

ISSN 2221-3198

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 1 / 2024



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 14  
№ 1 / 2024**

**Владикавказ 2024**



**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**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

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

академик РАН **М. Ч. Залиханов**, Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

академик АНГ **Т. Л. Челидзе**, Институт геофизики им. М. Нодия, Грузия

член-корр. НАНА **Г. Д. Етирмишли**, Республиканский Центр Сейсмологической Службы при НАНА, Азербайджан

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

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

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

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

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

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

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

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

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

д.г.м.н., проф. **В. В. Стогний**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

д.ф.-м.н., проф. **Ю. К. Чернов**, Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь

д.г.-м.н. **В. И. Черкашин**, Институт Геологии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала

д.г.н. **В. А. Широкова**, Государственный университет по землеустройству, 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**

*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, 2024

*Фото на обложке – Столовая гора, вид с Суаргомского перевала (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  
Center 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, Southern  
Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

**Alexey D. Gvishiani**, Academician of RAS, Geophysical  
Center of RAS, Moscow, Russian Federation

**Mikhail Ch. Zalikhanov**, Academician of RAS, High  
Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian  
Federation

**Tamaz L. Chelidze**, Academician of Georgian National  
Academy of Sciences (GNAS), M. Nodia Institute  
of Geophysics, Georgia

**Gurban D. Yetirmishli**, Academician of Azerbaijan  
National Academy of Sciences (ANAS), Republican  
Seismic Survey Center of ANAS, Azerbaijan

**David R. Kaplunov**, Corresponding Member of RAS,  
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral  
Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian  
Federation

**Sevada M. Hovhannisyan**, Academician of National  
Academy of Sciences of the Republic of Armenia  
(NAS RA) A. Nazarov Institute of Geophysics and  
Engineering Seismology of NAS RA, Armenia

**Anatoly A. Soloviev**, Corresponding Member of RAS,  
Geophysical Center of RAS, Moscow, Russian Federation

**Peter N. Shebalin**, Corresponding Member  
of RAS, Institute of Earthquake Prediction Theory  
and Mathematical Geophysics RAS, Moscow,  
Russian Federation

**Igor A. Beresnev**, Ph.D., Iowa State University, USA  
**Ganapathy Pattukandan Ganapathy**, Ph.D, Prof. Centre  
for Disaster Mitigation and Management Vellore Institute of  
Technology, India

**Vladimir I. Golik** Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical  
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian  
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

**Aleksey N. Gunya**, Dr. Sci. (Geogr.), Institute of  
Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow  
**Kuo-Liang Wen**, Ph. D., Prof., National Central University,  
Taiwan

**Vladimir M. Makeev**, Dr. Sci. (Geol.Min.), Sergeev Insti-  
tute of Environmental Geoscience (IEG), RAS, Moscow  
**Illarion D. Muzaev** Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical  
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian  
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

**Taxiarchis Papadopoulos** Ph.D., Prof, University  
of Athens, Greece

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

**Ali Pinar**, Ph. D., Prof., Boğaziçi University, Kandilli  
Observatory and Earthquake Research Institute, Department  
of Earthquake Engineering, Turkey

**Valeriy V. Stogny**, Dr. Sci. (Geol.Min.), Prof., Geophysical  
Institute – the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center,  
RAS, Vladikavkaz

**Marina V. Rylnikova** Dr. Sci. (Tech.), Prof., Institute  
of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Yuriy K. Chernov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., North  
Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation  
(Scopus Author ID - 6508237062)

**Vasiliy I. Cherkashin** Dr. Sci. (Geol.-Min.), Institute of  
Geology of Daghestan Scientific Centre of RAS (IG DSC  
RAS), Makhachkala, Russian Federation

**Vera A. Shirokova** Dr. Sci. (Geog.), State University  
of Land Use Planning, 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 Center of the Russian  
Academy of Sciences, Vladikavkaz

**Managing Editor**

**Sergey G. Parada**, Dr. Sci. (Geol.Min.), Prof.

*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, 2024

*Cover photo – Table Mountain, view from Suargomsky Pass (K.S. Kharebov)*

## СОДЕРЖАНИЕ

===== ЛИТОЛОГИЯ =====	
<b>Маслов А.В., Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Бычков А.Ю.</b> Биофильные микроэлементы и углерод в сопочных илах грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа .....	6
===== ГЕОФИЗИКА =====	
<b>Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С.</b> К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK .....	19
<b>Kazimova S.E., Guseinzade G.E., Mammadova P.J.</b> Modern seismogeodynamics of Absheron oil and gas region .....	36
<b>Магомедов Р.А.</b> Оценка геосейсмической опасности северо-восточного сегмента Восточного Кавказа .....	49
<b>Овсюченко А.Н., Едемский Е.Д., Нечаев С.Ю., Корженков А.М., Заалишвили В.Б., Ларьков А.С., Аверин А.А.</b> Исследования очагов сильных исторических землетрясений методами геофизики, палео-, архео- и исторической сейсмологии: Фиагдонская котловина в Северной Осетии.....	64
<b>Ogwu D.A., Molua O.C., Irunkwor T.C., Ataman J.O., Edobor M, Ukpene A.O., Egheneji A.O.</b> Geo-electric assessment of groundwater potentials and vulnerability to contaminants for sustainable water management at Utue-Ogume, Delta State, Nigeria .....	90
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ =====	
<b>Гусев А.И.</b> Литий-цезий-танталовые пегматиты горы Ваза-Хох (Северный Кавказ) .....	102
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ =====	
<b>Черненко К.И.</b> Оценка влияния тектонического фактора на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях нефтекумской свиты (на примере Восточно-Безводненского месторождения) .....	114
===== ГЕОЭКОЛОГИЯ =====	
<b>Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С.</b> Геозкологический мониторинг и ремедиация территории Моздокского нефтепродуктового загрязнения.....	127
<b>Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Дубровская С.А.</b> Изучение поглощительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России).....	141
===== ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА =====	
<b>Голик В.И., Бурдзиева О.Г.</b> Извлечение металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд с активацией процессов путем комбинирования химической и механической энергии .....	152
<b>Mammadov P.Y.</b> Investigating the geothermal energy potential of Absheron region for electricity generation using binary cycle technology .....	162



---



---

## CONTENTS

---



---



---



---

### LITHOLOGY

---



---

- Maslov A.V., Starodymova D.P., Shevchenko V.P., Bychkov A.Yu.**  
Biophilic trace elements and carbon in the silty-pelitic sediments of mud volcanoes  
in the Northwestern Caucasus..... 6

---



---

### GEOPHYSICS

---



---

- 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..... 19
- Kazimova S.E., Guseinzade G.E., Mammadova P.J.**  
Modern seismogeodynamics of Absheron oil and gas region ..... 36
- Magomedov R.A.**  
Assessment of geoseismic hazard of the north-eastern segment of the Eastern Caucasus..... 49
- Ovsyuchenko A.N., Edemsky D.E., Nechaev S.Yu., Korzhenkov A.M., Zaalishvili V.B., 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 ..... 64
- Ogwu D.A., Molua O.C., Irunwor T.C., Ataman J.O., Edobor M., Ukpene A.O., Egheneji A.O.**  
Geo-electric assessment of groundwater potentials and vulnerability to contaminants for sustainable water  
management at Utue-Ogume, Delta State, Nigeria ..... 90

---



---

### GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

---



---

- Gusev A.I.**  
Lithia-caesium-tantalum pegmatites of mountain Vaza-Khokh (Northern Caucasus). ..... 102

---



---

### GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

---



---

- Chernenko K.I.**  
Assessment of tectonic factor influence on the formation of zones of increased productivity  
of oil deposits in carbonate rocks of the Neftekumsk suite (on the example  
of the Vostochno-Bezvodnenskoye field) ..... 114

---



---

### GEOECOLOGY

---



---

- Alborov I.D., Burdzieva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S.**  
Geo-ecological monitoring and remediation of the Mozdok area polluted by oil products..... 127
- Myachina K.V., Kerimov I.A., Rakhov R.V., Dubrovskaya S.A.**  
Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data  
(steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples) ..... 141

---



---

### GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS

---



---

- Golik V.I., Burdzieva O.G.**  
Extraction of metals from low-grade raw materials and ore processing tailings with process activation by  
combining chemical and mechanical energy..... 152
- Mammadov P.Y.**  
Investigating the geothermal energy potential of Absheron region for electricity generation using  
binary cycle technology ..... 162

УДК 551

DOI: 10.46698/VNC.2024.59.20.001

Оригинальная статья

## Биофильные микроэлементы и углерод в сопочных илах грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа

А.В. Маслов<sup>1</sup>, Д.П. Стародымова<sup>2</sup>, В.П. Шевченко<sup>2</sup>, А.Ю. Бычков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1,  
e-mail: amas2004@mail.ru;

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский  
пр-т, 36, e-mails: d.smokie@gmail.com, vshevch@ocean.ru;

<sup>3</sup> Геологический факультет, Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1,  
e-mail: andrewbychkov66@yandex.ru

Статья поступила: 07.12.2023, доработана: 24.02.2024, принята к публикации: 28.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Грязевой вулканизм вызывает большой интерес у специалистов разного профиля. Его исследования имеют значение для оценки энергетических ресурсов, анализа сейсмичности, прогноза содержания парниковых газов в атмосфере, в том числе уточнения глобального баланса метана. В то же время, исследований в области неорганической геохимии продуктов грязевого вулканизма, а также работ, направленных на изучение взаимосвязи редких и рассеянных, в том числе биофильных (Cu, Co, Zn, V, Ni, Mo и др.) элементов сопочных илов с общим ( $C_{\text{общ}}$ ), карбонатным ( $C_{\text{карб}}$ ) и органическим ( $C_{\text{орг}}$ ) углеродом все еще мало. **Цель исследования.** Настоящая публикация призвана в какой-то мере заполнить указанный пробел на основе анализа данных о содержании биофильных элементов, а также углерода в сопочном иле ряда грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа (Ахтанизовский, Семигорский, Гладковский, Шуго, Миска, Школьный и Гефест). **Методы.** Определение содержания биофильных, как и других, микроэлементов проведено методом ICP-MS. Содержание  $C_{\text{общ}}$  и  $C_{\text{орг}}$  установлено методом инфракрасной спектроскопии на приборе METABAK CS-30. Статистическая обработка данных включала сопоставление содержания элементов с их содержанием в таких референтных объектах, как средний постархейский австралийский глинистый сланец (PAAS) и майкопские глины, корреляционный анализ на основе коэффициентов парной корреляции Спирмена и анализ методом главных компонент. **Результаты.** Установлено, что среднее содержание биофильных элементов, за исключением Sr, составляет от 50 до 90% от их содержания в PAAS. Содержание  $C_{\text{орг}}$  варьирует в изученных пробах от 0,41 до 1,49 мас. %. Между концентрациями ряда биофильных элементов и  $C_{\text{орг}}$  в сопочных илах наблюдается статистически значимая положительная взаимосвязь. Это предполагает, что некоторые биофильные элементы в сопочном иле перечисленных выше грязевых вулканов достаточно прочно связаны с органическим веществом. Анализ взаимосвязей микроэлементов,  $C_{\text{орг}}$  и  $C_{\text{карб}}$  при помощи метода главных компонент показал, что на первые две главные компоненты приходится 58,8% общей дисперсии.  $C_{\text{карб}}$  имеет положительную нагрузку на ГК1, в то время как  $C_{\text{орг}}$  имеет отрицательные нагрузки. Выявленные факторы могут отражать как состав источников сопочных илов, так и свидетельствовать о том, что содержание микроэлементов в них является следствием изменения вмещающих пород в грязевулканическом процессе, но верификация сказанного – задача будущих исследований.

**Ключевые слова:** Северо-Западный Кавказ, грязевые вулканы, сопочный ил, биофильные микроэлементы, общий, карбонатный и органический углерод.

**Благодарности:** Авторы признательны Г.И. Комарову, А.Г. Курилко, В.И. Русанову, Н.Н. Русановой и А.В. Шевченко за помощь в отборе проб. Благожелательные отзывы анонимных рецензентов во многом

способствовали уточнению ряда важных положений рукописи. Интерпретация результатов выполнена за счет средств государственной субсидии ГИН РАН и ИО РАН на выполнение фундаментальных исследований.

**Для цитирования:** Маслов А.В., Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Бычков А.Ю. Биофильные микро-элементы и углерод в сопочных илах грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2024.59.20.001

## LITHOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2024.59.20.001

Original paper

## Biophilic trace elements and carbon in the silty-pelitic sediments of mud volcanoes in the Northwestern Caucasus

A.V. Maslov<sup>1</sup>, D.P. Starodymova<sup>2</sup>, V.P. Shevchenko<sup>2</sup>, A.Yu. Bychkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7 Pyzhevsky lane, 1 bld.,  
Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: amas2004@mail.ru;

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovskiy pr-t,  
Moscow 117997, Russian Federation, e-mails: d.smokie@gmail.com, vshevch@ocean.ru;

<sup>3</sup> Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991,  
Russian Federation, e-mail: andrewbychkov66@yandex.ru

Received: 07.12.2023, revised: 24.02.2024, accepted: 28.02.2024

**Abstract: Relevance.** Mud volcanism is of great interest to specialists in various fields. Its research is important for assessing energy resources, analyzing seismicity, forecasting greenhouse gas levels in the atmosphere, including refining the global methane balance. At the same time, research in the field of inorganic geochemistry of products of mud volcanism, as well as work aimed at studying the relationship of trace elements, including biophilic (Cu, Co, Zn, V, Ni, Mo, etc.), elements of silty-pelitic sediments with total ( $C_{tot}$ ), carbonate ( $C_{carb}$ ) and organic ( $C_{org}$ ) carbon is still insufficient. **Aim.** This paper is intended to fill this gap to some extent based on the analysis of data on the content of a wide range of elements, as well as  $C_{tot}$  and  $C_{org}$ , in the silty-pelitic sediments of a number of mud volcanoes in the Northwestern Caucasus (Akhtanizovskiy, Semigorskiy, Gladkovskiy, Shugo, Miska, Shkol'ny and Hephaestus). **Methods.** The determination of the content of biophilic elements was carried out using the ICP-MS method. Analysis of the  $C_{tot}$  and  $C_{org}$  content was carried out using infrared spectroscopy on a METAVAC CS-30 device. Statistical data processing included comparison of the content of the trace elements with their content in Post-Archaean Average Australian Shale (PAAS) and Maikopian clays, correlation analysis based on Spearman pair correlation coefficients and Principal Component Analysis (PCA). **Results.** The average content of biophilic elements, with the exception of Sr, was found to range from 50 to 90% of their content in such a reference object as PAAS. The average  $C_{org}$  content varies in samples from 0,41 to 1,49 wt %. A statistically significant relationship is observed between the concentrations of some biophilic elements and  $C_{org}$  in the silty-pelitic sediments of mud volcanoes. This suggests that the biophilic elements in the silty-pelitic sediments of the mud volcanoes listed above are quite strongly associated with organic matter. Analysis of the relationships between trace elements,  $C_{org}$  and  $C_{carb}$  using the PCA showed that the first two principal components accounted for 58,8% of the total variance.  $C_{carb}$  has a positive loading on PC1, while  $C_{org}$  has negative loadings. The identified factors may reflect both the composition of the sources and indicate the some extraction of the several elements during changes in the host rocks in the mud volcanic process.

**Keywords:** Northwestern Caucasus, mud volcanoes, silty-pelitic sediments, biophilic trace elements, total, carbonate and organic carbon.



**Acknowledgments:** *The authors are grateful to G.I. Komarov, A.G. Kurilko, V.I. Rusanov, N.N. Rusanova and A.V. Shevchenko for assistance in sampling. The favorable reviews of the anonymous reviewers greatly contributed to the clarification of a number of important provisions of the manuscript. The interpretation of the results was carried out using state subsidies from the Geological Institute of the RAS and the Shirshov Institute of Oceanology of the RAS for fundamental research.*

**For citation:** Maslov A.V., Starodymova D.P., Shevchenko V.P., Bychkov A.Yu. Biophilic trace elements and carbon in the silty-pelitic sediments of mud volcanoes in the Northwestern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2024.59.20.001

## Введение

В обзоре [Mazzini, Etiope, 2017] грязевой вулканизм рассматривается как одно из интригующих геологических явлений, результаты исследования которого важны для многих областей (оценка энергетических ресурсов, анализ сейсмичности и других геологических опасностей, прогноз содержания парниковых газов в атмосфере и др.). Грязевым вулканам (ГВ), известным на большинстве континентов, в последние годы уделяется большое внимание разными специалистами. В центре их внимания находятся как классические, так и появившиеся недавно вопросы. Среди последних – молекулярный и изотопный состав выделяемых ГВ газов, влияние ГВ на глобальный баланс атмосферного метана и др. К сожалению, в приведенном перечне не нашлось места неорганической геохимии продуктов грязевого вулканизма и возможной взаимосвязи редких и рассеянных, в том числе биофильных (Cu, Co, Zn, V, Ni, Mo и др. [Геологический..., 1978; Российская..., 2010]) элементов сопочных илов с присутствующим в них углеродом. Цель настоящей работы – в какой-то мере заполнить этот пробел.

В литературе имеется немного данных о распределении в продуктах ГВ рассматриваемого региона редких и рассеянных элементов. Указывается (преимущественно на основании данных спектрального анализа), что сопочные отложения постоянно заражены В и Мо, концентрации которых не зависят от геохимической специализации пород фундамента ГВ. Отмечаются повышенные концентрации В, Hg, As и Li, что предполагает значительную глубину залегания их корней [Ходькова, Гемп, 1970; Шнюков и др., 1992]. На основе данных ICP-MS в публикации [Федоров и др., 2011] проанализированы концентрации редких и рассеянных элементов в сопочном иле ГВ Шуго, Тиздар и Семигорский. Данные о химическом составе глинистых фракций продуктов ГВ Северо-Западного Кавказа приведены в работе [Лаврушин, 2012]. Высказано предположение, что он определяется положением ГВ относительно структурных элементов региона и контролируется спецификой состава источников вещества. В работе [Sokol et al., 2018] показано, что валовые пробы сопочного ила ГВ Булганак (Керченский п-ов) обогащены Na и В относительно PAAS. В них также больше, чем в верхней континентальной коре (UCC [Rudnick, Gao, 2014]) Li, Cs, U, Zn, Co, V, As, Se, Sb, Hg и Cd.

Как установлено ранее [Маслов, Шевченко, 2020], содержание большинства редких и рассеянных элементов в валовых пробах сопочного ила ГВ Северо-Западного Кавказа ниже, чем в PAAS [Taylor, McLennan, 1985] и майкопских глинах, рассматривающихся как основной источник слагающего продукты ГВ материала. Так, среднее содержание Sc, V, Cr, Co, Ni, Zn, Rb, Y, Hf и U составляет менее 0,80 от их содержания в глинах майкопской серии, по [Sokol et al., 2018]. Сопоставимыми (0,8–1,2\* $C_{\text{средний майкоп}}$ ) средними концентрациями характеризуются Cu, Nb, Mo,

PЗЭ и Th, и только среднее содержание Sr, Cs и Ba превышает  $1,2 \cdot C_{\text{средний майкоп}}$ . Это позволяет считать не вполне обоснованным вывод о том, что основным источником материала для сопочных илов ГВ являлись именно майкопские глины, однако корректно решить эту проблему, не имея представительных геохимических данных для других возможных источников, сейчас нельзя.

### Краткий геологический очерк, материал и методы исследования

ГВ Кавказа и прилежащих регионов являются хорошо известным и зрелищным геологическим феноменом, изучением которого занимались и занимаются многие специалисты [Шнюков и др., 1986, 1992; Холодов, 2012; Лаврушин, 2012; Федоров, 2012; Овсяченко, Сысолин, 2016; Алиев, Етирмишли, 2021; Етирмишли, Казымова, 2023 и др.]. Только на Северо-Западном Кавказе расположено более 40 ГВ, из которых примерно четверть действующие. Их корни локализованы, по мнению многих специалистов, на глубинах 6–7 км в глинистых толщах майкопской серии олигоцена–нижнего миоцена. В то же время в выбросах ряда ГВ идентифицированы породы юрского и мелового возраста [Жопаевич и др., 2022 и ссылки в этой работе]. ГВ широко распространены и в прилегающей к Северо-Западному Кавказу акватории Черного и Азовского морей, образуя единую Азово-Черноморскую провинцию [Шнюков и др., 1992].

Северо-Западный Кавказ, включающий восточную часть Керченско-Таманской области, расположен на стыке альпийских складчатых сооружений Крыма и Кавказа. Он характеризуется сложным геологическим строением. На относительно небольшой территории здесь выделяются Кавказский мегантиклинорий, Индоло-Кубанский предгорный прогиб, Керченско-Таманский поперечный прогиб и другие структуры [Шнюков и др., 1986; Маринин, Расцветаев, 2008; Трихунков и др., 2019].

Самыми древними, выходящими на поверхность или залегающими под четвертичными осадками, являются меловые отложения, а также породы палеоцена и эоцена. Широко распространены отложения олигоцена и нижнего миоцена (майкопская серия, серые и буровато-серые глины с содержанием  $C_{\text{орг}} \leq 0,5$  мас. %), а также среднего и верхнего миоцена (известковые и песчаные глины, песчано-алевритовые отложения, известняки в т.ч. мшанковые и ракушечники, песчаники) и плиоцена. Последние включают известняки, песчаники и глины, песчано-алевритистые отложения с прослоями железных руд и песков, и занимают большую часть Таманского полуострова. Четвертичные отложения (песчанистые глины с прослоями алевролитов и кварцевых песков и др.) имеют значительную мощность в приустьевой части р. Кубань.

