if influenced,  $n_1 = 1$ ; if not influenced,  $n_1 = 0$ ),  $\frac{m_1}{h_1}$  – coefficient accounting for the influence of the adjacent upper coal seam;  $m_1$  – thickness of the upper coal seam, in meters;  $h_1$  – distance from the upper coal seam to the calculation area, in meters.

$H$  – depth of the working area, in meters;  $\alpha$  – inclination angle of the coal seam, in degrees;  $f$  – average firmness coefficient of the roof rock (according to the Protodiakonov scale).

Under the conditions of Seam 10 with a thickness of 4 m, located beneath the previously mined CGH 10.2 longwall face ( $n_1 = 1$ ), with the upper Seam 11 having an average thickness  $m_1 = 6.0$  m, an average distance between the two seams  $h_1 = 15$  m, a working depth  $H = 300$  m, a coal seam inclination angle  $\alpha = 50$ , and an average firmness coefficient of the roof rock  $f = 4$ , the hazardous stress zone range  $L$  is determined from formula (1) as approximately  $L \approx 3.0$  m.

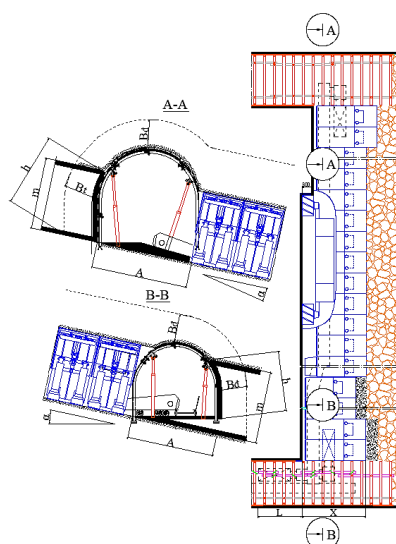


Fig. 4. Diagram for determining the range of the hazardous stress zone

#### *Mining Pressure Acting on Support Structures in the Hazardous Stress Zone:*

Mining pressure acts on the support structures of the roadway along the seam at the intersection of the coal face-roadway along the seam due to the load of both coal and roof rock in the collapse arch. The mining pressure on the support structures can be determined by formula (3):

$$q = \gamma_t B_t + \gamma_d B_d \left(1 + \frac{Y}{Y_d}\right) \quad (3)$$

where:  $\gamma_t$  – unit weight of coal,  $T/m^3$ ;  $\gamma_d$  – average unit weight of roof rock,  $T/m^3$ ;  $B_t$  – depth of the failure arch in the coal layer, which can be determined by formula (4):

$$B_t = \eta h \frac{\sqrt{2K_n \gamma_d H}}{1000 f_t k} \quad (4)$$

where:  $\eta$  – coefficient characterizing the inclination angle of the sliding prism;  $h$  – width of the exposed coal surface around the perimeter of the roadway, m;  $K_n$  – stress concentration coefficient based on the roadway shape, depending on the ratio of the roadway width in the inclined direction of the seam ( $A$ ) to the width of the exposed coal surface ( $h$ );  $f_t$  – coal firmness coefficient;  $k$  – coefficient accounting for the reduction in coal firmness over time;  $B_d$  – height of the failure arch in the roof rock, determined by formula (5):

$$B_d = \frac{A \cos \alpha + 2B_t}{2kf_d} \quad (5)$$

where:  $A$  – roadway width in the dip direction of the coal seam, m;  $f_d$  – average firmness coefficient of roof rock in the collapse-prone area.

$Y_d$  – allowable roof sag without requiring additional support,  $Y_d = 30\text{--}45\text{ mm}$ ;  $Y$  – roof sag due to the influence of the coal face, determined by the empirical formula (6):

$$Y = \frac{5nm(1+\cos\alpha)}{2\sqrt{\frac{nmH(1+\cos\alpha)}{2f}}(V+C)} \cdot \left( \sqrt{\frac{nmH(1+\cos\alpha)}{2f}} + X \right)^2 \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

where  $X$  – coal face width, m;  $V$  – average daily coal face advance rate;  $C$  – width of a shear cut, m.

Under the conditions at coal face CGH 10.3, the calculated mining pressure acting on the support structures is  $q = 22,3 \text{ T/m}^2$ .

This calculation result is quite consistent with field measurements at the transport roadway. However, on the ventilation roadway side, there are significant deviations (due to the absence of parameters reflecting the influence of the coal pillar and the space mined out by the adjacent coal face). To clarify further, the method of numerical simulation analysis has been applied to this study.

### Development of the Numerical Simulation Model

The Flac3D software was used to simulate the longwall mining process. Flac3D, developed by ITASCA, is designed for continuous modeling of geomechanical mining environments. Based on the geological conditions of Seam 10 at the Ha Lam coal mine, a typical geological model was established. The lithology and thickness of the strata were selected and the chosen mechanical properties of the surrounding rock (see table 1). The vertical and horizontal displacements at the base of the model were fixed at zero, while the horizontal displacements of the four sides were constrained. Based on the rock mass density of  $0.025 \text{ MN/m}^3$ , a vertical static stress of  $7.5 \text{ MPa}$  was applied to the top boundary of the model to simulate the static load of the rock mass. Gravity was included in the model, and the Mohr-Coulomb failure criterion was used for the numerical simulation (see fig. 5).