Осадочное выполнение Индоло-Кубанского предгорного прогиба, западные районы которого охватывают Таманский полуостров, слагают песчано-глинистые толщи олигоцена, миоцена и плиоцена, подстилаемые терригенно-карбонатными комплексами юры и мела. Суммарная их мощность достигает 6–12 км; значительная часть осадочного выполнения прогиба приходится на песчано-глинистые породы майкопской серии [Шнюков и др., 1986].

Подавляющее большинство ГВ Северо-Западного Кавказа приурочено к ядрам антиклиналей, проявляющихся во всей толще кайнозойских и триасово-юрских отложений. Результаты структурных исследований и геофизические материалы

свидетельствуют о том, что ГВ тяготеют к разрывным нарушениям глубокого заложения [Шнюков и др., 1986]. Большинство ГВ характеризуются наличием центрального кратера с действующими или потухшими грифонами и вулканических конусов/сопок (сальз), сложенных сопочной брекчией.

В настоящей работе рассматривается распределение биофильных элементов и углерода в валовых пробах сопочного ила ГВ Ахтанизовский ( $45^{\circ}18,72'$  с.ш.,  $37^{\circ}4,91'$  в.д.), Семигорский ( $44^{\circ}54,06'$ ,  $37^{\circ}35,84'$ ), Гладковский ( $45^{\circ}0,33'$ ,  $37^{\circ}43,41'$ ), Шуто ( $45^{\circ}4,21'$ ,  $37^{\circ}36,67'$ ), Миска ( $45^{\circ}16,54'$ ,  $37^{\circ}23,34'$ ), Школьный ( $45^{\circ}1,69'$ ,  $37^{\circ}35,12'$ ) и Гефест (Гнилая сопка) ( $45^{\circ}15,1'$ ,  $37^{\circ}26,15'$ ) (рис. 1). Перечисленные ГВ расположены вдоль виртуального профиля, ориентированного с ЮВ на СЗ от горной области к побережью Азовского моря, и пересекающего ряд крупных геологических структур Северо-Западного Кавказа. Пробы были отобраны в мае 2016, мае 2017 гг. и в июне 2019 г. На каждом из вулканов работали в течение одного дня. В большинстве случаев отбирали водогрязевую смесь из грифонов, только на ГВ Шуто отобрали дополнительно 5 сухих корок толщиной 3–5 мм и одну пробу разжиженной глины на краях тех же грифонов (которых на Шуто в день отбора было меньше, чем на Гефесте, но в разы больше, чем 5); всего, таким образом, продукты грязевого вулканизма названного вулкана представлены в нашей коллекции 11 пробами. Пробы сопочного ила отбирались из действующих грифонов в полимерные стерильные контейнеры для биоматериалов, используя одноразовые полиэтиленовые перчатки. В лаборатории пробы хранились при температуре  $4^{\circ}\text{C}$ . По данным изучения смесляйдов, во всех пробах преобладают пелитовые частицы с примесью алеврита.

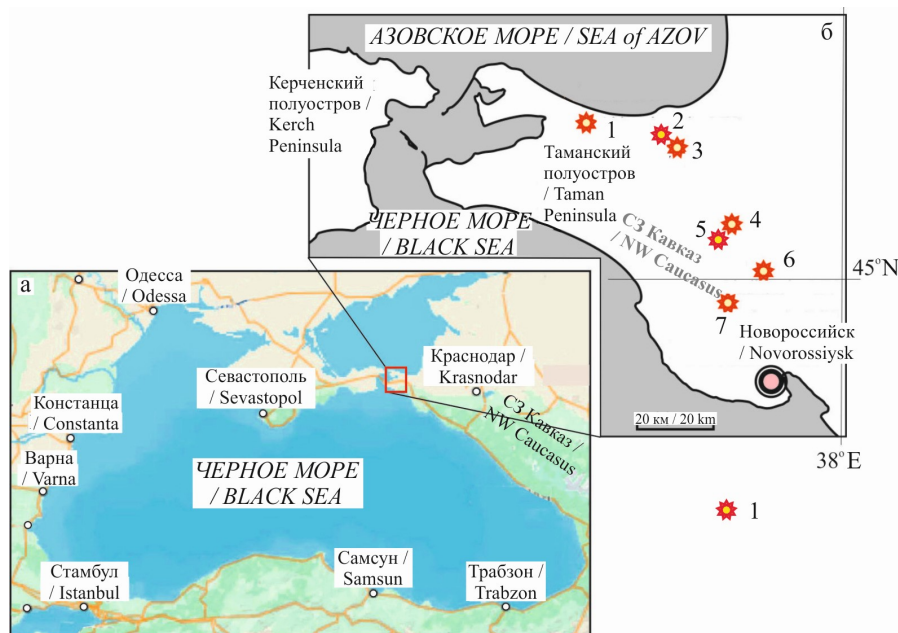


Рис. 1. Обзорная схема (а) и положение ГВ Северо-Западного Кавказа (1), геохимические характеристики сопочных илов, которые рассматриваются в данной работе (б)  
1 – ГВ Ахтанизовский; 2 – ГВ Миска; 3 – ГВ Гефест; 4 – ГВ Шуто; 5 – ГВ Школьный;  
6 – ГВ Гладковский; 7 – ГВ Семигорский /

Fig. 1. Overview map (a) and position of MVs in the North-Western Caucasus (1), the geochemical characteristics of the silty-pelitic sediments of which are considered in this work (b)  
1 – MV Akhtanizovskiy; 2 – MV Miska; 3 – MV Hephaestus; 4 – MV Shugo; 5 – MV Shkol'ny;  
6 – MV Gladkovskiy; 7 – MV Semigorskiy



Перед высушиванием аликвоты, предназначенной на элементный анализ, единичные зёрна, видимые невооруженным глазом, удаляли с помощью пластикового пинцета. Пробы высушивали при температуре 100°C и растирали в агатовой ступке; иной предварительной обработке они не подвергались. Определение содержания редких и рассеянных, в том числе биофильных, элементов (табл. 1) проведено методом ICP-MS на масс-спектрометре ELAN 9000 (Perkin Elmer Instruments) в ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) по методике, близкой к описанной в работе [Маслов и др., 2011]. Разложение проб осуществлялось в микроволновой печи смесью кислот  $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{HF}$  с использованием системы Berghof Speedwave MWS 3+. Пределы обнаружения элементов составляли 0,005–0,1 г/т, точность – 3–7 %. Качество анализа контролировали с использованием стандартных образцов горных пород ОУ-10 и МГТ-1. Относительные стандартные отклонения результатов измерений не превышали 30%; систематические ошибки не выявлены. Анализ содержания в сопочных илах  $C_{\text{общ}}$  и  $C_{\text{орг}}$  проведен методом инфракрасной спектроскопии на приборе МЕТАВАК CS-30 (Институт океанологии РАН, г. Москва). Погрешность анализов составляла ниже 6% в измеряемом диапазоне значений. Сходимость результатов измерения стандартных образцов с паспортными значениями составила 100–120% для СО «Почва стандартная песчаная» и «Почва со средним содержанием органики». Содержание карбонатного углерода ( $C_{\text{карб}}$ ) вычислено как разность между  $C_{\text{общ}}$  и  $C_{\text{орг}}$ .

Таблица 1 / Table 1

**Содержание биофильных элементов (г/т),  $C_{\text{общ}}$  и  $C_{\text{орг}}$  (мас. %) в пробах сопочного ила грязевых вулканов /**  
**Content of biophilic elements (ppm),  $C_{\text{tot}}$  and  $C_{\text{org}}$  (wt %) in samples of silty-pelitic sediments from mud volcanoes**

Компоненты / Components	Грязевой вулкан / Mud volcano											
	Шуго / Shugo											Ахтанзовский / Akhtanizovsky
	Образец / Sample											
	Ш-1-1 (ж)	Ш-1-2 (с)	Ш-2-1 (ж)	Ш-2-2 (с)	Ш-4-1 (ж)	Ш-4-2 (с)	Ш-5-1 (ж)	Ш-5-2 (с)	Ш-6-1 (в)	Ш-8-1 (ж)	Ш-8-2 (с)	К-19-4
V	62	74	63	62	77	72	85	85	66	58	61	100
Cr	52	58	50	49	62	59	68	67	53	46	47	70
Co	10	10	9	9	10	10	12	11	9	8	8	16
Ni	33	33	30	31	36	34	40	37	32	28	29	40
Cu	37	39	36	36	43	39	48	45	38	39	35	50
Zn	56	61	56	55	66	71	72	71	56	52	54	120
Sr	298	271	230	227	222	299	278	250	240	230	262	140
Mo	0,84	0,76	0,55	0,60	0,59	0,66	0,71	0,77	0,62	0,42	0,58	2,00
Sn	2,36	2,71	2,92	2,63	2,88	2,64	3,08	2,78	2,98	2,83	2,82	1,90
$C_{\text{общ}} / C_{\text{tot}}$	2,671	2,183	2,030	2,060	2,172	1,916	2,010	1,917	1,986	1,986	1,905	1,044
$C_{\text{орг}} / C_{\text{org}}$	0,675	0,800	0,863	0,806	0,865	0,666	0,750	0,685	0,721	0,742	0,676	0,556

Компоненты / Components	Грязевой вулкан / Mud volcano											
	Миска / Miska		Семигорский / Semigorsky			Гефест / Hephaestus			Школьный / Shkol'ny		Гладковский / Gladkovsky	
	Образец / Sample											
	ГВМ-1	ГВМ-2	ГВС-1	ГВС-2	ГВС-3	ГВГ-1	ГВГ-2	ГВГ-3	ГВШ-1	ГВШ-2	К-19-13	К19-14-1
V	136	135	90	120	110	100	87	94	141	155	80	70
Cr	94	94	68	88	75	81	62	74	85	94	80	60
Co	19	17	14	16	17	15	13	13	17	17	14	12
Ni	48	42	49	41	45	35	35	33	45	46	40	35
Cu	43	36	63	30	44	27	50	23	41	45	90	50
Zn	82	80	95	61	61	62	71	51	64	78	150	120
Sr	165	131	402	113	196	177	514	153	98	92	80	110
Mo	3,89	3,06	0,97	1,04	12,57	1,06	0,60	2,83	13,51	12,76	0,80	0,40
Sn	1,99	2,20	1,85	2,02	1,80	1,89	1,76	1,77	2,20	2,84	2,00	1,70
C <sub>общ</sub> / C <sub>tot</sub>	1,889	2,009	2,517	2,554	2,903	1,338	1,415	1,091	1,844	1,807	0,694	0,875
C <sub>орг</sub> / C <sub>org</sub>	1,278	1,339	0,978	1,122	0,868	0,433	0,512	0,411	1,491	1,405	0,502	0,706

Примечание. Для проб сопочного ила ГВ Шуго в скобках указано состояние проб: (ж) – жидкое, (с) – сухое, (в) – влажное.  
 Note. For samples of silty-pelitic sediments from MV Shugo, the state of the samples is indicated in parentheses: (ж) – liquid, (с) – dry, (в) – wet

Статистическая обработка полученных данных выполнена с использованием программы Statistica 7 и включала корреляционный анализ (КА) на основе коэффициентов парной корреляции Спирмена между элементами и анализ методом главных компонент (МГК).

### Фактический материал и его обсуждение

Содержание V в нашей выборке ( $n = 24$ ) составляет  $91 \pm 28$  г/т (минимум – 58, максимум – 155 г/т). Содержание Co варьирует от 8 до 19 г/т (в среднем –  $13 \pm 3$  г/т). Содержание Ni равно  $37 \pm 6$  г/т (28–49 г/т). Содержание Cu и Zn находится в пределах 23–90 и 51–150 г/т ( $Cu_{\text{среднее}} = 43 \pm 13$ ,  $Zn_{\text{среднее}} = 73 \pm 25$  г/т). Содержание Sr равно  $216 \pm 102$  г/т (80–514 г/т), а Mo –  $2,61 \pm 4,10$  г/т (минимум – 0,40, максимум – 13,51 г/т). Это показывает, что среднее содержание V, Co, Ni, Cu и Zn в исследованных нами пробах меньше, чем в PAAS (соответственно – 150, 23, 55, 50 и 85 г/т [Taylor, McLennan, 1985]). Содержание Mo демонстрирует существенные вариации: в сопочных илах ГВ Миска, Ахтанизовский и Гефест (1 проба из 2х) оно составляет 2,00–3,89 г/т, в сопочных илах ГВ Школьный и Семигорский (1 проба из 2х) превышает 12 г/т, тогда как в остальных 17 пробах содержание Mo  $\sim 1$  г/т и менее. Только величина  $Sr_{\text{среднее}}$  в исследованной коллекции немного выше, чем в PAAS (216 против 200 г/т), что связано с примесью карбонатного вещества. Максимальное содержание V (ГВ Школьный), Cu и Zn (ГВ Гладковский) выше, чем в PAAS; для других биофильных элементов, кроме Mo, оно не превышает содержание в указанном референтном объекте (рис. 2).

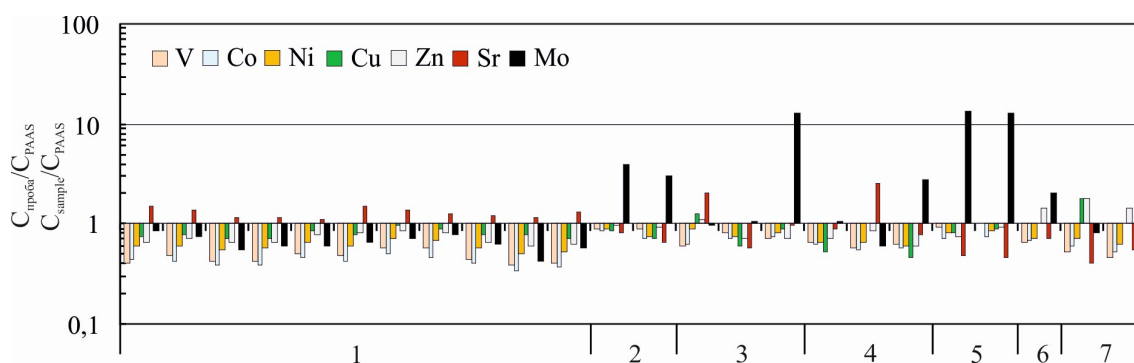


Рис. 2. Нормированное к PAAS содержание биофильных элементов в исследованной коллекции сопочных илов ряда грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа  
1 – ГВ Шуго; 2 – ГВ Миска; 3 – ГВ Семигорский; 4 – ГВ Гефест; 5 – ГВ Школьный;  
6 – ГВ Ахтанизовский; 7 – ГВ Гладковский /

Fig. 2. The content of biophilic elements normalized to PAAS in the studied collection of silty-pelitic sediments of some Northwestern Caucasus mud volcanoes  
1 – MV Shugo; 2 – MV Miska; 3 – MV Semigorsky; 4 – MV Hephaestus; 5 – MV Shkol'ny;  
6 – MV Akhtanizovsky; 7 – MV Gladkovsky

Содержание  $C_{\text{общ}}$  в исследованных пробах составляет  $1,87 \pm 0,55$  мас. % (минимум – 0,69, максимум – 2,90 мас. %). Содержание  $C_{\text{орг}}$  варьирует от 0,41 до 1,49 мас. % ( $0,83 \pm 0,30$  мас. %). Максимальное содержание  $C_{\text{орг}}$  (1,41–1,49 мас. %) свойственно сопочным илам ГВ Школьный. Эти данные в целом согласуются с теми, что приведены для сопочной брекчии ГВ Керченского полуострова ранее [Ershov, Levin, 2016].

Анализ величин коэффициентов парной корреляции ( $r$ ) концентраций биофильных элементов и  $C_{\text{орг}}$  в сопочных илах исследованных нами ГВ Северо-Западного Кавказа показал отсутствие значимой взаимосвязи между некоторыми из них. Так, для Cu и  $C_{\text{орг}}$  величина  $r$  составляет – 0,08, для Zn и  $C_{\text{орг}}$  данный параметр равен – 0,09, для Sn и  $C_{\text{орг}}$  – 0,11, а для Sr и  $C_{\text{орг}}$  – 0,34 (в данном случае, как отмечено выше, содержание Sr контролируется скорее содержанием карбонатной примеси, а не органического углерода). В то же время для V, Co, Ni и Mo и  $C_{\text{орг}}$  он равен соответственно 0,71, 0,51, 0,61 и 0,61 (рис. 3), что показывает превышение величиной  $r$  ее критического значения при 5% уровне значимости [Соловов, Матвеев, 1985]. Между Sr и  $C_{\text{орг}}$  в сопочных илах также существует значимая положительная корреляция ( $r = 0,55$ ). Это дает основание считать, что только некоторые биофильные элементы в сопочном иле исследованных нами ГВ образуют устойчивую ассоциацию с  $C_{\text{орг}}$ .

Анализ корреляционных связей с помощью КА позволил выделить две большие группы элементов, связанных между собой значимыми корреляциями (биофильные элементы среди них здесь и далее показаны курсивом): первая объединяет *V, Cr, Co, Ni, Mo, Cd, Sc, Cu* и *Zn*, вторая – *Rb, PЗЭ, Th, Ba, Sr* и  $C_{\text{карб}}$ . Между группами имеются статистически незначимые отрицательные корреляции. Для многих элементов из первой группы характерна положительная корреляция с  $C_{\text{орг}}$  (см. рис. 3). Для первой группы установлена положительная корреляция, для второй – слабая отрицательная.



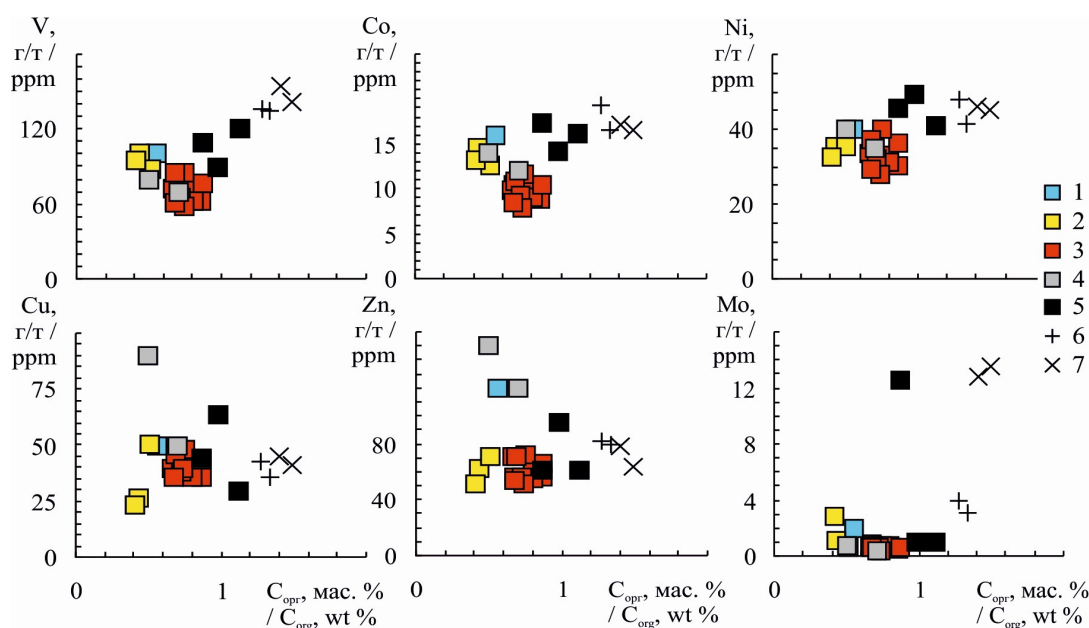


Рис. 3. Корреляция содержания  $C_{org}$  и некоторых биофильных элементов в сопочных илах грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа

1 – ГВ Ахтанизовский; 2 – ГВ Гефест; 3 – ГВ Шуго; 4 – ГВ Гладковский; 5 – ГВ Семигорский; 6 – ГВ Миска; 7 – ГВ Школьный /

Fig. 3. Correlation of the  $C_{org}$  and a content of the some biophilic elements in the silty-pelitic sediments of the Northwestern Caucasus mud volcanoes

1 – MV Akhtanizovsky; 2 – MV Hephaestus; 3 – MV Shugo; 4 – MV Gladkovsky; 5 – MV Semigorsky; 6 – MV Miska; 7 – MV Shkol'ny

МГК позволяет определить химические элементы, которые демонстрируют сходные геохимические закономерности распределения или поведения в осадочной среде, а также выявить основные факторы, контролирующие геохимические вариации в образцах. Это может помочь в выявлении геохимических признаков, связанных с определенными геологическими процессами или характером минерализации. На первые две главные компоненты (ГК) приходится 58,8% (42,0% ГК1+16,8% ГК2) общей дисперсии. Наблюдается контраст между двумя группами элементов, проецирующихся на противоположные стороны ГК1:  $V$ ,  $Cr$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ,  $Sc$ ,  $As$  против  $Rb$ ,  $Th$  и РЗЭ (рис. 4а).  $C_{карб}$  имеет положительную нагрузку на ГК1, в то время как  $C_{орг}$ , как правило, находится на противоположной стороне этого фактора. Такие элементы, как  $Sr$  и  $Ba$  расположены вблизи точки  $C_{карб}$  на графике ГК1–ГК2. Выявленные факторы могут отражать как состав источников поступления, так и накопление металлов в результате изменения вмещающих пород в ходе вулканического процесса [Talas et al., 2015; Carvalho et al., 2018]. Оценки главных компонент для проб сопочного ила ГВ Шуго показали положительные значения ГК1 в отличие от других мест отбора проб. Наибольшие отрицательные значения ГК1 получены для сопочных илов ГВ Миска и Школьный. Остальные пробы расположены между этими крайними значениями по оси ГК1 (рис. 4б). Сопочные илы ГВ Шуго характеризуются достаточно контрастным составом по сравнению с другими образцами. Если не считать сопочных илов ГВ Шуго, то наиболее контрастными по составу являются сопочные илы ГВ Семигорский и ГВ Гладковский (с одной стороны) и ГВ Школьный (с другой). Пробы сопочного ила остальных ГВ расположены на графике ГК1–ГК2 между этими двумя объектами.

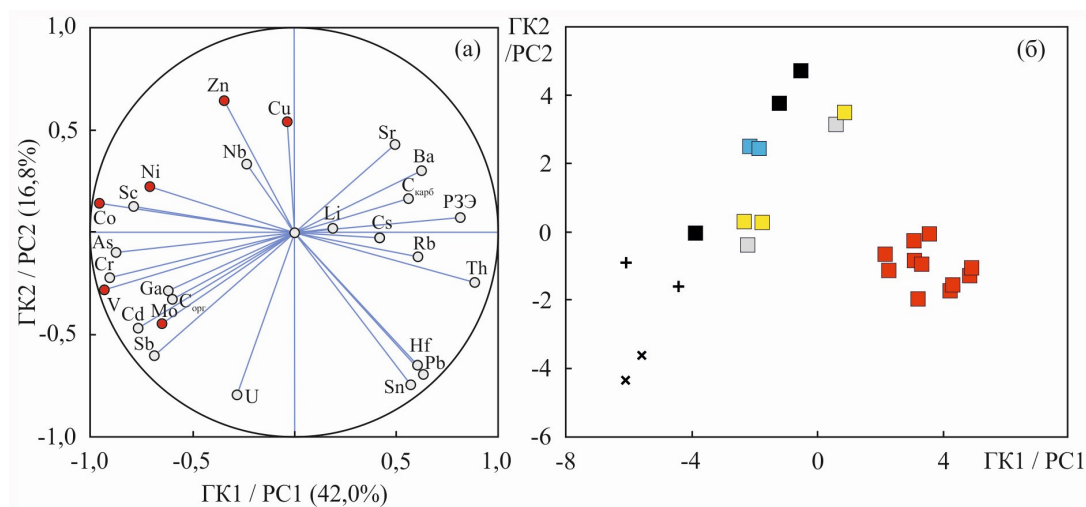


Рис. 4. Результаты анализа методом главных компонент: (а) Нагрузки двух наиболее значимых ГК на химические элементы,  $C_{org}$  и  $C_{carb}$ ; (б) значения двух компонент в образцах сопочных илов.

Красные кружки в части (а) – биофильные элементы

Условные обозначения см. рис. 3 /

Fig. 4. The results of principle component analysis: (a) Projection of the trace elements,  $C_{org}$  and  $C_{carb}$  loadings on the Factor 1 vs. Factor 2 plot; (б) Biplots of the first two PCs scores: PC1 vs PC2.

Red circles in part (a) – biophilic elements.

Legend see fig. 3.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что среднее содержание биофильных элементов (V, Co, Cr, Ni, Cu, Zn и Mo) в исследованных пробах меньше, чем в таком референтном объекте, как PAAS, и только величина  $Sr_{\text{среднее}}$  немного выше, чем в PAAS. Таким образом, распределение биофильных элементов в сопочных илах Северо-Западного Кавказа в целом не отличается от распределения других микроэлементов в них [Маслов, Шевченко, 2020].

Среднее содержание  $C_{\text{общ}}$  в исследованных пробах составляет  $1,87 \pm 0,56$  мас. %, а содержание  $C_{\text{орг}}$  варьирует от 0,41 до 1,49 мас. %. Между концентрациями таких биофильных элементов, как V, Co, Ni, Mo и Cr и содержанием  $C_{\text{орг}}$  в сопочных илах наблюдается статистически значимая положительная взаимосвязь. Это предполагает возможность образования названными биофильными элементами и  $C_{\text{орг}}$  в сопочном иле ГВ достаточно устойчивых соединений.

Анализ взаимосвязей между широким спектром редких и рассеянных (в том числе и биофильных) элементов,  $C_{\text{карб}}$  и  $C_{\text{орг}}$  методом главных компонент показал, что на первые две главные компоненты приходится 58,8% общей дисперсии.  $C_{\text{карб}}$  имеет положительную нагрузку на ГК1, в то время как  $C_{\text{орг}}$ , как правило, находится на противоположной стороне этого фактора; здесь же присутствуют и биофильные элементы. Выявленные факторы могут отражать как состав источников сопочных илов, так и свидетельствовать о том, что содержание микроэлементов в сопочных илах ГВ Северо-Западного Кавказа является в той или иной мере следствием изменения вмещающих пород в грязевулканическом процессе. Однако на сегодняшний день последний вывод остается гипотетическим.

Специалистам хорошо известно, что происхождение продуктов грязевого вулканизма дискуссионно: либо это результат разжижения глинистых пород в грязевулка-

ническом очаге на глубине (причины – трансформация смектита в иллит или появление зон аномально высоких давлений в пластах, механизмов которых насчитывают до 2х десятков), либо это следствие смешения материала при его перемещении к дневной поверхности (причина – воздействие потоков флюидов и выносимых ими обломков на окружающие породы), либо отражение сквозных глубинных потоков углеводородов из мантии. Однако, последняя гипотеза, предполагающая, что грязевые вулканы являются своеобразными «трубами дегазации планеты», имеющимися у нас данными не подкрепляется [Маслов и др., 2021]. Невысокие содержания  $C_{орг}$  в сопочных илах ГВ Северо-Западного Кавказа несколько не соотносятся также с классическими представлениями о взаимосвязи процессов грязевого вулканизма и формирования углеводородов, но считать это окончательным выводом у нас пока мало оснований.

Выполненные исследования не были нацелены на решение перечисленных выше проблем. Их основной задачей являлся анализ возможных взаимосвязей между концентрациями биофильных элементов и  $C_{орг}$ . Однако, и полученные при этом результаты оказались дискуссионными, так как на интегральное содержание любых редких и рассеянных элементов в осадочных породах одновременно или последовательно влияет достаточно много факторов, учесть которые или минимизировать влияние которых весьма трудно. Это, по-видимому, требует дальнейших исследований и предполагает комплексирование самых разных данных.

### Литература

1. Алиев Ад.А., Етирмишли Г.Д. Новые данные об извержениях грязевых вулканов в Азербайджане. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 22–35. DOI: 10.46698/VNC.2021.34.18.002.
2. Геологический словарь. Т. 2. Изд. 2 / Отв. ред. Паффенгольц К.Н. – М.: Недра, 1978. – 447 с.
3. Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э. Извержение грязевого вулкана «Локбатан». // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 22–33. DOI:10.46698/VNC.2023.14.41.002.
4. Копаевич Л.Ф., Бугрова Э.М., Латыпова М.Р. и др. Фораминиферы из глиняной пульпы грязевого вулкана Шуго (Таманский полуостров). // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2022. – № 3. – С. 3–16.
5. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. – М.: ГЕОС, – 2012. 348 с.
6. Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезисы Северо-Западного Кавказа. Проблемы тектонофизики. М.: ИФЗ РАН, – 2008. С. 191–224.
7. Маслов А.В., Крупенин М.Т., Киселева Д.В. Литогеохимия тонкозернистых алюмосиликокластических пород серебрянской серии венда Среднего Урала. // Геохимия. – 2011. – № 10. – С. 1032–1062.
8. Маслов А.В., Шевченко В.П. Систематика редких и рассеянных элементов в сопочном иле грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа. // Геохимия. – 2020. – Т. 65. № 9. – С. 886–910.
9. Овсюченко А.Н., Сысолин А.И. Геологические исследования эндогенных природных опасностей Таманского полуострова. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 1. – С. 91–101.
10. Российская геологическая энциклопедия. Т. 1 (А–И). – М.-СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – 663 с.
11. Соловов А.П., Матвеев А.А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: МГУ, – 1985. 232 с.
12. Трихунков Я.И., Бачманов Д.М., Гайдаленок О.В. и др. Новейшее горообразование

в зоне сочленения структур Северо-Западного Кавказа и Керченско-Таманской области. // Геотектоника. – 2019. – № 4. – С. 1–19.

13. Федоров Ю.А. Особенности мониторинга, контроля и прогноз деятельности подводных грязевых вулканов. // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. М.: Триумф, – 2012. С. 22–32.

14. Федоров Ю.Н., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. Систематика элементов-примесей в продуктах извержений ряда грязевых вулканов Керченско-Таманской области (по данным ICP-MS). // Литосфера. – 2011. – № 5. – С. 117–123.

15. Ходькова И.А., Гемп С.Д. Распределение лития, рубидия и цезия в твердых выбросах грязевых вулканов Керченско-Таманской области. // Геохимия. – 1970. – № 12. – С. 1495–1503.

16. Холодов В.Н. Грязевые вулканы: распространение и генезис. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2012. – № 4. – С. 5–27.

17. Шнюков Е.Ф., Гнатенко Г.И., Нестеровский В.А., Гнатенко О.В. Грязевой вулканизм Керченско-Таманского региона. Киев: Наукова думка, – 1992. 200 с.

18. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области (атлас). Киев: Наукова думка, – 1986. 152 с.

19. Carvalho L., Monteiro R., Figueira P. et al. Vertical distribution of major, minor and trace elements in sediments from mud volcanoes of the Gulf of Cadiz: evidence of Cd, As and Ba fronts in upper layers. // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 2018. – Vol. 131. – pp. 133–143. DOI: 10.1016/j.dsr.2017.12.003.

20. Ershov V.V., Levin B.V. New data on the material composition of mud volcano products on Kerch peninsula // Doklady Earth Sciences. – 2016. – Vol. 471. No. 1. – pp. 1149–1153. DOI: 10.1134/S1028334X16110027.

21. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. // Earth-Sci. Rev. – 2017. – Vol. 168. – pp. 81–112. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.03.001.

22. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. // In: Treatise on Geochemistry, 2nd Edition. – 2014. – Vol. 4. – pp. 1–51. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.

23. Sokol E., Kokh S., Kozmenko O. et al. Mineralogy and geochemistry of mud volcanic ejecta: A new look at old issues (a case study from the Bulganak Field, Northern Black Sea). // Minerals. – 2018. – Vol. 8. Issue 8. – 344. DOI: 10.3390/min8080344.

24. Talas E., Duman M., Kucuksezgin F. et al. Sedimentology and geochemistry of mud volcanoes in the Anaximander Mountain Region from the Eastern Mediterranean Sea. // Marine Pollution Bull. – 2015. – Vol. 95. – pp. 63–71. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.04.042.

25. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, –1985. – pp. 1–312.

## References

1. Aliyev Ad.A., Yetirmishli G.D. New data on eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 22–35. DOI: 10.46698/VNC.2021.34.18.002. (In Russ.)

2. Geological dictionary. Vol. 2. / 2 d. Paffengolts K.N. Moscow. Nedra. 1978. 447 p. (In Russ.)

3. Yetirmishli G.J., Kazimova S.E. Eruption of the mud volcano “Lokbatan”. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 22–33. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.41.002. (In Russ.)

4. Kopaevich L.F., Bugrova E.M., Latypova M.R. et al. Foraminifera from the clay pulp of the Shugo mud volcano (Taman Peninsula). Moscow University Geology Bulletin. 2022. Vol. 3. pp. 3–16. (In Russ.)

5. Lavrushin V.Yu. Subsurface fluids of the Greater Caucasus and its surrounding. Moscow. GEOS. 2012. 348 p. (In Russ.)

6. Marinin A.V., Rastsvetaev L.M. Structural parageneses of the Northwestern Caucasus. In: Problems of tectonophysics. Moscow. IPE RAS. 2008. pp. 191–224. (In Russ.)
7. Maslov A.V., Krupenin M.T., Kiseleva D.V. Litho geochemistry of the Fine-Grained Siliciclastic Rocks of the Vendian Serebryanka Group of the Central Urals. *Geochemistry Int.* 2011. No. 10. pp. 1032–1062. (In Russ.)
8. Maslov A.V., Shevchenko V.P. Systematics of Trace Elements in Sediments from the North-Western Caucasus Mud Volcanoes. *Geochemistry International*. 2020. Vol. 65. No. 9. pp. 886–910. (In Russ.)
9. Ovsyuchenko A.N., Sysolin A.I. Geological studies of endogenous natural hazards of the Taman Peninsula. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 1. pp. 91–101. (In Russ.)
10. Russian geological encyclopedia. Vol. 1. Moscow–Saint-Petersburg: VSEGEI. 2010. 663 p. (In Russ.)
11. Solovov A.P., Matveev A.A. Geochemical methods for searching ore deposits. Moscow. MSU. 1985. 232 p. (In Russ.)
12. Trikhunkov Y.I., Bachmanov D.M., Gaidalenok O.V. et al. Recent mountain building at the junction zone of the Northwestern Caucasus and intermediate Kerch–Taman region, Russia. *Geotectonics*. 2019. No. 4. pp. 1–19. (In Russ.)
13. Fedorov Yu.A. Monitoring, control and prediction of activity of submarine mud volcanoes. Natural and Social Risks in the Coastal Zone of the Black and Azov Seas. Moscow. Triumph. 2012. pp. 22–32. (In Russ.)
14. Fedorov Yu.N., Maslov A.V., Ronkin Yu.L. Trace element systematic of the eruption products of some mud volcanoes of the Kerch–Taman area: ICP–MS data. *Litosfere*. 2011. No. 5. pp. 117–123. (In Russ.)
15. Khodkova I.A., Gamp S.D. Distribution of lithium, rubidium, and cesium in solid emissions of mud volcanoes of the 587 Kerch–Taman area. *Geokhimiya*. 1970. No. 12. pp. 1495–1503. (In Russ.)
16. Kholodov V.N. Mud volcanoes: distribution and genesis. *Geology and minerals of the World Ocean*. 2012. No. 4. pp. 5–27. (In Russ.)
17. Shnyukov E.F., Gnatenko G.I., Nesterovskii V.A. et al. Mud Volcanism of the Kerch–Taman Area. Kiev. Naukova Dumka. 1992. 200 p. (In Russ.)
18. Shnyukov E.F., Sobolevskii Yu.V., Gnatenko G.I. et al. Mud Volcano of the Kerch–Taman Area (Atlas). K.: Naukova Dumka. 1986. 152 p. (In Russ.)
19. Ershov V.V., Levin B.V. New data on the material composition of mud volcano products on Kerch peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 471. No. 1. pp. 1149–1153. DOI: 10.1134/S1028334X16110027. (In Russ.)
20. Carvalho L., Monteiro R., Figueira P. et al. Vertical distribution of major, minor and trace elements in sediments from mud volcanoes of the Gulf of Cadiz: evidence of Cd, As and Ba fronts in upper layers. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018. Vol. 131. pp. 133–143. DOI: 10.1016/j.dsr.2017.12.003.
21. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. *Earth-Sci. Rev.* 2017. Vol. 168. pp. 81–112. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.03.001.
22. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. In: *Treatise on Geochemistry*, 2nd Edition. 2014. Vol. 4. pp. 1–51. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.
23. Sokol E., Kokh S., Kozmenko O. et al. Mineralogy and geochemistry of mud volcanic ejecta: A new look at old issues (a case study from the Bulganak Field, Northern Black Sea). *Minerals*. 2018. Vol. 8. Issue 8. 344. DOI: 10.3390/min8080344.
24. Talas E., Duman M., Kucuksezgin F. et al. Sedimentology and geochemistry of mud volcanoes in the Anaximander Mountain Region from the Eastern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bull.* 2015. Vol. 95. pp. 63–71. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.04.042.
25. Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust Its Composition and Evolution*. Oxford. Blackwell. 1985. 1–312 p.



УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

Оригинальная статья

## К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK

В.Б. Заалишвили , Д.А. Мельков , М.И. Фидарова , К.С. Харебов 

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

Статья поступила: 15.12.2023, доработана: 09.03.2024, принята к публикации: 11.03.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Адекватная оценка проявления тех или иных сильных землетрясений представляет собой одну из главных задач инженерной сейсмологии. В то же время, несмотря на имеющиеся достижения в этой области, отдельные аспекты указанной задачи все еще остаются неясными. Использование мировых баз данных сильных движений, содержащих инструментальные записи землетрясений, включает унификацию не только данных о землетрясениях, таких как магнитуда, но и макросейсмический эффект или проявленный сейсмический эффект, соответствующий записи, на той или иной конкретной площадке. Одними из самых всеобъемлющих баз данных являются японские базы данных K-NET и KiK-net. **Целью работы** являлось установление соотношения для пересчета интенсивностей по JMA (Япония) в – MSK (Россия). **Методы.** Сопоставление и анализ реальных данных, приведенных в литературных источниках и их интерполяция. **Результаты.** Выполнен анализ известных способов получения соотношений между различными сейсмическими шкалами мира. Установлены неравномерности указанных шкал, обусловленные особенностями реакции объектов-индикаторов. Выявлены наиболее обоснованные соотношения для пересчета величин интенсивностей, полученных в различных диапазонах сейсмической шкалы JMA, в величины сейсмической шкалы MSK или MMI (США, Европа).

**Ключевые слова:** макросейсмическая интенсивность, инструментальные записи, база данных сильных движений, сейсмическая шкала, соотношения, анализ.

**Для цитирования:** Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 19-35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

Original paper

## On the issue of converting the seismic intensity of the Japan Meteorological Agency (JMA) scale into the MSK macroseismic scale

V.B. Zaalishvili , D.A. Melkov , M.I. Fidarova , K.S. Kharebov 

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

Received: 15.12.2023, revised: 09.03.2024, accepted: 11.03.2024

**Abstract: Relevance.** Adequate assessment of the effect of certain strong earthquakes is one of the main tasks of engineering seismology. At the same time, despite the achievements in this area, certain aspects of this task still remain unclear. The use of global strong motion databases containing instrumental records of earthquakes involves the unification of not only earthquake data, such as magnitude, but also the macroseismic effect, or the seismic effect corresponding to the record, at a particular site. Some of the most comprehensive databases are the Japanese K-NET and KiK-net databases. **The aim** of the paper was to establish a relationship for converting intensities from JMA (Japan) to MSK (Russia) scale. **Methods.** Comparison and analysis of real data given in literature sources and their interpolation. **Results.** An analysis of known methods for obtaining relationships between various seismic scales of the world was performed. The unevenness of these scales was established, due to the peculiarities of the reaction of indicator objects. The most reasonable relationships have been identified for converting intensity values obtained in various ranges of the JMA seismic scale into values of the MSK or MMI seismic scale (USA, Europe).

**Keywords:** macroseismic intensity, instrumental records, strong motion database, seismic scale, relationships, analysis.

**For citation:** 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. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 19-35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

### Введение

Определение сейсмических воздействий является актуальной задачей инженерной сейсмологии. Поскольку значения баллов непосредственно не используются в инженерных расчетах, требуются процедуры представления воздействий, соответствующих различным сейсмическим зонам. Пересчет баллов в ускорения по шкале MSK-64, используемой в СП 14.13330.2018, может приводить к заниженным значениям. Кроме того, при этом необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как преобладающий период и длительность воздействия [Аптикаев, 2021а, 2021б]. Таким образом, даже построение карт в единицах ускорений не гарантирует точности оценки сейсмического эффекта, поскольку интенсивность является комплексной величиной. С одной стороны, есть запрос проектировщиков иметь четкие параметры сейсмических воздействий для расчетов зданий и сооружений, а с другой стороны, увязка этих параметров с макросейсмическими данными приводит к

необходимости разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности, удовлетворяющей требованиям всех сторон процесса и отражающей происходящие физические процессы, причем, на основе современных инструментальных данных.

Необходимость пересчета сейсмической интенсивности JMA возникла в связи с разработкой инструментальной меры сейсмической интенсивности на основе записей баз данных сильных движений [Заалишвили и др., 2022; Фидарова и др., 2023]. В Геофизическом институте ВНИЦ РАН еще в 2003 году по инициативе В.Б. Заалишвили была создана база данных сильных движений, включающая данные практически со всего мира (США, Япония, Тайвань, Греция, Армения, Грузия) [Заалишвили и др., 2002, 2013]. Для анализа собранного материала в процессе выполнения данной работы были отобраны записи землетрясений, зарегистрированных системой инструментальных наблюдений K-NET, созданной за один год, сразу после разрушительного землетрясения в Кобе (Япония, 1995) [Kinoshita, 2003; National Research..., 2019]. База данных ГФИ ВНИЦ РАН, сформированная по записям сильных движений сети K-NET и другим записям сильных землетрясений, содержит более 80 000 записей на 1000 станций, расположенных на участках с различными грунтовыми условиями. Здесь интенсивность проявления по сейсмической шкале MSK меняется от 5 баллов и выше, начиная с мая 1996 г. по декабрь 2013 г. Кроме того, в базе данных содержатся записи землетрясений с малыми эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км.