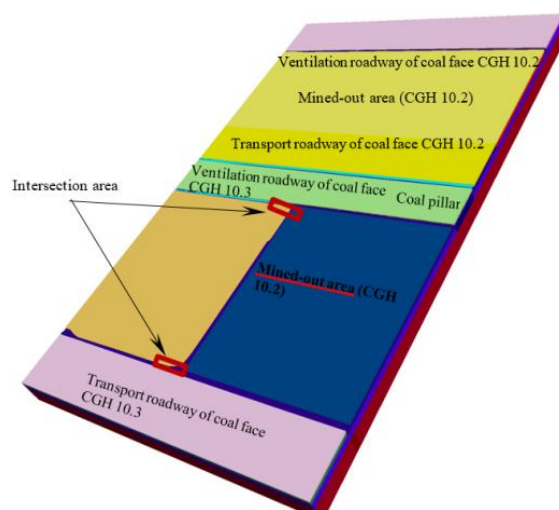


Fig. 5. Numerical simulation model

The simulation model was constructed based on a case study of Seam 10 at the



Ha Lam coal mine. The seam has an average thickness of 4.0 m, with an immediate roof and floor consisting of shale with a thickness of 3 m. The main roof is siltstone with a thickness of 10 m. The roadway is located 300 m below the surface, with a width of 4 m and a height of 3 m, and the coal pillar width is 25 m.

Table 1

**Lithology and mechanical properties of rocks applied in the model**  
[Cai et al., 2024]

| Parameter name                  | Sand-stone | Silt-stone | Shale | Coal  |
|---------------------------------|------------|------------|-------|-------|
| Tensile Strength (MPa)          | 1.6        | 0.9        | 1.2   | 0.4   |
| Bulk Modulus (GPa)              | 7.456      | 2.333      | 1.822 | 0.748 |
| Shear Modulus (GPa)             | 3.244      | 0.955      | 0.607 | 0.484 |
| Poisson's Ratio, $\nu$          | 0.31       | 0.32       | 0.35  | 0.26  |
| Cohesion, $c$ (MPa)             | 3.2        | 2.1        | 1.8   | 1.5   |
| Friction Angle, ( $^{\circ}$ )  | 34         | 30         | 26    | 19    |
| Unit Weight ( $\text{kg/m}^3$ ) | 2780       | 2550       | 2250  | 1450  |

The numerical simulation process was conducted in the following manner: (1) Setting up the static stress state and achieving the initial equilibrium state; (2) Excavating the transport and ventilation roadways along the seam at the coal face; (3) Mining the CGH 10.2 coal face; (4) Mining the CGH 10.3 coal face. During the simulation, the stress-strain state of the transport and ventilation roadways along the seam was extracted [Kongar-Syuryun et al., 2024; Kovalskiy et al., 2024; Tyulyaeva et al., 2024].

## Simulation and Analysis Results

### Stress Distribution Patterns Ahead of the Coal Face and at the Coal Face-Roadway Intersection

In the area of the intersection and in advance of the working face, the stress field within the surrounding rock mass becomes disrupted [Han et al., 2023; Kazanin, 2023; Li et al., 2023]. The stress distribution patterns at the intersection and ahead of the working face (see fig. 6). It can be observed that the stress distribution is asymmetric due to the influence of front and lateral support pressures [Zeng et al., 2024; Linh et al., 2025; Linh et al., 2024]. The peak stress near the coal wall or the primary coal pillar is typically located at the intersection between the coal face and the roadway along the seam. Conversely, the peak stress near the coal wall of the CGH-10.3 coal face is distributed 15 m ahead of the face.

At the transport roadway of coal face CGH-10.3, on the left side, significant stress concentration occurs at the coal face-roadway intersection and extends over a 35-meter length of the roadway ahead of the coal face. The maximum vertical stress reaches 15.8 MPa at the intersection, then increases to 17.2 MPa and decreases to 15.7 MPa at distances of 9 m and 24 m ahead of the coal face, respectively. The maximum vertical stress concentration factor reaches  $k=2.3$ . Similarly, large horizontal stress concentration is also found at this location. The horizontal stress value reaches 7.89 MPa at the intersection, then increases to 8.6 MPa and decreases to 8.0 MPa at distances of 10 m and 25 m ahead of the coal face, respectively.