Различия в дифференциации сейсмических шкал, очевидно, связаны с различиями в типах застройки, культурными и историческими различиями, в целом, проявляющимися в различиях предметов быта, особенности движения которых, должны проявляться при сопоставлении описаний слабых воздействий. Также следует ожидать, что японская шкала JMA (шкала японского метеорологического агентства) имеет больше отличий по сравнению с остальными шкалами. Опираясь на работу [Musson et al., 2009] мы рассматривали шкалы семейства MSK, MMI и EMS, как близкие друг другу. При этом известно, что между ними, тем не менее, имеются заметные различия, главным образом, в силу их большей или меньшей степени неравномерности в сравнении с инструментальными параметрами [Шебалин, 1975; Аптикаев, Шебалин, 1988]. Так сейсмическая шкала JMA оказалась неравномерной и в настоящее время модернизируется: так, например, диапазоны соответствующие 5 и 6 баллам поделены пополам [Аптикаев, Эртелева, 2016]. Поэтому, в первом приближении шкалы MMI (MCS), MSK можно принять равномерными, хотя их внутренняя неравномерность может достигать 0,2–0,3 балла [Аптикаев, Шебалин, 1988].

При этом сам анализ соотношений сейсмических шкал позволяет установить различные аспекты проявления макросейсмического эффекта с целью разработки более общей, равномерной и объективной шкалы. Также важен японский опыт разработки инструментальной шкалы JMA [Yamazaki et al., 1998], которая и представлена в современных японских базах данных сильных движений. Формальное применение процедуры расчета данной инструментальной интенсивности для землетрясений Калифорнии выполнено в работе [Shabestari, Yamazaki, 2001].

#### Методы. Пересчет интенсивности JMA в MSK (MMI)

Итак, в уже отмеченной базе данных сильных движений приводится максимальная интенсивность в величинах японской шкалы. Для практического приме-

нения требуется пересчет в используемую нами шкалу MSK (и, соответственно, ШСИ-17).

Первое соотношение, которое могло быть получено для пересчета интенсивностей приводится в работе [Hirono, Sato, 1971] и основывается на связи интенсивности MMI с ускорением, опубликованной Гутенбергом и Рихтером в 1942 году [Gutenberg, Richter, 1942; Richter, 1958; Рихтер, 1963]:

$$\lg a = \frac{I_{MMI}}{3} - \frac{1}{2} \quad (1)$$

и интенсивности JMA с ускорением, полученной Кавасуми [Kawasumi, 1943]:

$$a = 0,8 \cdot 10^{(I_{JMA}-0,5)/2}, \quad (2)$$

где ускорения  $a$  выражены в см/с<sup>2</sup>.

Тогда соотношение между интенсивностью MMI и JMA, будет иметь следующий вид:

$$I_{MMI} = 1,5I_{JMA} + 0,5 \quad (3)$$

Данное выражение можно встретить в некоторых работах, в частности, в работе Э.Е. Хачияна [Хачиян, 2008].

Работой, в которой дается сопоставление сейсмических шкал MMI и JMA, а также первой сейсмической шкалы С.В. Медведева, известной, как сейсмическая шкала ГЕОФИАН, является отчет, выполненный по заказу Комиссии по атомной энергии США [Barosh, 1969]. Сопоставление было выполнено согласно описаниям шкал (рис. 1).

Позже, в работе японских исследователей [Hirono, Sato, 1971] было выполнено сопоставление оценок интенсивностей землетрясений, выполненных по обеим шкалам JMA и MMI. В 1964 году Межправительственное совещание ЮНЕСКО по сейсмологии и сейсмостойкости (Париж, 1964 г.), признало важность разработки единой международной шкалы интенсивности и рекомендовало временное применение сейсмической шкалы MSK 1964 г. К тому времени в Японии сейсмическая шкала JMA использовалась уже более 70 лет.

В 1967 году в Японии был начат проект, направленный на сравнительное определение интенсивностей с помощью обеих сейсмических шкал, по данным 106 метеостанций Японского метеорологического агентства, которые были распределены по всем японским островам. Описание шкалы MSK-64 было переведено на японский язык, что позволило производить оценку непосредственно по каждой шкале. Для населения были созданы опросные листы. Необходимо отметить, что по странному стечению обстоятельств значимые колебания, традиционно активно ощущавшиеся на станциях, в 1967–1968 гг. не наблюдались. В то же время, в последующие два года наблюдались исключительно только сильные землетрясения ( $M > 6.0$ ). Интенсивность MSK, по результатам обработки данных каждой опросной анкеты, определялась по 10 сильным землетрясениям, включая землетрясение Tokachi от 1968 года [Hirono, Sato, 1971].

UNITED STATES Modified Mercalli (Wood and Newmann, 1931)	RUSSIA GEIOFIAN (Medvedev, 1953)	JAPAN Japanese (Kawasumi, 1951)
I	I	0
II	II	I
III	III	
IV	IV	II
V	V	III
VI	VI	IV
VII	VII	V
VIII	VIII	
IX	IX	VI
X	X	
XI	XI	VII
XII	XII	

Рис. 1. Соотношение между шкалами MMI, GEIOFIAN и JMA, приведенное в работе [Barosh, 1969] /

Fig. 1. The relationship between the MMI, GEIOFIAN and MSK scales, given in [Barosh, 1969]

В результате анализа были получены следующие выражения [Hirono, Sato, 1971]:

$$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 1,5 \quad (4)$$

- для интенсивностей MSK от 3 до 5 баллов;

$$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 0,75 \quad (5)$$

- для интенсивностей MSK от 5 до 8 баллов.



В работе [Wong, Trifunac, 1979] было выполнено сравнение оценок MMI и JMA со значениями максимальных ускорений, полученных идентичными акселерографами SMAC, и для диапазона интенсивностей MMI от 4 до 8 баллов была получена следующая формула:

$$I_{MM} = 2,0I_{JMA} - 2,2 \quad (6)$$

Полученные в работе [Wong, Trifunac, 1979] соотношения между шкалами в сравнении с данными [Barosh, 1969] приведены на рис. 2.

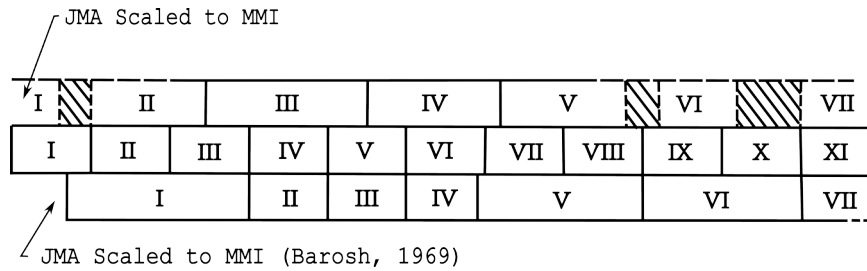


Рис. 2. Сопоставление шкал MMI и JMA приведенное в работе [Wong, Trifunac, 1979] /  
Fig. 2. Comparison of MMI and JMA scales given in [Wong, Trifunac, 1979]

Для пересчета в базе данных перевод в шкалу MSK был произведен по [Kramer, 1996], где было приведено (рис. 3) соответствие разных шкал по данным [Richter, 1958; Murphy, O'Brien, 1977].

MMI	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RF	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
JMA	I		II	III	IV	V		VI	VII			
MSK	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

Рис. 3. Соответствие шкал измерения интенсивности сейсмического воздействия [Kramer, 1996] /

Fig. 3. Correspondence of seismic intensity measurement scales, given in [Kramer, 1996].

В соответствии с работой [Kramer, 1996] перевод данных, определенных по шкале японского метеорологического общества (JMA), в шкалу MSK производился с использованием следующих коэффициентов – таблица 1. Данное соотношение использовалось при формировании базы данных Геофизического института [Залишвили и др., 2002, 2013].

Таблица 1 / Table 1

**Коэффициенты перевода из шкалы JMA в MSK /  
Conversion coefficients from the JMA to MSK scale**

JMA	MSK	Выражение перевода Conversion expression
0 – 0,2	0,5 – 1	$JMA * 2,5 + 0,5$
0,2 – 0,4	1 – 2	$JMA * 5 + 0,0$
0,4 – 1	2 – 3	$1,67 * JMA + 1,33$
1 – 4	3 – 6	$1,0 * JMA + 2,0$
4 – 7	6 – 12	$2,0 * JMA - 2,0$

В работе [Shabestari, Yamazaki, 2001] выполнено сравнение данных об интенсивности MMI записей землетрясений Калифорнии с инструментальной шкалой JMA, и в результате анализа было получено выражение с достаточно высоким коэффициентом детерминации ( $R^2 = 0,7$ ). При этом следует иметь в виду, что оно получено для средних значений инструментальной интенсивности, соответствующих целым значениям MMI:

$$I_{MMI} = 1,95I_{JMA} - 2,91 \quad (7)$$

Соколовым и Фурумурой было получено соотношение между шкалами MMI и JMA на основе анализа 598 записей ускорений девяти землетрясений Японии с магнитудой от 6.3 до 8.0, полученных в 1999–2007 гг. [Sokolov., Furumura, 2008]:

$$I_{MMI} = 1,743I_{JMA} - 0,584 \quad (8)$$

В работе [Musson et al., 2009] рассмотрено соотношение основных современных шкал с EMS-98, в том числе, и современная версия шкалы JMA 1996 года. Отмечены отличительные особенности шкалы JMA. При интенсивности 3 шкалы JMA с одной стороны «большинство людей, находящихся в помещении, ощущают землетрясение, некоторые из находящихся вне помещений ощущают землетрясение, большинство из тех, кто спит, просыпаются», что соответствует 5 EMS («ощущается большинством людей в помещениях, вне помещений только немногими, многие спящие люди пробуждаются, некоторые испуганы»), но при этом интенсивность 3 является также порогом, при котором начинается реакция легких предметов – «посуда на полках иногда издает какой-то звук» (дословный перевод), что соответствует интенсивности 4 EMS – «окна и двери скрипят, дребезжит посуда», а иногда и 3 EMS – «находящиеся в покое в помещении люди ощущают раскачивание или легкое дрожание»). В шкале MSK «дребезжание окон, стекол шкафов, посуды» наблюдается при 4 баллах (включающих также такие эффекты, как «легкий скрип полов и стен; заметно легкое колебание жидкости в открытых сосудах»). Шкала JMA необычна тем, что имеет нулевую степень – землетрясение не ощущается, в большинстве шкал это соответствует интенсивности равной единице. В версии 1996 года количество степеней было увеличено с семи до девяти путем разделения интенсивности 5 на две категории «5L» и «5U», и аналогично для интенсивности 6. В настоящее время шкала JMA используется путем преобразования инструмен-

тальных параметров движения грунта в значения псевдоинтенсивности [Yamazaki et al., 1998]; поэтому неизвестно, соответствует ли указанное значение интенсивности землетрясения описанию эффектов для этой степени наблюдаемого масштаба или нет.

По результатам анализа различных шкал в работе [Musson et al., 2009] приводится соотношение различных сейсмических интенсивностей с EMS-98 – таблица 2. Большинство шкал имеют максимальную степень, которая в той или иной форме определяется как «все разрушено». Смысл этого неоднозначен и зависит от состояния застройки, поэтому полное разрушение может произойти при меньших значениях интенсивности. В таких случаях шкалы интенсивности насыщаются при значении около 9 EMS. Это особая проблема со шкалой Росси-Фореля (RF), в которой присутствует скачкообразное изменение повреждений от умеренного при 9 RF до полного разрушения при 10 RF. Дополнительные признаки, не связанные с повреждениями зданий, например, крупномасштабные изменения ландшафта, проявляются только при максимальных воздействиях и не помогают определить степень интенсивности при сопоставлении шкал. Так, согласно таблице 2 в большинстве случаев высшая степень старых шкал не определена с точки зрения EMS (но может предполагаться высокой). Вопрос не является критическим, поскольку эти высшие степени разрушений редки, если вообще когда-либо, используются на практике [Musson et al., 2009].

Таблица 2 / Table 2

**Рекомендации по переходу с пяти основных шкал на EMS-98, приведенные в работе [Musson et al., 2009] / Recommendations for the conversion from the five main scales to EMS-98, given in [Musson et al., 2009]**

RF	EMS-98	MCS	EMS-98	MMI 56	EMS-98	MSK	EMS-98	JMA-96	EMS-98
								0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2 or 3
2	2	2	2	2	2	2	2	2	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4 or 5
4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5L	6
6	5	6	6	6	6	6	6	5U	7
7	6	7	7	7	7	7	7	6L	8
8	7 or 8	8	8	8	8	8	8	6U	9 or 10
9	9	9	9	9	9	9	9	7	11
10	- <sup>a</sup>	10	10	10	10	10	10		
		11	11	11	- <sup>a</sup>	11	11		
		12	- <sup>a</sup>	12	- <sup>a</sup>	12	- <sup>a</sup>		

-<sup>a</sup> интенсивность определяется на основе признаков, которые не отражают силу воздействия или достигают насыщения.

Для определения соотношений по схематичным (рис. 1, 3) и табличным (таблица 2) данным нами рассматривались границы баллов каждой шкалы как промежуточное значение  $\pm 0.5$  соответствующего целого балла. Этот метод был применен для данных, приведенных в [Barosh, 1969], [Kramer, 1996] и [Musson et al., 2009]. В последнем случае, для уточненной шкалы JMA-96, значениям 5L и 5U приписывались значения 5.25 и 5.75, предполагая равномерность шкалы в пределах каждого балла и аналогично для 6L и 6U.

На рис. 4 приведено сопоставление всех рассмотренных зависимостей интенсивности MSK от JMA.

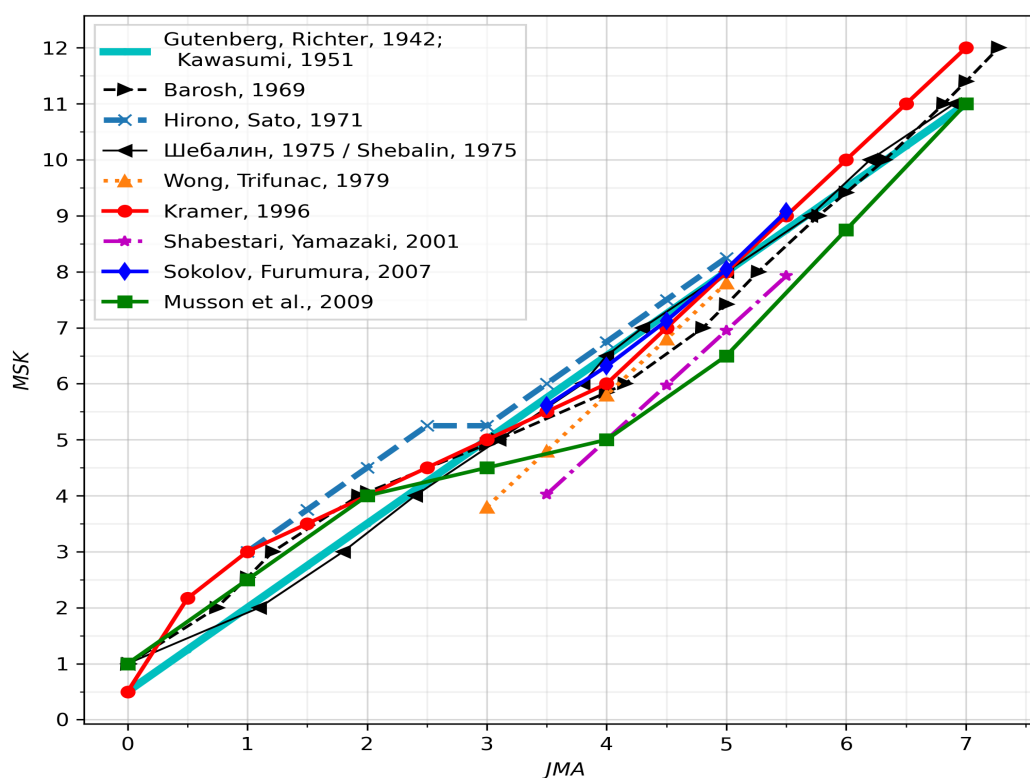


Рис. 4. Пересчет интенсивности JMA в MSK по различным источникам /

Fig. 4. Conversion of JMA to MSK intensity from various sources

Соответствие шкал MMI и MSK согласно табл. 3 позволяет использовать приведенные выше зависимости, полученные для MMI, непосредственно для оценки интенсивности по шкале MSK. Необходимо отметить, что для строк 2, 4, 9 нами были впервые получены выражения, по приведенной методике, для перевода данных из одних шкал в другие. В строке 6 приведено выражение, полученное нами ранее [Заалишвили и др., 2002]. Выражения для перевода, приведенные в строках 1, 3, 5, 7, 8 таблицы 3, получены соответствующими авторами. В связи с тем, что с практической точки зрения нам необходимы исключительно сильные движения (использование базы данных K-NET для задания сейсмических воздействий) все соотношения приведены для интенсивности более 6 MSK.

Таблица 3 / Table 3

**Соотношения между шкалами MSK (MMI, EMS) и JMA для сильных землетрясений (MSK ≥ 6) / Relationships between the MSK (MMI, EMS) and JMA scales for strong earthquakes (MSK ≥ 6)**

	Источник / Source	Соотношение интенсивности JMA с MSK (MMI) ≥ 6 / Relation of JMA with MSK (MMI) ≥ 6	Использованные методы / used methods
1.	Gutenberg, Richter, 1942; Kawasumi, 1951	$I_{MM} = 1,5I_{JMA} + 0,5$	Через выражения для PGA, полученные для каждой шкалы Through expressions for PGA obtained for each scale
2.	Barosh, 1969	$I_{MM} = 1,95I_{JMA} - 2,24$ (interpolation, this study)	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions
3.	Hirono, Sato, 1971	$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 0,75$	Одновременная оценка проявления землетрясения двумя шкалами Simultaneous assessment of earthquake manifestations using two scales
4.	Shebalin, 1975	$I_{MSK} = 1,58I_{JMA} + 0,12$ (interpolation, this study)	Прямое сравнение текста шкал, метод анализа относительных площадей изосейст Direct comparison of scale text, method of analysis of relative isoseismal areas
5.	Wong, Trifunac, 1979	$I_{MM} = 2,0I_{JMA} - 2,2$ 4 ≤ MMI ≤ 8	Сопоставление PGA PGA matching
6.	Kramer, 1996, after Richter (1958) and Murphy and O'Brien (1977)	$I_{MSK} = 2,0I_{JMA} - 2,0$ (interpolation [Заалишвили и др., 2002])	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions
7.	Shabestari, Yamazaki, 2001	$I_{MM} = 1,95I_{JMA} - 2,91$ 4 ≤ MMI ≤ 8	Применение методики инструментальной шкалы JMA к записям, для которых известны MMI (105 записей землетрясений Калифорнии) Application of the JMA instrumental scale technique to records for which MMIs are known (105 California earthquake records)
8.	Sokolov, Furumura, 2008	$I_{MMI} = 1,743I_{JMA} - 0,584$ MMI > 5.5	Анализ записей ускорений (598 записей ускорений девяти землетрясений Японии с магнитудой от 6.3 до 8.0, 1999-2007) Analysis of acceleration records (598 records of accelerations of nine Japanese earthquakes with magnitudes from 6.3 to 8.0, 1999-2007)
9.	Musson et al., 2009	$I_{MMI} = 2,25I_{JMA} - 4,75$ (interpolation, this study)	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions



## Результаты и обсуждение

В результате исследования можно выделить несколько способов пересчета сейсмических интенсивностей:

1. Сопоставление описаний сейсмических шкал [Barosh, 1969; Шебалин, 1975; Kramer, 1996; Musson et al., 2009]. Здесь во многом результат зависит от опыта, а интерпретация носит авторский характер, как, например, это принято при создании геологических карт. При этом достаточно сложно оценить точность результатов. Для формализации процедур пересчета использовались схемы, приведенные в соответствующих публикациях. Для диапазона  $MSK \geq 6$  выполнена интерполяция. Коэффициент регрессии перед JMA имеет значительный диапазон значений – от 1,58 до 2,25.

2. Сопоставление зависимостей инструментальных параметров от интенсивности, в первую очередь, ускорений [Wong, Trifunac, 1979]. Первый вариант такого пересчета можно сделать по данным [Gutenberg, Richter, 1942] и [Kawasumi, 1951]. Отдельно следует отметить расчет инструментальной интенсивности JMA по записям, для которых имелись значения интенсивностей MMI [Shabestani, Yamazaki, 2001] и других инструментальных мер сейсмической интенсивности [Sokolov, Furumura, 2008]. Коэффициент регрессии перед JMA по разным источникам составляет 1,5, 2,0 и 2,25.

3. Оценка макросейсмического эффекта по обеим шкалам по данным происшедших землетрясений по соответствующим методикам для обеих шкал [Hirono, Sato, 1971]. Коэффициент регрессии перед JMA составил 1,5.

4. Следует отметить принцип сравнения радиусов последовательных изосейст или площадей последовательных изосейст. Данный метод представлен исключительно в отечественных работах [Шебалин, 1975; Ершов, Шебалин, 1984; Аптикаев, Шебалин, 1988] и основан на сопоставлении уравнения макросейсмического поля, построенного для данной шкалы. Подход позволяет непосредственно оценить равномерность шкалы, определяющую возможности ее применения для вычисления приращений интенсивностей.

В результате сопоставления выражений пересчета интенсивностей, не обнаруживается каких-либо специфичных для каждого метода значений масштабирующего коэффициента. В целом для землетрясений интенсивностью  $MSK \geq 6$  коэффициент регрессии соответствует 2.

Следует отметить, что мы использовали регрессионные соотношения, выполнив привязку целых и дробных баллов значениям шкал. Поскольку интенсивность является интегральной характеристикой сейсмических эффектов, она как раз часто выражается в практике написания интенсивности римскими цифрами, чтобы подчеркнуть, что они целые и неделимые [Musson et al., 2009]. В то же время, иногда отмечается практика добавления десятичных знаков к арабским цифрам после интенсивности, записанной римскими цифрами (например, в работе [Klugel, 2005]). Современная тенденция состоит в том, чтобы записывать интенсивности арабскими цифрами, поскольку с ними легче работать, но они, тем не менее, являются целочисленными классами. Следует отметить, что эти ограничения применимы к интенсивности, оцениваемой на основе наблюдений, а не к прогнозируемой интенсивности, выведенной из модели. Именно изучение макросейсмических эффектов по радиусам или площадям различных зон позволяет установить близость этих двух величин [Шебалин, 1975].

В идеале преобразование вообще не должно производиться. Правильная и лучшая процедура – вернуться к исходным данным и переназначить значения в выбранной шкале интенсивности [Ambraseys et al., 1983; Grunthal, 1998]. Зачастую это невозможно потому, что исходных данных больше не существует. В таких случаях необходима некоторая форма преобразования. В этой связи физическое обоснование меры сейсмической интенсивности должно позволить производить более точный пересчет сейсмических интенсивностей между различными шкалами. Единственной работой, в которой независимо по обеим шкалам оценивался исходный материал, является работа [Hirono, Sato, 1971] и где достаточно представительный материал отсутствует.

Пример соотношений между одними шкалами позволяет проводить сопоставление для других шкал. Следует особо отметить, что здесь мы предполагаем совпадение шкал MSK, MMI и EMS, что отражено в работе Муссона [Musson et al., 2009]. Более детальное сопоставление шкал может быть выполнено при переходе к шкалам нового поколения, в которых выполнено деление на объекты-индикаторы и описаны их реакции, как это сделано в ШСИ-2017 (ГОСТ Р 57546-2017). При этом шкалы могут отражать региональные особенности строительства – различные типы конструкций характерных для той или иной территории и предметов быта. Данные шкалы ШСИ-2017 могли бы быть дополнены объектами-индикаторами, на основе эмпирических данных и данных моделирования, что позволит выполнить сопоставление различных шкал на основе сравнения эффектов, как в первом варианте введенной нами классификации. Но это сравнение выполнить количественно с возможностью оценки точности результатов, что в дальнейшем может послужить основой для разработки универсальной международной шкалы сейсмической интенсивности.

Здесь также следует иметь в виду, что тот или иной индикатор качественно может проявляться в разных диапазонах интенсивностей, в зависимости от частоты воздействия. Данные наблюдений в совокупности реакций различных объектов позволили бы повысить точность макросейсмических обследований и точность прогнозов и оценки рисков. Современные требования сейсмостойкого проектирования и строительства предполагают необходимость большей детализации оценок воздействий, что приводит к использованию в практике дробных значений баллов сейсмической интенсивности. Однако такое представление предполагает равномерность изменения «воздействия», или иными словами – «макросейсмическая шкала должна являться не шкалой порядка, а шкалой интервалов» [Ершов, Шебалин, 1984]. Общая неравномерность шкал балльности и, возможно, в большей степени в MMI отмечается в работах [Шебалин, 1975; Аптикаев, Шебалин, 1988]. Сопоставление шкал MSK (шкала Медведева, ГЕОФИАН) и MMI по разным источникам представлено на рис. 5. Следует иметь в виду, что в работе [Barosh, 1969] выполнялось сопоставление версий шкал Меркалли и Медведева, действовавших на тот момент, и которые многократно дорабатывались в дальнейшем. Тем не менее, в целом наблюдается соответствие с данными, приведенными позднее в [Kramer, 1996]. На рис. 5 также приводится соотношение между шкалой MSC, используемой на тот момент для оценки макросейсмического эффекта и «равномерной шкалой», полученное по материалам 29 землетрясений Македонии Н.В. Шебалиным [Шебалин, 1975]. Формализация признаков, выполненная в ШСИ-2017, позволяет определять границы чувствительности каждого объекта-индикатора (которые могут быть дроб-

ными), и в перспективе повысить «равномерность» значений шкалы при условии наличия представительного фактического материала.

Сопоставление соотношений между шкалами семейства Меркалли (MMI) и Медведева (MSK), полученными различными авторами [Barosh, 1969; Kramer, 1996] с данными Шебалина по распределению изосейст землетрясений Македонии [Шебалин, 1975], позволяет сделать вывод, что сейсмическая шкала MSK является наиболее равномерной, во всяком случае, в диапазоне от 3 до 5,5 баллов, т.е. шкалой «интервалов». Возможно, это послужило одним из факторов развития инструментального метода сейсмического микрорайонирования, поскольку позволяет использовать интенсивность как величину, а не как категориальный признак.

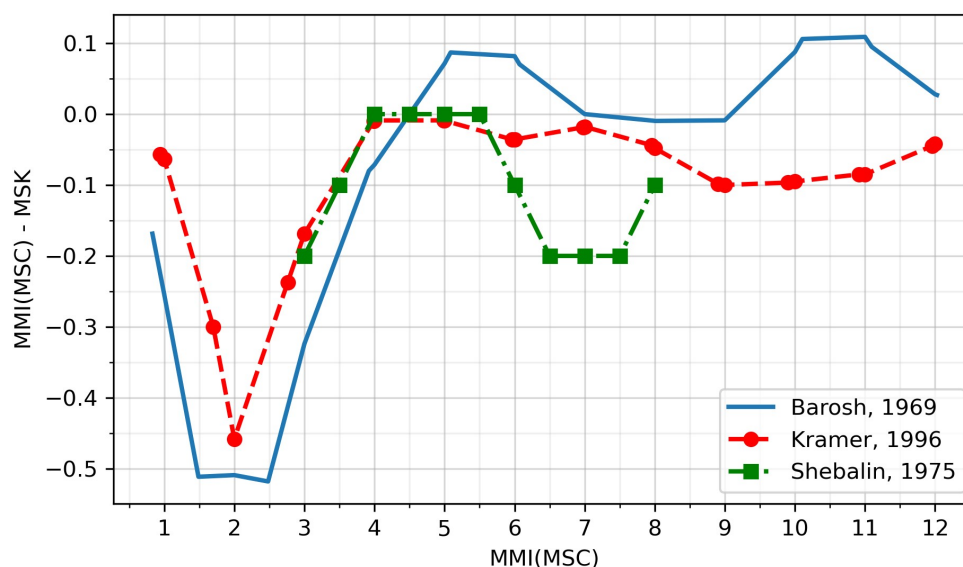


Рис. 5. Соотношение между шкалами MMI и MSK по данным [Barosh, 1969; Kramer, 1996] и «равномерность» шкалы MCS (MMI) по материалам землетрясений Македонии [Шебалин, 1975] /

Fig. 5. Relationship between the MMI and MSK scales according to [Barosh, 1969; Kramer, 1996] and the “uniformity” of the MCS (MMI) scale based on materials of earthquakes in Macedonia [Shebalin, 1975]

Также отмечается несоответствие всех шкал при максимальных значениях интенсивности, поскольку признаки, основанные на повреждении и разрушении зданий, достигают насыщения, а также в силу особенностей развития шкалы JMA, поскольку верхний предел повышался после более разрушительных землетрясений и фактически максимум не определен [Musson et al., 2009]. На наш взгляд здесь нет необходимости приравнивать максимальные значения интенсивностей по разным шкалам, а продолжить полученный тренд для интенсивностей, близких к границам шкал.

«Цифровизация» шкал также позволяет приблизиться к установлению связи макросейсмической интенсивности и параметров сейсмического воздействия. И здесь полезен опыт инструментальной шкалы JMA, поскольку учитывает продолжительность и спектральные особенности воздействия. Формальное применение этой шкалы к другой территории, как это сделано в работе [Shabestari, Yamazaki, 2001] не даст объективный результат, т.к. здесь стоит задача определения частотного фильтра для той или иной территории. Однако практическое использование данной методики является достаточно трудоемким и явно не отражает реальные физические процессы и не нашло распространения. Инструментальную меру JMA полученную для

территории Японии, по представительному набору инструментальных данных для территории Японии, можно считать соответствующей одноименной макросейсмической интенсивности JMA и в первом приближении использовать для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности по базам данных Японии. Для понятного и практически ценного результата (который можно будет верифицировать по всемирным данным) удобно использовать макросейсмическую интенсивность MSK (современной ШСИ-2017), которая является более равномерной.

### Выводы

1. Выполнен анализ известных способов получения соотношений между различными сейсмическими шкалами мира. Установлены неравномерности указанных сейсмических шкал, обусловленные особенностями реакции объектов-индикаторов. Выявлены наиболее обоснованные соотношения для пересчета величин интенсивностей, полученных в различных диапазонах сейсмической шкалы JMA, в величины сейсмической шкалы MSK или MMI (США, Европа).

2. Анализ многочисленных имеющихся работ показывает различия в зависимостях, порой достигающих двух баллов; наибольшей неравномерностью шкала JMA обладает в интервале интенсивностей от 4 до 6 MSK, однако, можно отметить, что в диапазоне MSK > 6 зависимость между шкалами JMA и MSK можно считать линейной, при этом коэффициент регрессии, определенный по разным источникам примерно одинаков и равен 2.

3. Отмечено различие в верхней границе шкал, в данной области вместо формального приравнивания максимальных значений предложено продолжить полученный тренд (коэффициент регрессии).

4. Шкала MSK (современной версией которой является ШСИ-2017) является наиболее близкой к равномерной шкале, поэтому полученные для нее закономерности (связь интенсивности с инструментальными параметрами, уравнение макросейсмического поля) будут физически более обоснованными.

5. Формализация признаков, выполненная в ШСИ-2017 позволяет определять границы чувствительности каждого объекта-индикатора (которые могут быть дробными), и в перспективе повысить «равномерность» значений шкалы, на основе предложенного Медведевым метода сравнения площадей последовательных изосейст при условии наличия представительного фактического материала.

### Литература

1. Аптикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1988. – Вып. 29. – С. 98–108.
2. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Российская сейсмическая шкала нового поколения. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43. № 2. – С. 43–52.
3. Аптикаев Ф.Ф. О картах ОСР в ускорениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2021а. – Т. 11. № 1. – С. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008.
4. Аптикаев Ф.Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах. // Геология и геофизика Юга России. – 2021б. – Т. 11. № 3. – С. 55–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005.
5. Ершов И.А., Шебалин Н.В. Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов. // Прогноз сейсмических воздействий (Вопросы инженерной сейсмологии; Вып. 25). М.: Наука, – 1984. С. 78–96.

6. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. Комплекс вычислительных программ «НСВ-2» для обработки инструментальных записей природных и техногенных катастроф. // Труды Международной конференции «Информационные технологии и системы: наука и практика». – Владикавказ. – 2002. – С. 399–401.
7. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Создание баз данных сильных движений на основе современных воззрений. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 3. – С. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. Инструментальная мера сейсмической интенсивности по данным сети K-Net. // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 2. С. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340.
9. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 670 с.
10. Фидарова М.И., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.
11. Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология. Ереван: Гитутюн, – 2008. 523 с.
12. Шебакин Н.В. О неравномерности шкалы балльности. // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М: Наука, – 1975. С. 222–233.
13. Ambraseys N.N., Banda E., Irving J., Mallard D., Melville C.P., Morse T., Muir Wood R., Munoz D., Serva L., Shilston D., Surinach E., Vogt J. Notes on historical seismicity. // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1983 – Vol. 73. – pp. 1917–1920.
14. Barosh P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various geologic settings. // Geological Survey bulletin. – 1279. – 1969. – 93 p.
15. Grunthal G. (ed) European Macroseismic Scale 1998: EMS-98. // Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Conseil de l'Europe, Conseil de l'Europe. – 1998. – Vol. 15.
16. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. // Seismol. Soc. America Bull. – 1942. – Vol. 32. No. 3. – pp. 163–191.
17. Hirono T., Sato K. MSK Intensity Scale as Compared with JMA Intensity Scale. // Papers in Meteorology and Geophysics. – 1971. – Vol. 22. – pp. 177–193. DOI: 10.2467/mripapers1950.22.3-4\_177.
18. Kawasumi H. Intensity and intensity scale. (in Japanese), Zisin. – 1943. – Vol. 15. – pp. 6–12.
19. Kawasumi H. Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times. // Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Tokyo. – 1951. – Vol. 29. – pp. 469–482.
20. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET), Japan. // Int. Handbook of Earthquake and Engineering seismology. – 2003. – Vol. 81B. – pp. 1049–1056.
21. Klugel J-U Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants. // Eng. Geol. – 2005. – Vol. 78. – pp. 285–307. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.01.007.
22. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, 1st ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. – 1996. – pp. 65–84.
23. Murphy J.R., O'Brien L.J. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1977. – Vol. 67. – pp. 877–915.
24. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. // J. Seismol. – 2009. – Vol. 14. – pp. 413–428.
25. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. – 2019. DOI: 10.17598/NIED.0004.



26. Richter C.F. *Elementary seismology*, W.H. Freeman, San Francisco. – 1958.
27. Shabestari T.K., Yamazaki F. A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with the MMI evaluated from three-component acceleration records. *Earthquake Spectra*. – 2001. – Vol. 17. No. 4. – pp. 711–723.
28. Sokolov V., Furumura T. Comparative Analysis of Two Methods for Instrumental Intensity Estimations Using the Database Accumulated During Recent Large Earthquakes in Japan. // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24. – pp. 513–532. DOI: 10.1193/1.2923918.
29. Wong H.L., Trifunac M.D. Generation of Artificial Strong Motion Accelerograms. // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. – 1979. – Vol. 7. – pp. 509–527.
30. Yamazaki F., Noda S., Meguro K. Developments of early earthquake damage assessment systems in Japan. // *Proc. of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability. (ICOSSAR '97)*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. – 1998. – pp. 1573–1580.

## References

1. Aptikaev F.F., Shebalin N.V. Refinement of correlations between the level of macroseismic effect. Aptikaev F.F., Shebalin N.V. Refinement of correlations between the level of macroseismic effect and dynamic parameters of ground motion. *Problems of Engineering Seismology*. 1988. Vol. 29. pp. 98–108. (In Russ.)
2. Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Russian seismic scale of a new generation. *Problems of Engineering Seismology*. 2016. Vol. 43. No. 2. pp. 43–52. (In Russ.)
3. Aptikaev F.F. About GSZ maps in acceleration units. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008. (in Russ.)
4. Aptikaev F.F. An exceedance probability of the influence in the Building Code. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 55–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005. (In Russ.)
5. Ershov I.A., Shebalin N.V. The problem of designing an earthquake intensity scale from the perspective of seismologists. *Forecast of seismic impacts (Problems of engineering seismology Issue 25)*. Moscow. Nauka. 1984. pp. 78–96. (In Russ.)
6. Zaalishvili V.B., Kharebov A.K., Kharebov K.S. Complex of computing programs “NCB-2” for processing instrumental records of natural and man-made disasters. *Proceedings of the International Conference “Information Technologies and Systems: Science and Practice”*. Vladikavkaz. 2002. pp. 399–401. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Kharebov K.S., Kharebov A.K. Creation of databases of strong movements based on modern views. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2013. No. 3. pp. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537. (in Russ.)
8. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. Instrumental measure of seismic intensity based on K-Net data. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022. Vol. 14. No. 2. pp. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340. (In Russ.)
9. Richter Ch.F. *Elementary seismology*. Moscow. Foreign Literary publishing house. 1963. 670 p. (In Russ.)
10. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Relationship between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of ground vibrations. *Geology and geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005. (In Russ.)
11. Khachiyani E.E. *Applied seismology*. Yerevan. Gitutyun. 2008. 523 p. (In Russ.)
12. Shebalin N.V. On the unevenness of the intensity scale. *Seismic scale and methods for measuring seismic intensity*. Moscow. Nauka. 1975. pp. 222–233. (In Russ.)
13. Ambraseys N.N., Banda E., Irving J., Mallard D., Melville C.P., Morse T., Muir Wood R., Munoz D., Serva L., Shilston D., Surinach E., Vogt J. Notes on historical seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1983 Vol. 73. pp. 1917–1920.

14. Barosh P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various geologic settings. Geological Survey bulletin. 1279. 1969. 93 p.
15. Grunthal G. (ed) European Macroseismic Scale 1998: EMS-98. Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Conseil de l'Europe, Conseil de l'Europe. 1998. Vol. 15.
16. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. Seismol. Soc. America Bull. 1942. Vol. 32. No. 3. pp. 163–191.
17. Hirono T., Sato K. MSK Intensity Scale as Compared with JMA Intensity Scale. Papers in Meteorology and Geophysics. 1971. Vol. 22. pp. 177–193. DOI: 10.2467/mripapers1950.22.3-4\_177.
18. Kawasumi H. Intensity and intensity scale. (in Japanese), Zisin. 1943. Vol. 15. pp. 6–12.
19. Kawasumi H. Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times. Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Tokyo. 1951. Vol. 29. pp. 469–482.
20. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET), Japan. Int. Handbook of Earthquake and Engineering seismology. 2003. Vol. 81B. pp. 1049–1056.
21. Klugel J-U Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants. Engineering Geology. 2005. Vol. 78. pp. 285–307. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.01.007.
22. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, 1st ed.; Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 1996. pp. 65–84.
23. Murphy J.R., O'Brien L.J. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. Bulletin of the Seismological Society of America. 1977. Vol. 67. pp. 877–915.
24. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. Journal of Seismology. 2009. Vol. 14. pp. 413–428.
25. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019. DOI: 10.17598/NIED.0004.
26. Richter C.F. Elementary seismology, W.H. Freeman, San Francisco. 1958.
27. Shabestari T.K., Yamazaki F. A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with the MMI evaluated from three-component acceleration records. Earthquake Spectra. 2001. Vol. 17. No. 4. pp. 711–723.
28. Sokolov V., Furumura T. Comparative Analysis of Two Methods for Instrumental Intensity Estimations Using the Database Accumulated During Recent Large Earthquakes in Japan. Earthquake Spectra. 2008. Vol. 24. pp. 513–532. DOI: 10.1193/1.2923918.
29. Wong H.L., Trifunac M.D. Generation of Artificial Strong Motion Accelerograms. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1979. Vol. 7. pp. 509–527.
30. Yamazaki F., Noda S., Meguro K. Developments of early earthquake damage assessment systems in Japan. In: Proc. of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability. (ICOSSAR '97). Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1998. pp. 1573–1580

DOI: 10.46698/VNC.2024.77.24.003

Original paper

## Modern seismogeodynamics of Absheron oil and gas region

S.E. Kazimova , G.E. Guseinzade , P.J. Mammadova 

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

Received: 02.10.2023, revised: 27.02.2024, accepted: 28.02.2024

**Abstract: Relevance.** In many regions of the world, the concentration of oil and gas and large hydrocarbon deposits is observed in the nodal zones of active faults, as well as in neotectonic block structures. A change in the stressed state of mountain structures can cause activation of seismic geodynamic processes accompanied by tectonic disturbances. In addition, it should be noted that the main danger of seismic impacts on the territory of the Absheron Peninsula comes from the Caspian Sea, the seismic activity of which is increasing every year. **The aim** of these studies is to study modern geodynamic and seismic activity within the Absheron oil and gas region. **Methods.** Maps of earthquake epicenters for the period 2003–2023 were built on the ArcGIS10.5 program and analyzed. Based on the catalog data and maps of seismic activity were constructed for two periods. Based on the method of inversion of waveforms and the first arrivals of a longitudinal wave, the earthquake source mechanisms were constructed, maps of the compression and tension axes, as well as maps of the distribution of the Lode–Nadai stress state coefficient were constructed. **Results.** The analysis of seismicity showed that within the Absheron oil and gas region there are two active seismic zones. The first zone is located in the northern part of the peninsula, and the second is below Absheron on the southern side. Most earthquake hypocenters are located within the basalt layer and upper mantle. The northern focal zone is located at a depth of 0–25 km and has a width of 35 km. The northern zone is associated with the rupture system of the Absheron–Pribalkhan deep fault. In 2003–2012 seismic activity in the northern part of Absheron varies from  $Act = 0.8$  to 1.3, and in 2013–2023. – from 0.45 to 0.65 with a background level of 0.1. On the distribution maps of the Lode–Nadai stress state coefficient, it is clear that the zone of the Absheron Peninsula is mainly characterized by compression stresses.

**Keywords:** earthquake source mechanism, map of epicenters, depth distribution of earthquakes along the profile, orientation of compression and tension axes, seismic activity, oil and gas fields.