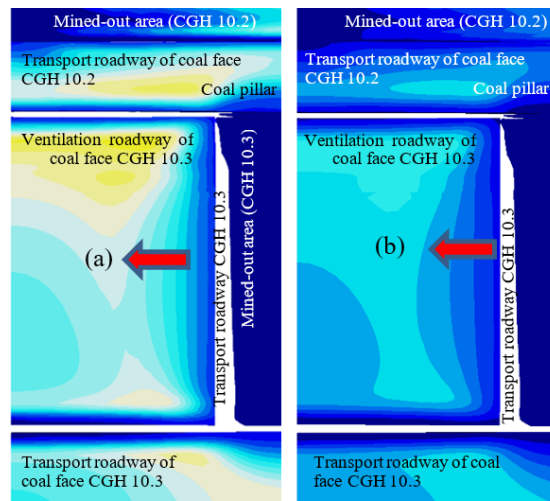


Fig. 6. Characteristics of stress distribution ahead of the coal face and at the coal face-roadway intersection: a – Vertical stress distribution; b – Horizontal stress distribution

In contrast to the left side, on the right side of the transport roadway, stress is significantly lower at the coal face-roadway intersection (vertical stress is 4.5 MPa, and horizontal stress is 2.3 MPa). The peak stress is found 25 m ahead of the coal face, with values of 16.4 MPa for vertical stress and 8.1 MPa for horizontal stress. Thus, it can be observed that due to the influence of support pressure, both vertical and horizontal stresses are distributed asymmetrically on the two sides of the roadway. This distribution leads to the formation of eccentric compressive forces acting on the supports, making them more prone to failure.

Stress concentration intensifies when there is a resonance between the front support pressure at the coal face and the support pressure formed by the previously mined-out space. Specifically, in this study, stress distribution around the ventilation roadway of coal face CGH-10.3 was examined. On the right side of the ventilation roadway (near the coal pillar), stress concentration was observed from the coal face-roadway intersection and developed over a 60-meter length of the roadway. At the intersection, the recorded vertical stress on the right side was 15.7 MPa (with a vertical stress concentration factor of  $k=2.1$ ) and horizontal stress was 6.9 MPa. At a position 15 m ahead of the coal face, vertical stress increased to a peak of 18.3 MPa (with a stress concentration factor of  $k=2.44$ ) and horizontal stress was 7.9 MPa. In contrast, on the left side of the ventilation roadway of coal face CGH-10.3, the vertical stress at the coal face-roadway intersection was only 2.2 MPa, and the horizontal stress was 1.05 MPa. This can be explained by the formation pattern of front support pressure at the coal face. The coal mass adjacent to the intersection lies within the failure zone due to the intense development of a fracture system, creating a stress relief zone. Subsequently, vertical stress peaks at 20.3 MPa (with a stress concentration factor of  $k=2.7$ ) at a distance of 27 m, and then decreases to 19.3 MPa (with a stress concentration factor of  $k=2.57$ ) at a distance of 50 m ahead of the coal face. Thus, vertical stress concentration on the left side is 1.1 times higher. Similarly, horizontal stress peaks at 10.1 MPa at a distance of 27 m ahead of the coal face. Horizontal stress remains high (9.9 MPa) even further from the coal face.

Thus, the asymmetric development of stress on both sides of the roadway was found in both the transport and ventilation roadways of coal face CGH-10.3. This formation mechanism causes uneven displacement of the rock mass, resulting in unbalanced forces

acting on the supports. Additionally, the sustained high horizontal stress is the primary cause of roadway compression ahead of the coal face.

When considering the stress environment in the roof rock above the roadway, the distribution between horizontal and vertical stresses in the rock mass (see fig. 7).

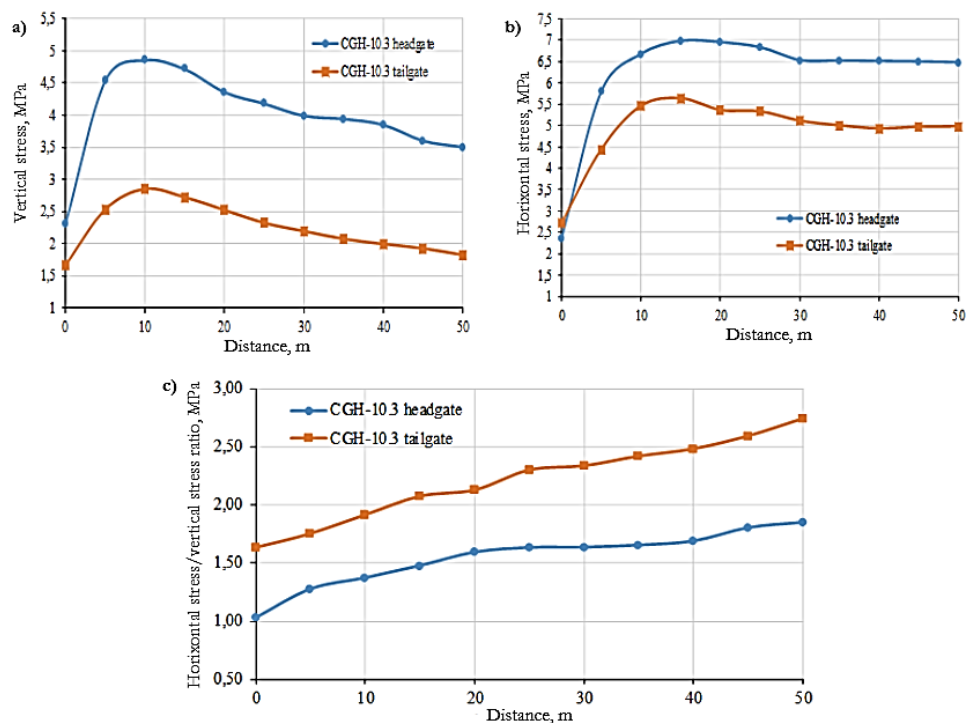


Fig. 7. Stress in the rock masses 3 meters above the roadway: a – Vertical stress distribution, MPa; b – Horizontal stress distribution, MPa; c – Horizontal/Vertical stress ratio, MPa

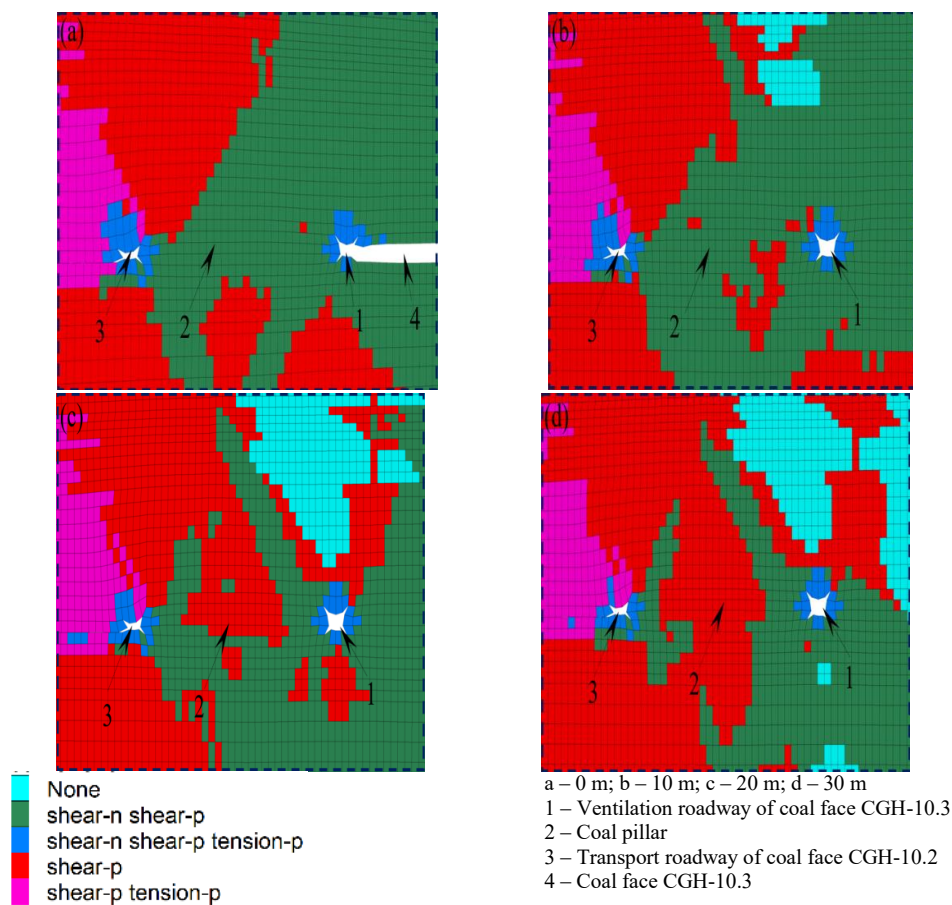
The reduced stress magnitude in the rock stratum located 3 m above the roadway is a consequence of its positioning within the stress relief region of the collapse arch structure. In the collapse arch, a system of fractures develops significantly in the roof rock, causing the rock layers to separate and crumple. Although the stress is not high, the entire rock mass within the collapse arch will form a direct load acting on the roadway's support system. The stress distribution still follows the pattern with peak stress located 10 m ahead of the coal face. Comparative analysis reveals elevated roof rock stress in the ventilation roadway relative to the transport roadway. This stress elevation is a consequence of the combined loading from dual support pressure zones in the ventilation roadway. The first component is the lateral support pressure from the adjacent mined-out area above, which acts on the coal pillar and ventilation roadway. This pressure formed during the coal extraction and roof collapse in the mining space of the adjacent CGH-10.2 coal face. As the CGH-10.3 coal face advances forward, the ventilation roadway falls within the second support pressure zone - the front support pressure of coal face CGH-10.3. The resonance of both support pressure zones expands the collapse arch above the roadway and increases the load from the roof rock acting on the support system. This explains why the support system of the ventilation roadway experiences more severe destruction and deformation compared to the transport roadway.

Horizontal stress is consistently greater than vertical stress in the zone ahead of the coal face (see fig. 7a and fig. 7b). As the distance from the coal face increases, the ratio of horizontal to vertical stress rises. At the intersection between the coal face and the

roadway along the seam, this ratio tends to approach the value of hydrostatic pressure ( $k=1$ ). This may be because the roof rock mass has reached its critical displacement, causing a new equilibrium state to be achieved behind the intersection. With a horizontal-to-vertical stress ratio greater than 1, the rock mass tends to shift inward toward the roadway. This is the primary cause of roadway deformation and support system failure near the coal face.