**For citation:** Kazimova S.E., Guseinzade G.E., Mammadova P.J. Modern seismogeodynamics of Absheron oil and gas region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 36–48. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.24.003

УДК 550.394

DOI: 10.46698/VNC.2024.77.24.003

Оригинальная статья

## Современная сейсмогеодинамика Апшеронского нефтегазоносного региона

С.Э. Казымова<sup>id</sup>, Г.Э. Гусейнзаде<sup>id</sup>, П.Дж.Маммадова<sup>id</sup>

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

Статья поступила: 02.10.2023, доработана: 27.02.2024, принята к публикации: 28.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Во многих регионах мира концентрация нефтегазовых и крупных месторождений углеводородов наблюдается в зонах пересечения активных разломов, а также в неотектонических блочных структурах. Изменение напряженного состояния глубинных структур может стать причиной активизации сейсмогеодинамических процессов, сопровождающихся тектоническими нарушениями. Кроме того нужно отметить, что основная опасность сейсмических воздействий для территории Апшеронского полуострова исходит со стороны акватории Каспийского моря, на дне которого из года в год возрастает сейсмическая активность. **Целью** данных исследований является изучить современную геодинамическую и сейсмическую активность в пределах Апшеронского нефтегазоносного района. **Методика.** Были проанализированы карты эпицентров землетрясений за период 2003–2023 гг., построенные в программе ArcGIS10.5. По данным каталога были построены карты сейсмической активности за два периода. На основе метода инверсии волновых форм и первых вступлений продольной волны были построены механизмы очагов землетрясений, карты осей сжатия и растяжения, а также карты распределения коэффициента напряженного состояния Лодэ–Надаи. **Результаты.** Анализ сейсмичности показал, что в пределах Апшеронского нефтегазоносного района существуют две активные сейсмические зоны. Первая зона расположена в северной части полуострова, а вторая – ниже Апшерона с южной стороны. Большая часть гипоцентров землетрясений расположена в пределах базальтового слоя и верхней мантии. Северная очаговая зона расположена на глубине 0–25 км, с шириной 35 км. В 2003–2012 гг. сейсмическая активность в северной части Апшерона варьируется от  $A_{кр}=0,8$  до 1,3, а в 2013–2023 гг. – от 0,45 до 0,65 при фоновом уровне 0,1. На картах распределения коэффициента напряженного состояния Лодэ–Надаи, видно, что зона Апшеронского п-ва в основном характеризуется напряжениями сжатия.

**Ключевые слова:** механизмы очагов землетрясений, карта эпицентров, глубинное распределение землетрясений по профилю, ориентация осей сжатия и растяжения, сейсмическая активность, нефтегазовые месторождения.

**Для цитирования:** Казымова С.Э., Гусейнзаде Г.Э., Маммадова П.Дж. Современная сейсмогеодинамика Апшеронского нефтегазоносного региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 36-48. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.24.003

### Introduction

The formation and evolution of the stress–strain state, geophysical processes and seismicity of the Earth’s crust are determined by its structure, natural dynamics and the totality of impacts on the geological environment. The heterogeneity of the structure of the Earth’s crust leads to a non–uniform distribution of stresses and to their concentration at the points of contact between blocks. Slow deformations of the Earth’s crust, caused by natural and man–made causes, lead to movements along tectonic faults. As a result, stress is

reduced and seismic energy is released. Finding out the specific reasons for their occurrence presupposes knowledge of the features of the geological structure of the territory in terms of its historical formation [Nesterenko et al., 2018; Nesterenko et al., 2019].

For many decades, leading petroleum geologists and many other researchers have been studying the oil and gas potential of the Mesozoic deposits of Azerbaijan. The patterns of formation and location of oil and gas accumulation zones in the Mesozoic deposits of the republic were studied as the basis for assessing the prospects for oil and gas potential and developing directions for prospecting and exploration work. The search for oil and gas deposits in the Mesozoic deposits of Azerbaijan began mainly in the post-war years [Gurbanov, 2019].

Like many old oil and gas producing provinces in the world, Azerbaijan has largely exhausted the possibilities of discovering easily accessible oil and gas fields at shallow depths in anticlinal traps, as well as at shallow sea depths. In Azerbaijan, despite the wide stratigraphic range of oil and gas content, its two floors are mainly distinguished: the upper – Pliocene and lower – Mesozoic, separated by a thick clayey strata of the Paleogene–Miocene, in the section of which in some cases small accumulations of oil are found. As a result of the analysis and interpretation of geological–geophysical and petrophysical materials, it was established that oil and gas-bearing reservoirs are mainly fractured volcanic–sedimentary and carbonate rocks of the Cretaceous sediments [Gurbanov, 2019].

As a result of intensive exploitation of gas and oil fields due to a decrease in reservoir pressure, natural geophysical and, accordingly, geodynamic equilibria in the geological environment containing them and adjacent groundwater systems are significantly disturbed. This leads to the formation of dangerous geodynamic processes and a manifold increase in the number and intensity of seismic events in oil and gas production areas [Yushkov et al., 2013]. The Absheron–Balkhan threshold, in the Azerbaijani sector of the Caspian Sea, is a connecting link between the Middle and Southern Caspian Sea, where giant oil fields are concentrated, and to the southwest in the Baku archipelago – the giant gas condensate field Shah Deniz. The intensity of tremors on the Absheron Peninsula from the Baku earthquake sources reaches VII points, from the Mashtagin earthquakes – up to VIII points. The intensity of earthquakes, the epicenters of which are located in the North Absheron water area, reached VIII points, and in almost the entire rest of the peninsula – VII points [Karagezova, 2015].

In this regard, we analyzed the geological structure and geodynamics of the upper part of the Earth's crust in the Absheron oil and gas region, refined its geodynamic model and analyzed the stress–strain state, which largely determines the response of the geological environment to technogenic impacts.

### Geological structure of the district

The Absheron oil–gas region is tectonically a continuation of the southeastern dip of the Great Caucasus megaanticlinorium. The land area of the region consists of the Absheron peninsula extending in the latitude direction and covers an area of 2059 km<sup>2</sup>. The region includes the Absheron peninsula, the Absheron archipelago located east of it, and the islands of the Baku bay belonging to it. The territory of the Absheron oil and gas region is located in the northwestern part of the South–Caspian basin, and its geological structure consists of Upper Cretaceous to Anthropogenic sediments. Lower Cretaceous sediments were studied up to 700 m thick in exploration wells dug in Khazri (well 4), Gilavar (well 2) and Arzu (well 2) areas of the northern tectonic zone of the



Absheron archipelago [Aliyev, 2003]. Faults and mud volcanoes play an important role in the complexity of the structure of the Absheron region. Both transverse and longitudinal fractures are noticeable in this structure. The Meso–Cenozoic complex (8.5–9 km) of terrigenous carbonate sediments is involved in the geological section of the Absheron oil and gas field. Of these, there are more than 30 oil–gas horizons with a thickness of 10–80 km in the section of the Middle Pliocene (alternation of sand, sandstone and clay). The tectonic units of the Western Absheron anticlinorium, the Western Absheron anticlinorium, the Western Absheron synclinorium, the Central Absheron anticlinorium, the Eastern Absheron synclinorium and the anticlinorium of the Absheron archipelago are separated in the area. There are 7 anticlinal zones with more than 50 free folds. 26 of these mixtures are processed. All anticlinal zones are complicated by tectonic disturbances and mud volcanoes. The future of the field is mainly related to Oligocene–Miocene and possibly Upper Cretaceous sediments [Yusifov, 2018].

### Absheron oil and gas field

There are many oil fields, gas condensate oil fields, and condensate fields in the Absheron oil and gas field. Millions tons of oil, gas and condensate are produced from these fields every year. A different picture of oil and gas formation and oil and gas accumulation is established for the Absheron–Balkhan threshold with a near–latitudinal strike (more than 300 km), which is a protrusion of the continental crust of the Eurasian plate (the Epi–Hercynian Turanian plate is located to the north), covered by a platform Mesozoic–Eocene–Pliocene cover [Vorobyov, 1999]. In the northwestern part of the threshold (Neft Dashlary), Eocene deposits are established directly under the layers of the productive strata, overlying Cretaceous rocks with a significant break and unconformity [Agayev, 2004]. A thick complex of Pliocene sediments, reaching 6–7 km in the South Caspian basin, sharply thins along the Absheron–Balkhan threshold, to the north, where in some places it lies directly on the sediments of the Mesozoic complex. The change of complexes along the threshold is accompanied by the replacement of oil fields with gas and gas condensate fields. Oil fields along the Absheron–Balkhan threshold – Neft Dashlary, Gunashli, Chirag, Azeri, Kapaz – are confined to arches of anticlinal sedimentary coverings in the productive strata, which are hydrocarbon traps [Kazimova, 2020]. The zone of the Absheron–Balkhan threshold in the north is limited by the North Absheron trough, with a maximum thickness of the Pliocene sedimentary up to 7 km, and in the south, during the transition in the South Caspian basin, by the Caucasus–Kopet Dag fault–slip fault, which apparently was a consequence of what took place in the early Pliocene failure of the South Caspian depression [Ismail-zade, 2013; Mamedov, 2008].

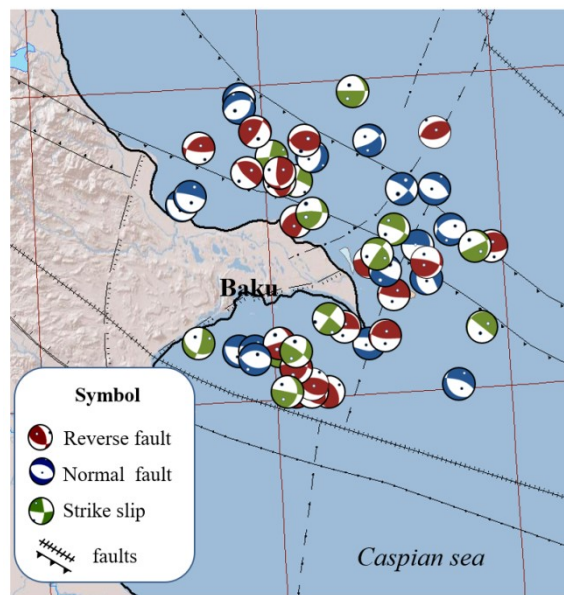
Formed in the post–Pliocene period, the giant gas condensate field Shah Deniz in the productive strata at a depth of 6.5–7.0 km corresponds in composition and physicochemical parameters to hydrocarbons – high–temperature methane, characteristic of depths of 10–12 km. The lack of proper combinations of phase transformation conditions – excessively high pressure and relatively low temperature, as well as a relatively short development period did not contribute to their transformation into the liquid phase. All this allows us to consider the Shah Deniz gas condensate field as an independent gas condensate stage of the hydrocarbon manifestation in the Caspian basin, which has no direct connection with earlier oil fields in the region. According to the author in the article [Ismail-zade, 2013; Mamedov, 2009], the main source of gigantic oil inflows into the Absheron–Balkhan threshold could be the oil and gas complexes of the Middle Caspian Sea, in which the Epi–Hercynian plate with a platform Mesozoic–Cenozoic cover is capable of creating

the conditions of a screening layer capable of accumulating hydrocarbons with their subsequent transformation within the cover in the phase of liquid hydrocarbons.

### Research methods

The earthquake source mechanism is one of the most important parameters characterizing a seismic event. In modern seismology, it is associated with sudden movement of rocks, accompanied by the emission of seismic waves along a surface of weakened strength, and simultaneously reflects the spatial orientation of the axes of the main stresses, possible planes of ruptures and movements in the earthquake source. Since earthquakes have not been recorded on the territory of the Absheron Peninsula, we analyzed the sources of Caspian earthquakes [Etirmishli, 2019].

Earthquake source mechanism were established in the “Dynamics of earthquake source” department of RSXM based on the signs of P waves of 52 digital stations of earthquakes with  $m_l \geq 3.0$  in “Fa\_major” and MomentTensor software [Dreger, 2002; Etirmishli, 2019]. During the years 2003–2023, an analysis of 54 earthquakes with magnitude  $m_l \geq 3.0$ , depth  $h=2-69$  km in the Absheron territory was carried out, and the source mechanisms were established (Fig. 1).



*Fig. 1. The map of earthquake source mechanism with  $m_l \geq 3.0$  for the period 2003–2023*

As can be seen from the map, the Absheron region is dominated by, normal faults and horizontal displacement.

Ten earthquakes with a magnitude  $m_l \geq 4.0$  were recorded in Absheron territory in 2003–2017. Three of these earthquakes are horizontal strike–slip, four are reverse fault and three earthquakes with normal fault type movements and they coincide with Shakhov–Azizbayov, Krasnopolyansky–Zengi–Sangachal–Ogurchi, Makhachkala–Krasnovodsk, Central–Caspian, Siyazan faults. This sources they are located in the depth interval 7–69 km.

On October 24, 2003, at 20:47:24, an earthquake ( $m_l=4.2$ ) felt 43 km northeast of Absheron was recorded. Several aftershocks were recorded after the earthquake. It should be noted that the earthquake that occurred in the Absheron area extends along the Siyazan deep fault. As can be seen from the table, the direction of the compression axis P is directed to the horizon ( $PL=4$ ), and the direction of the tension stress axis T is directed to

the plane close to the horizon (PL=7). A sharp drop was determined for the nodal plane (DP=87–82). It is shown that the value of displacement at the source is (SLIP=–8–(178)). Based on the above, as a result of the stress states, it was determined that the earthquake has normal fault type. On February 6, 2017 at 13:46:39, an earthquake (ml=4.4) felt 60 km southeast of Absheron was recorded. Several aftershocks were recorded after the earthquake. As can be seen from the table, the direction of the compression axis P is directed to the horizon (PL=7), and the direction of the tension stress axis T is directed to the plane close to the horizon (PL=9). A sharp drop was determined for the nodal plane (DP=88–79). It is shown that the value of displacement at the source is (SLIP=–169–(2)). Based on the above, as a result of the stress states, it was determined that the earthquake was of displacement–rupture–fall type.

Thus, having analyzed the data on the source mechanisms of all earthquakes, it was established that for the territory of the Central Caspian Basin, small values of the angles of the tension axes are characterized by large angles of the compression axes, which indicates the predominance of normal–slip movements there (Table 1). Given the choice (according to geological data) of preferred fault planes, both right– and left–lateral strike–slip faults occur [Kazimov et al., 2016]. The earthquakes occurred under conditions of compressive and tensile stresses that were close in magnitude (shear type of movement). The fault type of movement mainly prevails in the central part of the study region. Reverse faults are also found on the territory of the Northern Caspian [Etirmishli et al., 2019]. Comparative analysis of the earthquake source mechanism that occurred in 2003–2023. showed that, in general, the tendency for the predominance of fault–slip movements within the study region remains unchanged. In order to study how the orientation of the main axes of compression and extension changes with depth, we constructed a distribution diagram of the orientation of the main axes of compression and extension of the Caspian region in the depth intervals of 20–30 km, 30–40 km, 40–55 km, 55–70 km. As can be seen in Fig. 4, with depth, the tendency for the SW–NE orientation of the tension axes and the NW–SE orientation of the compression axes becomes more and more clearly evident.

Table 1

Earthquake source mechanism that felt in Absheron territory in 2003–2023 ml≥4.0

№	Date	Time	Coordinates		Principal stress axes						Nodal planes						ml	H, km
			φ°N	λ°E	T		N		P		NP1			NP2				
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP		
1	20030725	23:59:28	40.00	50.25	66	210	16	339	17	74	332	64	72	187	31	122	4.2	41
2	20031004	09:10:58	40.19	49.84	27	35	6	302	62	200	300	72	–97	141	19	–70	4.3	35
3	20031024	20:47:24	40.68	50.15	4	243	82	360	7	153	198	87	–8	288	82	–178	4.2	43
4	20090604	14:20:03	40.40	50.64	16	57	23	320	61	180	309	65	–115	178	35	–47	4.2	44
5	20100603	04:53:30	40.47	50.42	56	207	20	82	25	342	269	73	111	35	27	39	4.2	57
6	20111115	19:33:54	40.05	50.13	60	124	28	285	7	20	267	58	56	138	44	132	4	55
7	20130607	08:33:00	40.52	50.81	17	195	15	290	66	60	118	64	–72	262	30	–121	4.1	69
8	20130909	04:35:47	40.68	49.98	62	66	9	319	27	225	142	72	99	295	20	64	4	7
9	20161027	10:12:52	40.46	50.83	41	170	20	60	41	311	60	90	–110	330	20	0	4.1	55
10	20170206	13:46:39	40.30	50.23	7	170	79	45	9	262	36	88	–169	306	79	–2	4.4	60

### Seismicity of Caspian sea water area.

The Caspian Sea occupies a special place in the seismic life of Azerbaijan. Strong ( $M_{LH} \geq 6.0$ ) earthquakes that occurred here in 1910, 1935, 1963, 1986, 1989 repeatedly shook the bottom of the Caspian Sea, the city of Baku and other coastal areas with high intensity V–VIII points.

The first information about an earthquake in the Caspian water area coincides with 957. The earthquake registered in 957 was felt in the Caspian coastal regions with intensity VII point. There was destruction in the Caspian coastal regions. The main parameters of the earthquake:  $\varphi=42.10$ ;  $\lambda=49.00$ ; magnitude  $M=5.5 (\pm 1.0)$ ; the depth of the hearth was  $h=7-60$ . This earthquake in the Caspian Sea is believed to be two earthquakes. After the earthquake, the sea retreated from the coast by 150 m. So far, the strongest earthquake in the Caspian Sea was recorded on January 2, 1842 at 22:00 ( $\pm 1$  hour). The earthquake was felt with intensity VIII point. The main parameters of the earthquake:  $\varphi=40.50$ ;  $\lambda=50.0$ ; magnitude  $M=4.3 (\pm 0.5)$ ; the depth of the source was  $h=3 (2-5)$ . 700 houses were destroyed in Mashtaga, and 5 were seriously injured. After the Mashtaga earthquake, aftershocks continued until January 12.

The last strong earthquake ( $M=6.2$ ) in the Azerbaijani part of the Caspian Sea occurred on November 25, 2000, 50–60 km south of Absheron, and shook the bottom of the Caspian Sea with intensity VIII point. This earthquake also occurred in Baku and a number of coastal areas with intensity VI–VII points. In Baku, 34 houses were partially destroyed, 7350 houses were damaged [Ismayilova, 2021]. The magnitude of the first shock was  $M=5.2$ . According to the instrumental data, the main parameters of the earthquake:  $\varphi = 40.15$ ;  $\lambda = 50.15$ ; depth of the source  $h=25$  km. At 1.5 intervals, the second impulse occurred. The magnitude of the second shock was  $M=6.2$ . The main parameters of this earthquake: coordinates of the source –  $\varphi=40.05$ ;  $\lambda=50.35$ ; the depth of the source varies between  $h=40-45$  km.

In 2003–2023, 75 earthquakes of  $m_l \geq 3.0$  were registered in Absheron territory and a map of epicenters was created. Earthquakes are located at a depth of 2–70 km. (Figure 2.)

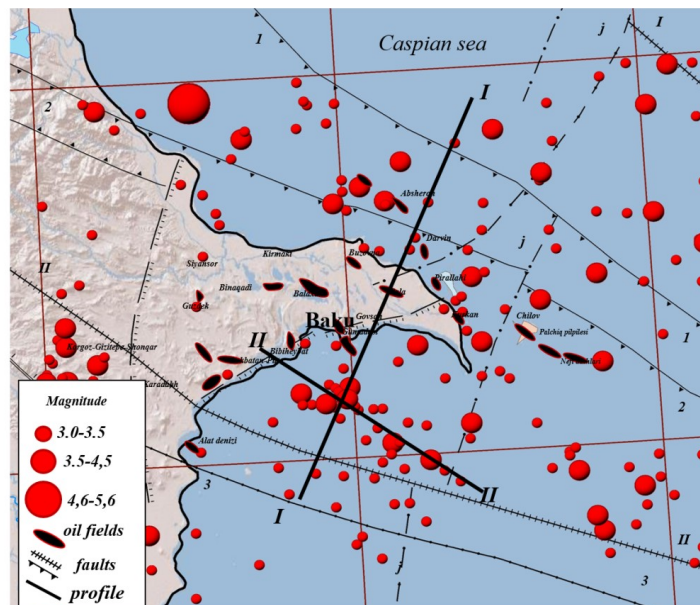


Fig. 2. Absheron oil and gas field during 2003–2023 map of epicenters of earthquakes on faults  
 Faults: I – Agrakhan–Krasnovodsk; II – Krasnopolyansk–Zangi – Sangachal–Ogurchi; j – Makhachkala–Krasnovodsk; 2 – Siazan; 3 – Ajichay–Alat; j – Shakhov–Azizbeyov (The fault map was compiled by: Musayev Sh. [Gasarov, 2006; Gurbanov, 2019; Khain, 2005])



The map of earthquake epicenters that occurred in the Absheron oil and gas field has been created. There are several oil fields in this area. A large amount of oil is produced in these fields during the year. We can give an example of Oily Rocks (Neft Dashlari), Palchyg pilpiles, Chilov, Bibiheybat, Buzovna, Balakhani–Sabunchu–Raman, etc., which are important deposits of the Absheron oil and gas field [Gurbanov, 2019].