### Development Patterns of the Plastic Deformation Zone Around the Roadway

The distribution characteristics of the plastic zones in the surrounding rock at various positions of the ventilation and transport roadways of coal face CGH-10.3 (see fig. 8 and fig. 9). It can be observed that the shape and extent of the plastic zone in the surrounding rock of these two roadways are entirely different.



*Fig. 8. Distribution of the plastic zone in the rock surrounding the ventilation roadway at different positions ahead of the working face*

The plastic deformation zone in the rock mass within the ventilation roadway of coal face CGH-10.3 has reached a point where it covers the entire roadway area and coal pillar. The roadway is subjected to lateral mining stress originating from the previous coal face and front support pressure exerted by the current coal face. The extent of the plastic zone in the surrounding rock is markedly increased in the vicinity of the coal face. At the intersection, the plastic zone has developed extensively throughout the rock mass and coal pillar, resulting in significant deformation of the roadway. A minor elastic zone



has manifested in the roof rock above the coal face at a distance of approximately 10 m. Nevertheless, within a 15-metre radius surrounding the roadway, the plastic deformation zone, characterized by the formation of fractures, can still be observed. At a distance of 20 m ahead of the coal face, the elastic zone expands and persists in the roof rock, situated at a height of 3 m above the roadway. The plastic deformation zone in the rock mass continues to expand on both sides and beneath the roadway. At a distance of 30 m from the coal face, an elastic zone is visible on the right side and beneath the roadway. However, in general, the extent of the plastic zone in the vicinity of the coal pillar (on the left side) is greater than that on the coal wall side (on the right side), with both zones distributed asymmetrically. The extent of the plastic deformation zone is observed to span the entire coal pillar, extending for a distance of 25 m. The mining of the previous coal face has been identified as a factor that has disturbed the stress field in the surrounding rock mass. The ratio of horizontal to vertical stress is estimated to be approximately 1.5, and the direction of the principal stress is also observed to be skewed. As a result, the plastic zone in the surrounding rock exhibits an asymmetric distribution.

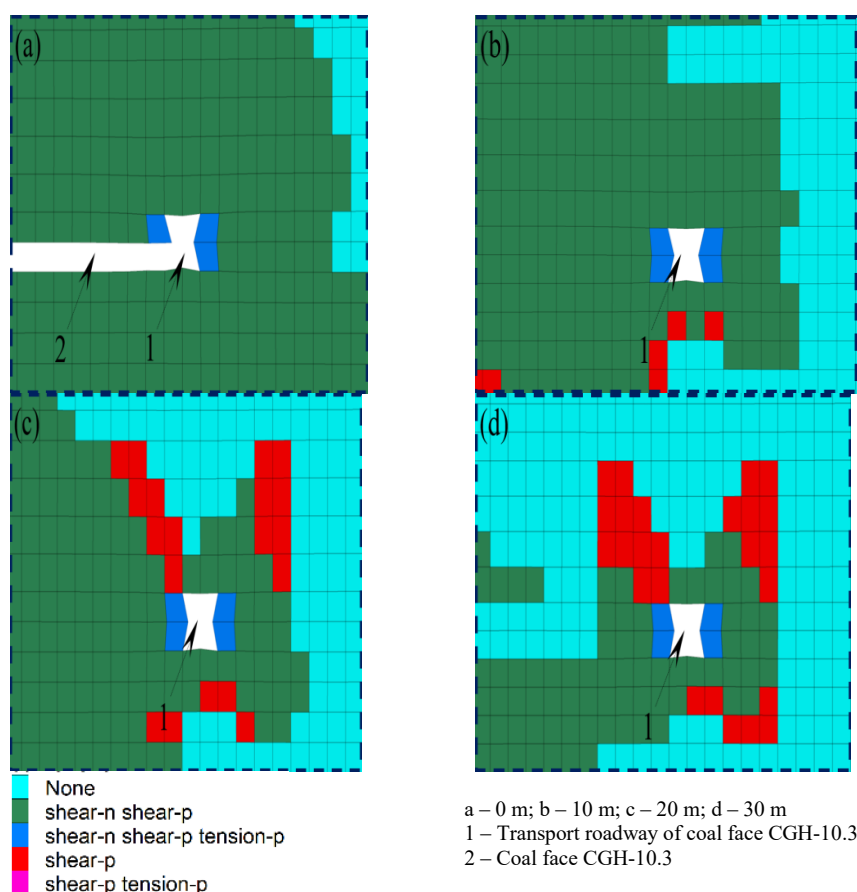


Fig. 9. Distribution of the plastic zone in the rock surrounding the transport roadway at different positions ahead of the working face

The transport roadway on both sides of coal face CGH-10.3 is comprised of solid coal, exhibiting no discernible impact from the mining activities associated with coal face CGH-10.3. The distribution of the plastic zone in the surrounding rock remains asymmetric in proximity to the coal face, extending approximately 10 m beyond the active working area. The plastic zone in the roof rock is primarily developed on the left side in the vicinity of the coal wall, which is in close proximity to coal face CGH-10.3. As the distance from the

working face increases, the asymmetric distribution of the plastic zone in the surrounding rock transitions towards a more symmetric distribution. The distribution of the roof, floor, and plastic zone on both sides of the roadway is symmetrical.

Therefore, in closer proximity to the coal face, the surrounding rock mass of the roadway is situated within a non-uniform stress field (horizontal/vertical stress ratio  $\neq 1$ ), wherein the plastic zone in the surrounding rock transitions from symmetric to asymmetric. The horizontal-to-vertical stress ratio can exceed 2.5, with the plastic zone developing throughout the surrounding rock mass over a range of approximately 15 m. The zone of plastic failure primarily develops on the coal pillar side (in the ventilation roadway) and on the coal wall side of coal face CGH-10.3 (in the transport roadway). The zone of plastic deformation exhibits considerable growth within a distance of 30 m in advance of the coal face. Approaching the coal face results in an increase in the extent of the plastic deformation zone. This expansion increases the susceptibility to rock bursts, bilateral roadway compression, and support system deterioration. In light of these findings, it is possible to propose the implementation of enhanced support systems and the selection of appropriate supports in order to guarantee the safety of the roadway situated in advance of the working face.

### Conclusion

The proposed technical solution serves as a reliable reference for Ha Lam coal mine and other underground coal mines in Vietnam in developing plans to ensure roadway stability, improve production efficiency, and enhance occupational safety. This solution allows for the delineation of the following conclusions:

- Due to the influence of front and lateral support pressures, the coal face-roadway intersection and the roadway ahead of the coal face are often in an asymmetric stress field. The ratio of horizontal to vertical stress in the roof rock of the roadway can reach up to 2.5, and the maximum vertical stress can be 2.57 times greater than hydrostatic stress. This leads to asymmetric damage in the roof rock of the roadway.
- The development range of the plastic deformation zone can extend over 15 m in the surrounding rock of the roadway and up to 30 m ahead of the working face. Particularly at the coal face-roadway intersection, the surrounding rock mass is almost entirely disturbed, with the collapse arch of the roof rock expanding and increasing the load on the roadway support system. Consequently, the risk of rock bursts and support failure increases on the roadway ahead of the coal face.
- Based on the case study of Seam 10 at the Ha Lam mine, Vietnam, within 30 m ahead of the coal face, the roadway must be supplemented with high-load bearing supports to ensure the stability of the roof rock in the plastic deformation zone. Specifically, suitable supports must be selected for the coal face-roadway intersection, where the surrounding rock mass of the roadway is completely disturbed.

### References

1. Babyr N.V. Topical themes and new trends in mining industry: Scientometric analysis and research visualization. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024. Vol. 37. Issue 2. pp. 439–451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18.
2. Burtan Z., Chlebowski D. The effect of mining remnants on elastic strain energy arising in the tremor-inducing layer. *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 16. Art. No. 6031. DOI: 10.3390/en15166031.