Oily Rocks is the world's first oil platform. Oily Rocks is an urban-type settlement and is included in the territory of Baku's Pirallahi district. Located 42 km southeast of the Absheron peninsula, this settlement was built a few meters above sea level on stilts on metal poles attached to the bottom of the sea. Mud Pilpilesi field is located in the Absheron archipelago of the Caspian Sea, 110 km east of Baku and 50 km southeast of Artyom Island. In the area where the deposit is located, the depth of the sea varies from 10 m to 25 m. The deposit belongs to the brachyantical fold, complicated by a large number of transverse and longitudinal fractures [Abdullayeva, 2016]. The bed is 9 km long and 3 km wide according to the ceiling of the Kirmaki layer set. The Chilov field is located in the southeastern part of the Absheron archipelago in the Caspian Sea, 62 km from Baku, 20 km from Pirallahi Island, in the northeast direction. The bed is connected to the island of the same name, which is 7 km long and 5 km wide. Chilov Island, which is 6 km long, is the second largest island in the Absheron archipelago. The island stretches from the northeast to the southwest and is in the form of a thin long strip that gradually narrows [Agayev, 2006; Gadji–Kasumov, 2012]. The depth of the sea is up to 10 meters near the island, and it varies in the range of 5–25 meters along the structure. The Chilov structure belongs tectonically to the Khali–Neft Stones anticlinal belt.

In recent years, the level of seismic activity in certain areas of the Caspian Sea has changed. The amount of seismic energy released in the Central Caspian Sea has increased several times. Along with strong seismic events, a large number of weak earthquakes occur in the study area, which make it possible to study the seismicity of this region in connection with its deep structure [Abdullayeva et al., 2016].

Note that the formation, migration and accumulation of hydrocarbons in the Caspian region occur in the sedimentary cover. Although various geological and geophysical studies have been carried out so far, no geological exploration work has been carried out in the region, taking into account the seismic geodynamic conditions of oil and gas and their patterns. To do this, in order to clarify the nature of seismic geodynamic and dynamic changes in the region, we analyzed the distribution of earthquake source mechanism over area and depth, which determines the geodynamic energy status of the sedimentary cover.

The seismological sequence of earthquakes with  $m_l \geq 1$  km in the Absheron oil and gas field has been established (Fig. 3). The number of earthquakes with magnitude  $m_l \geq 1.0$  was 319, and the depth was distributed in the range of 1–70 km. 4 earthquakes with magnitude  $m_l \geq 4.0$  were recorded [Kazimova et al., 2020; Magomedov, 2021; Kazimov, 2021; Yetirmishli, Kazimov, 2022]. These earthquakes are distributed at a depth of 6–62 km.

A map of the earthquake's epicenters showed that within its boundaries there are two active seismic zones with a 100-year return period for magnitude 8 earthquakes. The first zone is located in the northern part of the peninsula, and the second one covers Absheron from the south. Most earthquakes occurred within these two seismically active zones.

As can be seen in the profile, two focal zones are distinguished to the north of Absheron and to the south (Fig. 3). The northern focal zone is located at a depth of 0–25 km and a width of 35 km. The northern zone is associated with the system of ruptures of the Main



Caucasus and the Absheron–Pribalkhan deep fault, which passes through the northern coastline of the Absheron Peninsula and the territory of the Caspian Sea to the west of Turkmenistan. The destructive Mashtaga earthquake of 1842 occurred precisely in this zone [Ismayilova, 2021]. In addition, less strong earthquakes with a magnitude below 6.0 are confined to it (1983, 1989). In addition, a series of sources are observed at depths of 40–50 and 50–60 km. The southern seismogenic zone is concentrated at a depth of 20–62 km, with a width of 25 km.

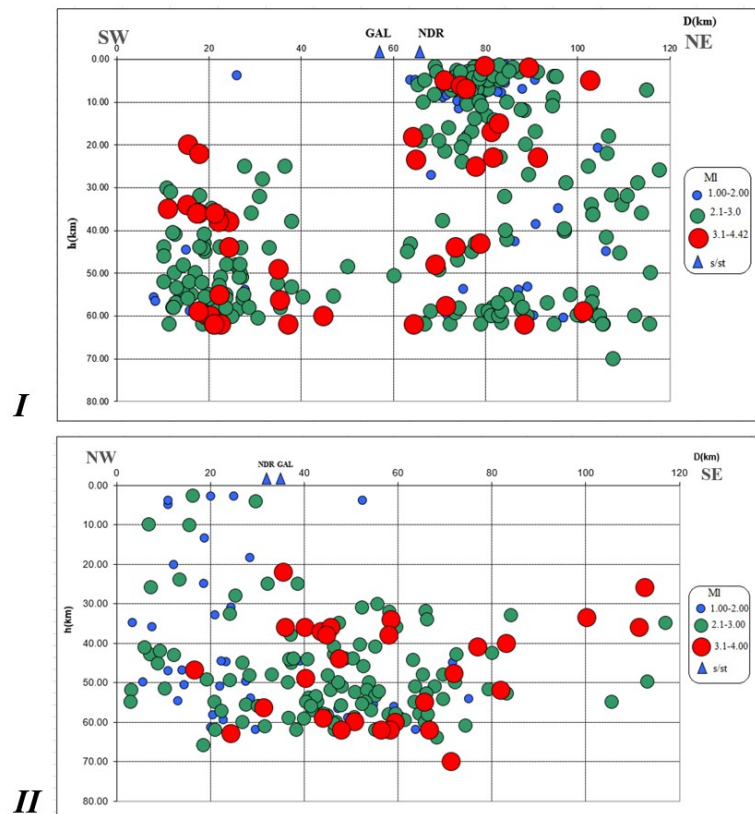


Fig. 3. Seismological cross-section of earthquakes with  $m_l \geq 1.0$  of the Absheron zone on the I-I and II-II profiles in 2003–2023

Earthquakes in the seismological section of the II–II profile are mainly distributed at a depth of 3–70 km. Earthquakes with magnitude  $m_l \geq 4.0$  were accumulated at a depth of 30–62 km. This zone coincides with the eastern continuation of the Vandam zone. The epicenter of the Caspian earthquakes were located in it (35 km south of Baku, November 25, 2000 with magnitudes 5.8 and 6.3). The last Caspian earthquake on November 25, 2000, with a foreshock (magnitude 5.8, focal depth 50.4 km) and with a main strong shock (magnitude 6.3, focal depth 33 km) had a strong impact on the entire Absheron Peninsula and, of course, on Baku (35 people died, 1292 buildings were destroyed and damaged). The source of the November 25 earthquake had a large magnitude and was located close to the study area.

The scheme of compression–tension axes was established based on the data of earthquake source mechanism with  $m_l \geq 3.0$  in the Absheron zone during the years 2003–2023 (Figure 4).

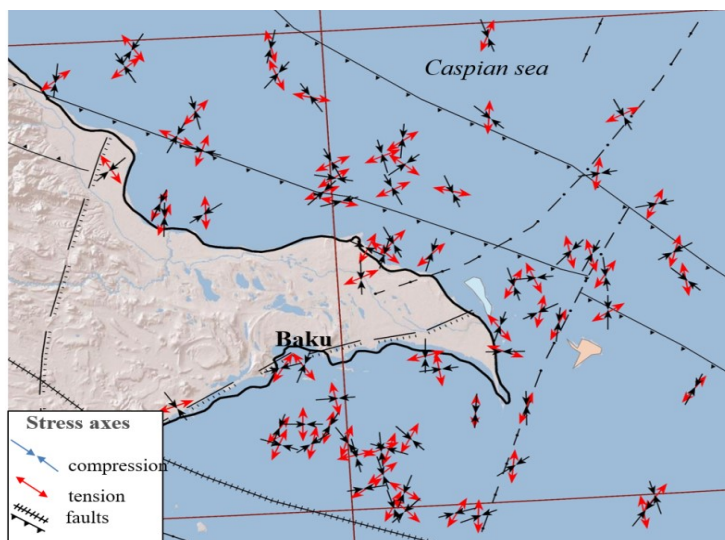


Fig. 4. The scheme of compression–tension axes of earthquake source mechanism  $m \geq 3.0$  in the Absheron region during 2003–2023

On the map, blue indicates compression arrows, red indicates tensile stress. The direction of the compression axis of earthquakes is observed in the Absheron zone in the NE–NW orientation, while the direction of the stress axes is in the NE–SW direction (Fig. 4).

As a result of the orientation of the compression and tension axes, a distribution map of the Lode–Nadai coefficient was constructed. On the map, the blue color shows the tensile stress, the red color shows the compressive stress. As can be seen from the map, the stress in the Absheron zone is mainly characterized by compression stress. The level of the stress in the years 2003–2007 is 0.1–0.3, in the years 2008–2012 0.1–0.4, in the years 2013–2017 0.2–0.6, and in the years 2018–2023 in the range of 0.3–0.8 higher (Fig. 5).

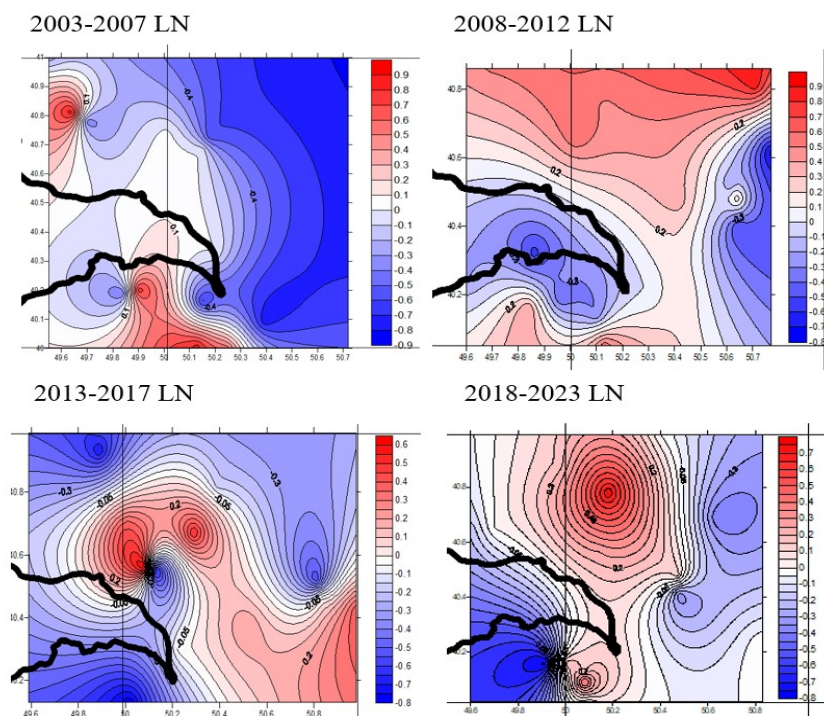


Fig. 5. Distribution map of the Lode–Nadai coefficient as a result of the orientation of compression and tension axes of earthquake source mechanism  $m \geq 3.0$  in the Absheron territory during 2003–2023.

As a result of the research carried out in the Absheron area in 2003–2013, a map of seismic activity was created based on the catalog and map of epicenters. During the years 2003–2023, changes are observed in the northern, southern and eastern parts of the Absheron territory. As can be seen from the map, the activity in the southern part is 1.2–2, compared to the background level of 0.1 in 2003–2012, and in the range of 0.75–1.1 in 2013–2023, compared to the background level of 0.05.

During the years 2003–2012, the activity in the northern part of the Absheron area varies from 0.8 to 1.3, and from 2013 to 2023, it varies from 0.45 to 0.65, compared to the background level of 0.1. In the years 2003–2012, the activity in the northeastern part of the Absheron area varies between 0.4–0.7, compared to the background level of 0.1, and in the years 2013–2023, it varies in the range of 0.25–0.4, compared to the background level of 0.05.

### Results of the study

Thus, the analysis of seismicity showed that within the Absheron oil and gas region there are two active seismic zones, with a 100-year return period for earthquakes of magnitude 8. The first zone is located in the northern part of the Absheron peninsula, and the second one covers from the south. Most earthquakes occurred within these two seismically active zones. The largest part of the hypocenters is observed in the consolidated layer and upper mantle and was formed as a result of active tectonic movements at the junction of the two largest structures of the Earth's crust (Turanian and Kopetdag ridges). The northern focal zone is located at a depth of 0–25 km and has a width of 35 km. The northern zone is associated with the system of ruptures of the Main Caucasus and the Absheron–Pribalkhan deep fault, which passes through the northern coastline of the Absheron Peninsula and the territory of the Caspian Sea to the west of Turkmenistan. The southern seismogenic zone is concentrated at a depth of 20–62 km, with a width of 25 km. This zone coincides with the eastern continuation of the Vandam zone. The epicenters of the Caspian earthquakes were located in it (35 km south of Baku, November 25, 2000 with magnitudes 5.8 and 6.3).

In order to study zones of stress and deformation of the Earth's crust, the parameters of the earthquake source mechanism, the conditions for their formation, and the stress zones of the Earth's crust were analyzed. Displacement values at the source indicate that strike-slip and normal fault movements predominate. But in the area of the Central Caspian Sea and oil fields, movements such as reverse faults and reverse faults are formed. Analysis of the compression and extension axes shows that the compression axes of earthquakes are oriented in the SW–NE direction, while the extension axes are predominantly oriented in the NW–SE direction. The stress state in the study area changes over the years and is characterized mainly by tensile stresses.

Geological interpretation of materials from earthquake sources shows that in this uplift zone, corresponding to the intercontinental accretion zone. This activation occurs as a result of the subduction of the South Caucasian microplate under the Middle Caspian segment of the Scythian–Turanian epiherzian platform, i.e. pseudosubduction.

### Conclusions

Oil and gas intensification in regions characterized by large oil and gas fields leads to changes in the natural (geological) environment, including changes in hydro–gas–geodynamic and geodynamic processes in large areas of ten kilometers or more (10,000

km<sup>2</sup>) in the Earth's crust, and causes environmental problems. Those changes can be considered as one of the factors affecting the development of nature in the region and lowering the quality of life of the population.

As a result, the rate of occurrence of natural and man-made processes in oil and gas regions increases, and the seismic activity causes an unexpected event with a wide range of dangers. The solution of this problem is one of the important factors of conducting seismological research in a complex manner, it is possible to study the processes occurring at depth under the influence of hydrocarbons, including the state of technological processes. Thus, the study and analysis of these processes provides an opportunity to answer many questions. It will be possible to increase economic activity in the region by forecasting oil and gas production of Absheron region and increasing the efficiency of oil and gas production, ensuring their safety through pipelines.

### Referenses

1. Etirmishli G.J., Kazimova S.E. Types of tectonic movements of seismogenic regions of Azerbaijan according to the earthquake source mechanism. Geological and Geophysical Research of the Deep Structure of the Caucasus: Geology and Geophysics of the Caucasus: modern challenges and research methods, Collective monograph, Vladikavkaz, 2017. p. 20–25. (In Russ.)
2. Etirmishli G.J., Kazimova S.E., Kazimov I.E. Calculation of the seismic moment tensor of earthquakes in Azerbaijan for the period 2012–2015. Geology and geophysics. Vol. 60. No. 7. RAS, Novosibirsk, 2019. p. 1036–1051. (In Russ.)
3. Etirmishli G.J., Valiev G.O., Ismailova S.S., Kazimov I. E. Residual oil extraction technologies. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 84–96. (In Russ.)
4. Gurbanov V.Sh., Sultanov L.A., Shikhiyev N.G. On the oil and gas potential of Mesozoic deposits of Azerbaijan. In the collection: New ideas in Earth sciences. Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference: in 7 volumes. 2019. pp. 47–49. (In Russ.)
5. Kazimov I.E. Geodynamics of the territory of Azerbaijan on the basis of GPS data in 2017-2019. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 51–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.47.92.004. (in Russ.)
6. Kazimov I.E., Kazimova S.E. Modern geodynamics of the middle and southern Caspian Sea. Geology and Geophysics of Russian South. 2016. No. 2. pp. 140–151. (In Russ.)
7. Magomedov R.A. Features of relationship between spatial-time distribution of seismicity, the level of geodynamic potential of the earth's crust blocks and fault-block tectonics of the Eastern Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 69–80. DOI: 10.46698/VNC.2021.72.56.006. (in Russ.)
8. Nesterenko M.Yu., Karpyuk M.S., Tsvyak A.V., Kapustina O.A. Natural–technogenic geodynamics and seismic activity and their influence on high–risk objects in the Orenburg region. Problems of risk analysis. 2018. Vol. 15. No. 3. pp. 32–39. (In Russ.)
9. Nesterenko M.Yu., Nesterenko Yu.M. Natural–technogenic geodynamics and seismic activity of the eastern part of the Orenburg region. Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2019. No. 4. p. 12. (In Russ.)
10. Vorobyov V.Ya., Ogarjanov V.A., Solomin S.V. Relationship between the geodynamics and stress state of the earth's crust of the East European Platform and oil and gas potential. Geophysics. 1999. No. 4. pp. 52–55. (In Russ.)
11. Yetirmishli G.J., Kazimov I.E. Modern GPS geodynamics of Azerbaijan. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 19–30. DOI: 10.46698/VNC.2022.35.95.002. (in Russ.)
12. Yushkov I.R., Khizhnyak G.P., Ilyushin P.Yu. Development and operation of oil and gas fields. Perm: Perm State National Research Polytechnical University, 2013. 177 p. (In Russ.)
13. Abdullayeva R.R., Ismayilova S.S., Akbarov E.R. Geodynamics of Azerbaijan part of the



Caspian Sea. Seismoprognosis observations in the territory of Azerbaijan. Vol. 13. No. 1. 2016. 16–22.

14. Agayev V.B., Guseynov A.G., Balomedov Sh.R., Amirov E.F. Caspian Sea: origin, geodynamics and stratigraphy. Bulletin of Baku University. Ser. "Natural Sciences". 2006. No. 1. p. 86–101.

15. Aliyev A.R. Report of the works carried out by the ANAS RSSC Seismological Expedition in the seismically active regions of Azerbaijan in 2003. Baku. 2004. p. 90.

16. Dreger D.S. Time–Domain Moment Tensor INVerseCode (TDMT\_INV). University of California, Berkeley Seismological Laboratory. 2002. 18 p.

17. Gadji–Kasumov A.S., Mustayev R.N., Mukasheva N.V. Features of hydrocarbon generation in the South Caspian basin. Collection of abstracts of the 1st international conference “Hydrocarbon potential of great depths: Energy resources of the future – reality and forecast”. Baku: Nafta–Press. 2012. pp. 47–55.

18. Gasanov A.G., Mammadli T.Y. Basic elements of seismology. Baku: Elm, 2006. p. 171.

19. Ismail–zade A.D. Geodynamic analysis of oil and gas formation in the South Caspian basin (Azerbaijan sector). History and pedagogy of natural sciences. 2013. No. 3. pp. 29–35.

20. Ismayilova S.S. Seismogeodynamics of the Caspian Sea for 2018–2020 years. Seismoprognosis observations in the territory of Azerbaijan. 2021. Vol. 20. No. 2. pp. 33–42.

21. Karagezova N.R. Integrated analysis of seismic hazard of the territory of Azerbaijan, dissertation for the title of candidate of geological and mineralogical sciences. Baku, 2015. p. 195.

Kazimova S.E., Ismailova S.S., Bekirov M.A. 22. Geographical–geodynamic characteristics of the Caspian Sea and seismogeotectonics of the Azerbaijan sector. Azerbaijan oil industry. 2020. No. 4. pp. 9–14.

23. Khain V.E., Alizade A.A. Geology of Azerbaijan. Vol. IV Tectonics, ed. 2005. Baku: Nafta–Press. pp. 214–234.

24. Mamedov P.Z. On the reasons for the rapid subsidence of the earth's crust in the South Caspian basin. ANKh. 2008. No. 1. pp. 8–20.

25. Mamedov P.Z. Study of the earth's crust of the South Caspian basin based on seismological data from the Republican Center for Seismological Service of ANAS. Baku, 2009. pp. 134–147.

26. Yusifov Kh.M., Aslanov B.S. Oil and gas basins of Azerbaijan, Baku, 2018. 324 p.



УДК 550.24

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.44.004

Оригинальная статья

## Оценка геосейсмической опасности северо-восточного сегмента Восточного Кавказа

Р.А. Магомедов 

Институт геологии ДФИЦ РАН, Россия, 367030, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75,  
e-mail: ra-mag@yandex.ru

Статья поступила: 09.09.2023, доработана: 12.02.2024, принята к публикации: 16.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Регион Восточного Кавказа является самым сейсмоактивным в европейской части России. Актуальность проводимых исследований в рамках государственного задания по оценке сейсмической безопасности региона не вызывает сомнений. Потенциальный уровень сейсмической опасности блоков земной коры является важнейшим показателем оценки степени сейсмической опасности исследуемого региона. Она позволяет идентифицировать сейсмогенерирующие структуры региона и приблизиться к составлению детальной карты зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). **Цель исследования.** Оценка уровня геосейсмической опасности блоков земной коры исследуемого региона и выделение потенциальных зон ожидания возможных очагов катастрофических землетрясений в исторической перспективе. **Методы исследования.** Основными методами исследования являются анализ пространственно-временного распределения сейсмичности за инструментальный период наблюдений, анализ каталога исторических землетрясений, исследований по изучению следов палеосейсмичности, а также, экспертная оценка уровня геосейсмической опасности блоков земной коры по комплексу геосейсмологических показателей, таких как мощность земной коры, протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла, наличие следов палеосейсмичности, мощность сейсмоактивного слоя, сейсмическая активность и наклон графика повторяемости землетрясений, максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда, период последней активизации и тектоническая активность. **Результаты исследования.** В результате проведенных исследований впервые проведена количественная оценка геосейсмической опасности территории северо-восточного сегмента Восточного Кавказа. Проведенные исследования позволяют идентифицировать сейсмогенерирующие структуры, закартировать (в условных единицах) потенциальный уровень геосейсмической опасности исследуемой территории и приблизиться к составлению детальной карты зон ВОЗ. Установлено, что области с максимальными значениями потенциала геосейсмической опасности пространственно совпадают с зонами возможных очагов сильных землетрясений, имеющими историческую активность и приурочены к зоне пересечения субкавказских глубинных разломов с главным кавказским структурным элементом – Аграхано-Тбилиско-Левантийской левосдвиговой зоной 1-го порядка.