3. Cai T., Li G., Yang Q., Zou J. Study on the instability mechanism and control technology of narrow coal pillar in double-roadway layout of Changping mine. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. No. 16676. DOI: 10.1038/s41598-024-67412-z.
4. Esterhuizen G.S., Gearhart D.F., Klemetti T., Dougherty H., van Dyke M. Analysis of gateroad stability at two longwall mines based on field monitoring results and numerical model analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29. Issue 1. pp. 37–45. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.021.
5. Esterhuizen G.S., Tulu I.B., Gearhart D.F., Dougherty H., Van Dyke M. Assessing support alternatives for longwall gateroads subject to changing stress. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 31. Issue 1. pp. 103–110. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.12.016.
6. Fan H., Niu X., Li S. Failure mechanism and control technology for coal roadway in water-rich area. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 1. Art. No. 410. DOI: 10.3390/su15010410.
7. Guo Y., Liu X., Li W., Du F., Ma J., Qian R. Research on abutment stress distribution of roof-cutting coalface: numerical simulation and field measurement. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024. Vol. 10. Issue 1. Art. No. 86. DOI: 10.1007/s40948-024-00796-4.
8. Han C., Yuan Y., Ding G., Li W., Yang H., Han G. The active roof supporting technique of a double-layer flexible and thick anchorage for deep withdrawal roadway under strong mining disturbance. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 23. Art. No. 12656. DOI: 10.3390/app132312656.
9. He M., Wang Q. Rock dynamics in deep mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023. Vol. 33. Issue 9. pp. 1065–1082. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.006.
10. Kazanin O.I. Promising technology trends in underground coal mining in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2023. Vol. 9. pp. 4–11. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.01. (In Russ)
11. Kongar-Syuryun Ch., Babyr N., Klyuev R., Khayrutdinov M., Zaalishvili V., Agafonov V. Model for assessing efficiency of processing geo-resources, providing full cycle for development—case study in Russia. *Resources*. 2025. Vol. 14. Issue 3. DOI: 10.3390/resources14030051.
12. Kongar-Syuryun Ch.B. Industrial Waste in Backfill Composite – the Paradigm of Environmental and Process Safety during Field Development. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2025. Vol. 3. pp. 73–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-73-78. (In Russ.)
13. Kongar-Syuryun Ch.B. Influence of mine water on the strength of artificial mass based on industrial waste. *Ugol'*. 2024. Vol. 12. pp. 75–78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78. (In Russ.)
14. Kongar-Syuryun Ch.B., Khayrutdinov A.M., Dengaev A.V., Abdulrahman B. Research on the mechanical properties of backfill composite made from coal mining waste. *Ugol'*. 2025. Vol. 3. pp. 145–148. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-145-148. (In Russ.)
15. Kongar-Syuryun Ch.B., Sazankova E.S., Cherevko M.A., Dengaev A.V. A study of the structural defects impact on the strength of rocks. *Ugol'*. 2025. Vol. 5. pp. 97–100. DOI: DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-97-100. (In Russ.)
16. Koteleva N., Khokhlov S., Frenkel I. Digitalization in open-pit mining: A new approach in monitoring and control of rock fragmentation. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 22. DOI: 10.3390/app112210848.
17. Kovalskiy E.R., Kongar-Syuryun Ch.B., Sirenko Yu.G., Mironov N.A. Modeling of rheological deformation processes for room and pillar mining at the Verkhnekamsk potash salt deposit. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16. No. 3. pp. 1017–1030. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030. (In Russ.)
18. Kovalsky E., Kongar-Syuryun Ch., Morgoeva A., Klyue R., Khayrutdinov M. Backfill for advanced potash ore mining technologies. *Technologies*. 2025. Vol. 13. Issue 2. DOI: 10.3390/technologies13020060.
19. Kuranov A., Bagautdinov I., Kotikov D., Zuev B.Y. Integrated approach to safety pillar stability in slice mining in the Yakovlevo deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 1. pp. 115–9. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.23. (In Russ.)

20. Li J., Ren J., Li C., Zhang W., Tong F. Failure mechanism and stability control of soft roof in advance support section of mining face. *Minerals*. 2023. Vol. 13. Issue 2. Art. No. 178. DOI: 10.3390/min13020178.
21. Linh N., Gabov V., Lykov Y., Urazbakhtin R. Evaluating the efficiency of coal loading process by simulating the process of loading onto the face conveyor with a shearer with an additional share. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2021. Vol. 34. Issue 7. pp. 1804–1809. DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.25.
22. Linh N.K., Dinh D.V., Phuc L.Q., Thang N.V. Enhancing the equipment adaptability for removing frame supports in the mine workings. *Ugol'*. 2024. Vol. 9. pp. 81–86. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-81-86. (In Russ.)
23. Linh N.K., Tien N.T., Luan D.C., Dinh D.V., Thang N.V. Enhancing efficiency of steel prop recovery processes in unused mining excavation. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025. Vol. 38. Issue 2. pp. 400–407. DOI: 10.5829/ije.2025.38.02b.14.
24. Liu H.S., Luan H.J., Qiao J.L., Li G.F., Zhang S.H. Failure mechanism and strengthening support technology of gangue containing coal roadway sidewall. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*. 2022. Vol. 4. pp. 38–49. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20220309.001.
25. Mao P., Shimada H., Hamanaka A., Wahyudi S., Oya J., Naung N. Three-dimensional analysis of gate-entry stability in multiple seams longwall coal mine under weak rock conditions. *Earth Science Research Journal*. 2020. Vol. 9. No. 1. DOI: 10.5539/esr.v9n1p72.
26. Phuc L.Q., Dmitriev P.N., Van Duy T., Yunpeng L. Influence of the main roof on the parameters of the abutment pressure zone in the selvedge of the seam. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022. No. (6–1). pp. 68–82. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_68. (In Russ.)
27. Qiang S., Jialiang G., Feng Y., Ruhong B. Cooperative mining technology and strata control of close coal seams and overlying coal pillars. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 73. pp. 473–485. DOI: 10.1016/j.aej.2023.04.071.
28. Sasaoka T., Mao P., Shimada H., Hamanaka A., Oya J. Numerical analysis of longwall gate-entry stability under weak geological condition: A case study of an Indonesian coal mine. *Energies*. 2020. Vol. 13. Art. No. 4710. DOI: 10.3390/en13184710.
29. Szurgacz D. Research on the strain and stress of powered roof support construction to limit damage. *Machines*. 2024. Vol. 12. Issue 12. Art. No. 940. DOI: 10.3390/machines12120940.
30. Tyulyaeva Y.S., Khayrutdinov A.M., Galachieva I.D., Totrukova I.K. Creation of a high-strength backfill composite based on sulfide-bearing technogenic waste from mining production. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16. No. 3. pp. 1384–1396. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1384-1396. (In Russ.)
31. Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M. Creation of a backfill composite based on coal industry waste. *Ugol'*. 2024. Vol. 10. pp. 24–27. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-24-27. (In Russ.)
32. Zeng Q., Ma X., Wan L. et al. Research on the hydraulic support face guard mechanism and coupling characteristic of rib spalling in large mining heights. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. No. 8110. DOI: 10.1038/s41598-024-58542-5.
33. Zhao Y., Zhang N., Wang J. Failure properties of roadway with extra-thick coal seams and its control techniques. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e23990.
34. Zhu Z., Li D. Stability assessment of long gateroad pillar in ultra-thick coal seam: an extensive field and numerical study. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2022. Vol. 8. Art. No. 147. DOI: 10.1007/s40948-022-00455-6.
35. Zuev B.Y., Istomin R.S., Kovshov S.V., Kitsis V.M. Physical modeling the formation of roof collapse zones in Vorkuta coal mines. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*. 2020. Vol. 162. Issue 162. pp. 225–34. DOI: 10.19111/bulletinofmre.620478.





Мохов  
Александр Вадимович  
(1948-2025)

18 ноября 2025 года на 77-м году, после тяжёлой болезни, ушёл из жизни Александр Вадимович Мохов – замечательный человек, мудрый наставник, педагог и исследователь, известный учёный в области геоэкологии, гидрогеологии и геомеханики, ведущий научный сотрудник лаборатории региональной геологии ЮНЦ РАН, профессор Южно-Российского государственного политех-

нического университета, доктор технических наук.

Александр Вадимович родился 19 января 1948 года в городе Фролово, Волгоградской области. В 1971 году окончил **Новочеркасский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт** по специальности «Гидрогеология и инженерная геология».

Областью научных интересов Александра Вадимовича были: исследование притоков подземных вод в горные выработки шахт, рудников, карьеров; прогнозирование опасных инженерно-геологических процессов и явлений, вызванных промышленным освоением месторождений твердых полезных ископаемых.

Александр Вадимович является автором и соавтором более 100 научных и учебно-методических работ, а также разработчиком нормативных документов в сфере недропользования.

Друзья и коллеги Александра Вадимовича всегда отмечали, что он был не только учёным, обладавшим глубокими научными познаниями, талантливым преподавателем, но и путешественником, и разносторонне образованным человеком высокой культуры.

Всем, кто знал Александра Вадимовича, любил, уважал и ценил его, трудно будет привыкнуть к тому, что его больше нет с нами. Память о нём останется навсегда.

Редакция журнала выражает искренние соболезнования родственникам и друзьям Александра Вадимовича по поводу безвременного ухода из жизни прекрасного человека, замечательного преподавателя, Учёного с большой буквы.

*Главный редактор журнала «Геология и геофизика Юга России»  
Владислав Заалишвили*

*Выпускающий редактор журнала «Геология и геофизика Юга России»  
Сергей Парада*

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 1.6.1 Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика; 1.6.4 Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых; 1.6.6 Гидрогеология; 1.6.9 Геофизика; 1.6.10 Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 1.6.11 Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1.6.12 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 1.6.20 Геоинформатика, картография; 1.6.21 Геоэкология; 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика; 2.8.8 Геотехнология, горные машины, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3–5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20–25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, резюме (аннотации) на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи.

Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

### Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <https://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Резюме (аннотация) с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

### Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов (кегль 14 полужирный, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки и ответственного автора.

Резюме (аннотация) должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то резюме (аннотация) должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если

рукопись подается на английском языке, необходимо привести также резюме (аннотацию) на русском. Резюме (аннотация) печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце резюме (аннотации) обязательно указываются ключевые слова (5–8), которые отражают тематику статьи.

Благодарности/Acknowledgements. В этом разделе следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\cos$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$  и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах ( $H_2O$ ) и единицах измерений ( $МВт/см^2$ ) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Все надписи на русском языке на рисунках и в таблицах дублируются на английский. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.



Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем – на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

#### Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

## INFORMATION FOR AUTHORS

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1 General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4 Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6 Hydrogeology; 1.6.9 Geophysics; 1.6.10 Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11 Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields; 1.6.12 Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20 Geoinformatics, cartography; 1.6.21 Geoecology; 2.8.6 Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8 Geotechnology, mining machines and related scientific directions.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes:

– articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

### Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <https://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),
- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

### The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250–300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site (in Russian and in English). Keywords (5–8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\cos$ ,  $\sin$ ,  $\min$ ,  $\max$ , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements ( $H_2O$ ) and measurement units ( $MW/cm^2$ ) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and  $\nu$ , 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  
(№33. 2025 г. Том 15)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 26.12.2025 г. Дата фактического выхода 30.12.2025 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 34,4.

Тираж 100 экз. Заказ № 81.

Свободная цена.

**Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.**

Издатель:

**Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра  
"Владикавказский научный центр Российской академии наук"**

Адрес издателя и редакции:

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

тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

<http://geosouth.ru>

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.

362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3