**Ключевые слова:** региональная геотектоника, сейсмичность, палеосейсмичность, современная сейсмичность, сейсмическая активность, сейсмическая опасность, магнитуда, тектонические напряжения.

**Благодарности:** Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГ ДФИЦ РАН по теме НИР, Рег. номер НИОКТР 1021060808491-6-1.5.6.

**Для цитирования:** Магомедов Р.А. Оценка геосейсмической опасности северо-восточного сегмента Восточного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 49-63. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.44.004

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.44.004

Original paper

## Assessment of geoseismic hazard of the north-eastern segment of the Eastern Caucasus

R.A. Magomedov 

Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,  
75 Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, Russian Federation,  
e-mail: ra-mag@yandex.ru

Received: 09.09.2023, revised: 12.02.2024, accepted: 16.02.2024

**Summary: Relevance.** The Eastern Caucasus region is the most seismically active in the European part of Russia. The relevance of the research carried out within the framework of state tasks for assessing the seismic safety of the region is beyond doubt. The potential level of seismic hazard of the Earth's crust blocks is an important indicator of assessing the seismic hazard level of the studied region. It makes it possible to identify the seismogenerating structures of the region and get closer to drawing up a detailed map of the zones of possible earthquake sources (PES). **The aim** of the study. Assessment of the level of geoseismic hazard of the crustal blocks of the studied region and identification of potential waiting areas for possible sources of catastrophic earthquakes in the historical perspective. **Research methods.** The main research methods are the analysis of the spatiotemporal distribution of seismicity over the instrumental observation period, the analysis of the catalog of historical earthquakes, studies of traces of paleoseismicity, as well as expert assessment of the level of geoseismic hazard of crustal blocks by a set of geoseismological indicators. These indicators are the thickness of the Earth's crust, the extent of disjunctive zones of the foundation and sedimentary cover, the presence of traces of paleoseismicity, the power of the seismoactive layer, seismic activity and b-parameter of the magnitude-frequency graph, the maximum marked (observed) magnitude, the period of the last activation and tectonic activity. **The results of the study.** As a result of the conducted research, a quantitative assessment of the seismic hazard of the territory of the north-eastern segment of the Eastern Caucasus was carried out for the first time. The conducted studies make it possible to identify seismogenerating structures, map (in conventional units) the potential level of geoseismic hazard of the studied territory and get closer to drawing up a detailed map of PES zones. It is established that the areas with the maximum values of the geoseismic hazard potential spatially coincide with the zones of possible sources of strong earthquakes having historical activity and are confined to the zone of intersection of the Subcaucasian deep faults with the main Caucasian structural element – the Agrakhan-Tbilisi-Levantine left-thrust zone of the 1st order.

**Keywords:** regional geotectonics, seismicity, paleoseismicity, modern seismicity, seismic activity, seismic hazard, magnitude, tectonic stresses.

**Acknowledgements:** *The article was prepared as part of the fulfillment of the state task of the IG DFIC RAS on the topic of research and development, Reg. number of RIOCTR 1021060808491-6-1.5.6.*

**For citation:** Magomedov R.A. Assessment of geoseismic hazard of the north-eastern segment of the Eastern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(1): 49-63. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.44.004

### Введение

Потенциальный уровень сейсмической опасности блоков земной коры является важнейшим показателем оценки степени сейсмической опасности исследуемого региона. Она позволяет приблизиться к составлению детальной карты зон возмож-

ных очагов землетрясений (ВОЗ).

За предыдущий этап исследований нами разработаны две методики по оценке геодинамического и сейсмотектонического потенциалов северо-восточного сегмента Восточного Кавказа. Продолжением проводимых исследований явилась разработка нового метода оценки уровня геосейсмической опасности на основе синтеза двух вышеупомянутых методик и с учетом известных методов [Нечаев и др., 1998; Рейснер и др., 1998, 2002; Рогожин и др., 2001, 2013, 2019; Заалишвили и др., 2011; Тишкин, 2006; Уломов, 2008; Заиканов и др., 2019; Стогний и др., 2022; Zaalishvili et al., 2011; Babeshko et al., 2021; Vlinova, 2019; Mammadli, 2022; Mammadli et al., 2023 и др.]. При этом стояла задача детально оконтурить зоны ВОЗ. С этой целью проведено дробное деление квазиоднородных геодинамических блоков (КОГБ) региона [Магомедов и др., 2021] (рис. 1).

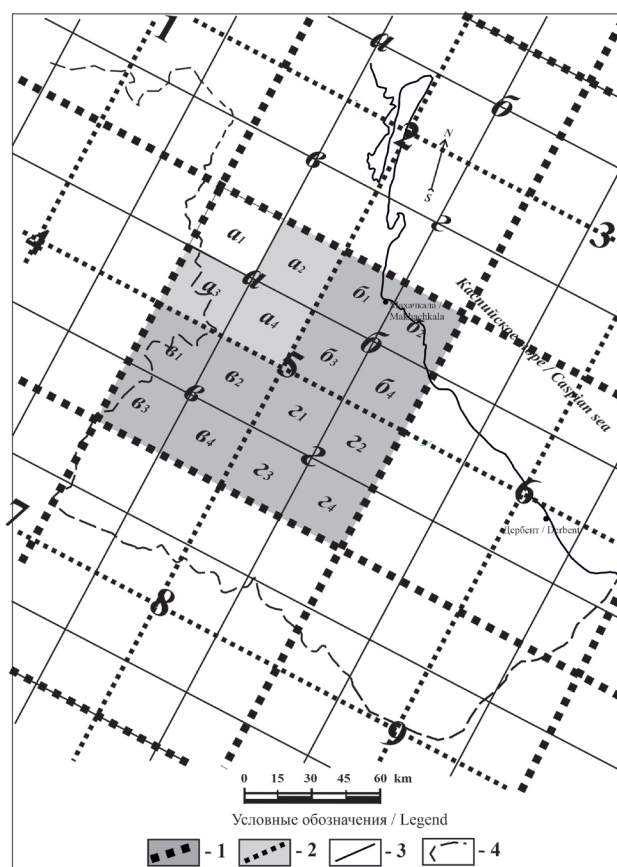


Рис. 1. Схема разбиения квазиоднородных геодинамических блоков северо-восточного сегмента Восточного Кавказа. /

Fig. 1. The scheme of division of quasi-homogeneous geodynamic blocks of the northeastern segment of the Eastern Caucasus.

Границы блоков местного порядка: 1 – первого (в середине блока – его номер), 2 – второго (в середине блока – его буквенное обозначение), 3 – третьего (наименьшего порядка, в середине блока – его буквенное обозначение с индексом), 4 – граница республики Дагестан. Полутоннами выделен блок для наглядной иллюстрации дробного деления квазиоднородных геодинамических блоков /

The boundaries of the local order blocks: 1 – the first (in the middle of the block – its number), 2 – the second (in the middle of the block – its letter designation), 3 – the third (of the smallest order, in the middle of the block – its letter designation with an index), 4 – the border of the Republic of Dagestan.

A block is highlighted in half-tones to illustrate the fractional division of quasi-homogeneous geodynamic blocks.

Под термином «квазиоднородный» здесь имеется в виду, «однородный» в геологическом, тектоническом и геодинамическом отношении объем геосреды. Блок наименьшего порядка по [Магомедов и др., 2021] разделили на 4 части с примерными поперечными размерами в 30 км каждая, в соответствии с проявлением предвестниковых аномалий высокочастотной части спектра излучений сейсмических волн, которые применяются при уточнении местоположения очага землетрясения на заключительной стадии развития сейсмического процесса. Выбранный способ деления (разбиения) гарантирует от завышения степени геосейсмической опасности рассматриваемого блока, которое может произойти за счёт влияния «потенциала» смежных блоков.

Под понятием «геосейсмическая опасность» здесь подразумевается уровень максимальной потенциальной энергии, заключенный в структуре (блоке) земной коры по состоянию на современный период его развития и определяемый на основе расчета геосейсмологических показателей в условных единицах. В зависимости от литолого-структурного строения, вещественного состава, геолого-геофизических условий и истории геологического развития того или иного участка земной коры, потенциальная энергия эпизодически преобразуется в кинетическую в процессе сейсмических событий в настоящем или в будущем.

*Геосейсмологические показатели* характеризуют уровень потенциальной энергии состоящей не только из той ее части, которая заключена в геологической структуре (блоке) на атомарном (вещественном) уровне, но и запасенной геотектонической (генетически обретенной в процессе длительного литогенеза и в процессе истории его геологического развития), а также – накопленной в результате современных геодинамических и геотектонических процессов. Каждый блок земной коры имеет свой уровень заключенной потенциальной энергии, зависящий от литолого-структурного строения, вещественного состава, геолого-геофизических условий и истории его геологического развития. Запасенная потенциальная энергия может проявиться в зависимости от разных причин: от снятия литостатического давления в результате экзогенных геологических процессов (эрозия, размыв и т.д.) с «расконсервацией» генетически обретенных и накопленных в современный период геонапряжений; в результате тектонических подвижек; в результате физико-химических процессов в самой геологической среде (фазовых переходов в минералах на большой глубине при больших значениях р-Т-условий со скачкообразным изменением упругих и прочностных характеристик) и т.д.

## Материал и методы

В настоящей работе определен набор *геосейсмологических показателей*, характеризующий в наибольшей степени потенциальный уровень геосейсмической опасности КОГБ (сейсмический потенциал) на современном историческом этапе: а) мощность земной коры ( $m$ , км); протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла ( $l$ , км); наличие следов палеосейсмичности (площадь распространения следов палеосейсмичности,  $s$ , км<sup>2</sup>) – *геологические критерии*, б) мощность сейсмоактивного слоя ( $h_s$ , км); сейсмическая активность ( $A_{10}$ ); максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда ( $M_{max}$ ); период последней активизации ( $\tau$ ) и тектоническая активность ( $a_t$ ) – *сейсмологические критерии*. Потенциальный уровень геосейсмической опасности ( $G_s$ ) блоков земной коры представляется как функция, зависящая от приведенных здесь показателей:

$$G_S = f(m, l, M_{\max}, a_b, \tau, s, h_S, A_{10}) \quad (1)$$

Приведенный набор геосейсмологических показателей о современном строении и состоянии земной коры является исчерпывающим, поскольку многие другие параметры (в частности, количественные характеристики тангенциальных тектонических напряжений, согласно существующей схеме разломно-блоковой структуры региона; скорость их современных движений; литолого-стратиграфическая характеристика с вещественным составом; определение предела прочности горных пород в конкретных геолого-геофизических условиях и т.д.) невозможно использовать из-за их неполноты.

Каждый показатель градуирован с условным весом, определенным экспертным путем (от 0 до 1) и учтен в суммарной оценке (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Экспертная градуировка геосейсмологических показателей  
в условных единицах (от 0 до 1) /  
Expert grading of geoseismological indicators in conventional units (from 0 to 1)**

№ п/п / numbers in order	Геосейсмологические показатели / Geoseismological indicators	Экспертная градуировка / Expert grading	Условные Единицы / Conventional units
1	2	3	4
1	Мощность земной коры, в км / <i>The thickness of the Earth's crust, in km</i>	максимальная мощность / Maximum thickness – 100%	1
		от 80 % до максимальной / from 80 % to the maximum	0,5
		ниже 80 % / below 80 %	0,1
2	Протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла, в км. / <i>Length disjunctive zones of the foundation and sedimentary cover, in km.</i>	максимальная суммарная протяженность дизъюнктивных зон <i>фундамента</i> / maximum total length disjunctive zones <i>of the foundation</i>	1
		от 1/2 максимальной до максимальной / from 1/2 maximum to maximum	0,7
		менее 1/2 максимальной / less than 1/2 of the maximum	0,3
		максимальная протяженность дизъюнктивных зон в <i>осадочном чехле</i> / maximum length disjunctive zones <i>in the sedimentary cover</i>	0,5
		от 1/2 максимальной протяженности до максимальной / from 1/2 of the maximum length to the maximum	0,2
		менее 1/2 максимальной / less than 1/2 of the maximum	0,1
3	Максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда, $M_{\max}$ . / <i>Maximum marked (observed) magnitude, <math>M_{\max}</math></i>	сейсмическое событие в блоке с $M \geq 6.6$ / seismic event in the block with $M \geq 6.6$	1
		$M_{\max}$ в пределах от 6 до 6.5 / $M_{\max}$ in the range from 6 to 6.5	0,9
		-/- в пределах от 5.5 до 5.9 / in the range from 5.5 to 5.9	0,8
		-/- в пределах от 4.5 до 5.4 / in the range from 4.5 to 5.4	0,7
		-/- в пределах от 3.8 до 4.4 / in the range from 3.8 to 4.4	0,5
		-/- менее 3.8 / less than 3.8	0,1



<i>Продолжение таблицы 1</i>			
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
4	Тектоническая активность, $a_t$ / <i>Tectonic activity, <math>a_t</math></i>	современная активность (за последние 100 лет) / modern activity (over the last 100 years)	1
		историческая активность / historical activity	0,7
		четвертичная и новейшая активность / quaternary and recent activity	0,2+0,1
5	Период последней активизации, $\tau$ / <i>The period of the last activation, <math>\tau</math></i>	сильное сейсмическое событие в блоке XVIII-XIX вв. / a strong seismic event in the block of the XVIII-XIX centuries.	1
		XVII век / XVII century	0,5
		с VII по XIII века / from the VII to the XIII centuries	0,1
6	Наличие следов палеосейсмичности, $S$ в км <sup>2</sup> / <i>Presence of traces of paleoseismicity, <math>S</math> in км<sup>2</sup></i>	максимальная площадь распространения следов палеосейсмичности / maximum distribution area traces of paleoseismicity	1
		от 1/2 максимальной площади до максимальной / from 1/2 of the maximum area to the maximum	0,5
		менее 1/2 максимальной площади / less than 1/2 of the maximum area	0,3
7	Мощность сейсмоактивного слоя, $h$ в км / <i>The power of the seismoactive layer, <math>h</math> in км</i>	мощность сейсмоактивного слоя $\geq h_{max}$ / the thickness of the seismically active layer $\geq h_{max}$	1
		$0,75 h_{max} \leq h < h_{max}$	0,8
		$0,50 h_{max} \leq h < 0,75 h_{max}$	0,5
		$0,25 h_{max} \leq h < 0,50 h_{max}$	0,3
		$h < 0,25 h_{max}$	0,1
		При отсутствии очага / In the absence of a hearth	0
8	Сейсмическая активность, $A_{10}$ / <i>Seismic activity, <math>A_{10}</math></i>	максимальное значение / maximum value – 1,77	1
		в пределах от 1,50 до 1,77 / in the range from 1.50 to 1.77	0,9
		-//-/- от 1,00 до 1,49 / from 1.00 to 1.49	0,7
		-//-/- от 0,50 до 0,99 / from 0.50 to 0.99	0,5
		-//-/- от 0,30 до 0,49 / from 0.30 to 0.49	0,3
		-//-/- менее 0,30 / less than 0.30	0,1
		при отсутствии информации по блоку / if there is no information about the block	0

Вся информация сводится в итоговую таблицу, где отображается потенциальный уровень геосейсмической опасности каждого выделенного КОГБ (сейсмический потенциал) в условных единицах. При оценке уровня геосейсмической опасности приняты допущения:

1. Горизонтальные размеры блоков примерно одинаковые.

2. При оценке протяженности дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла не учитываются границы квазиоднородных блоков (искусственные границы). Рассматривая границы блоков как области пространства и дизъюнктивные структуры, одновременно принадлежащие двум смежным блокам, мы сразу сталкиваемся с вопросом: где в этой области пространства провести линию, от которой следует считать протяженности дизъюнктивных зон и размеры блока? От этого в значительной мере зависят результаты последующих расчетов и их интерпретации. Поэтому принимаем допущение не учитывать искусственные границы.

3. Принимается, что блоки, на данный момент, изучены примерно с одинаковой полнотой.

При градуировке геосейсмологических показателей в условных единицах придерживались следующего регламента:

1. Выбор максимального значения показателя производился после расчета для всей исследуемой территории (т.е. после расчета показателя для всех квазиоднородных геодинамических блоков).

2. Показатель «*мощность земной коры*» определялся по карте мощности земной коры исследуемой территории и с привлечением данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и интерпретации гравиметрических материалов при их наличии.

3. Протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла измерялась на геолого-тектонических картах соответствующего масштаба курвиметром.

4. *Максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда* определялась по результатам анализа общего каталога землетрясений Единой геофизической службы РАН (ЕГС РАН) с учетом сильных исторических землетрясений на исследуемой территории.

5. Для целей определения уровня геосейсмической опасности блоков и определения зон *ВОЗ современная и историческая активность* имеет наибольшее значение и условный (удельный) вес по сравнению с *четвертичной и новейшей активностью*.

6. *Период последней активизации* определялся по каталогу исторических землетрясений исследуемой территории и исторической летописи. Макросейсмические данные о сильных землетрясениях для кавказского региона имеются с VII века нашей эры. В доинструментальный период (VII-XIX вв.) имеются сведения о 18 землетрясениях, весьма существенно отличающихся по своей информативности [Левкович и др., 1977]. Несомненно, лишь то, что по описаниям они отражают последствия сильных и разрушительных землетрясений.

7. Показатель «*наличие следов палеосейсмичности*» определялся на основе анализа результатов публикаций по исследованию следов палеосейсмических событий. Производится наложение построенных карт и схем распространения следов палеосейсмических событий исследуемой территории на схему КОГБ с последующим определением их площади распространения для каждого блока. Максимальной площади распространения следов палеосейсмических событий присваивается условная единица – 1.

Исследователи Кавказа неоднократно отмечали признаки древних землетрясений в регионе [Тихомиров и др., 1947; Милановский, 1973; Геологическая изученность ..., 1989; Геология и нефтегазоносность..., 1959; Гаврилов, 2017 и др.].

Многие кавказские геологи, в том числе Андрусов Н.И., Шатский Н.С., Герасимов А.П., Успенская Н.Ю., Воссаяевич Н.Б., Брод И.О., Мирзоев Д.А., Пирбудагов В.М., Шарафутдинов Ф.Г., Шарафутдинов В.Ф., Магомедов Р.А. и многие другие в своих отчетах и рукописных работах приводят множество примеров нахождения следов палеосейсмичности в регионе. Например, Н.Ю. Успенской в своих отчетах впервые были описаны подводно-оползневые явления в фораминиферовых отложениях, на новых площадях в миатлинской свите (майкопский век – верхний олигоцен). Оценкой площадей распространения следов палеосейсмичности в процессе работы над своими диссертациями занимался Шарафутдинов В.Ф., который впервые составил карту распространения олистостромовых толщ и установил общие закономерности распространения олистостромов в палеоцен-эоценовых отложениях и клиноформных образований майкопа, которые образуют своеобразные горизонты, прослеживающиеся через всю территорию региона на 250-300 км вдоль простирания и на 30-40 км в направлении падения слоев. Следы палеосейсмических событий (сейсмиды) установлены в мезозойско-кайнозойских морских осадочных толщах Северного Кавказа [Гаврилов, 2017]. В пределах антиклинальных структур Сланцевого Дагестана нами отмечено широкое проявление признаков палеосейсмичности [Магомедов, 2017 и др.].

8. Показатель «*мощность сейсмоактивного слоя*» определялся по распределению гипоцентров ощутимых землетрясений по глубинам. Оно дает сведения о сейсмоактивном слое и его глубине залегания. Мощность сейсмоактивного слоя в блоке с одиночным и на одинаковом уровне очагами принимается как 5 км.

9. Значение сейсмической активности  $A_{10}$  для исследуемой территории вычислялось по известной формуле [Ризниченко, 1979 и др.; Арефьев и др., 1980]:

$$A_{10} = \frac{S_0 \cdot T_0}{S \cdot T} \cdot \frac{\sum_{K_{\min}}^{K_{\max}} 10^{\gamma(K-10)} \cdot N_K}{K_{\max} - K_{\min} + 1} \quad (2)$$

где  $\gamma$  – наклон графика повторяемости;  $S_0$  – единица нормирования по площади ( $S_0 = 1000 \text{ км}^2$ );  $T_0$  – единица времени ( $T_0 = 1 \text{ год}$ );  $S$  – площадь выбранных;  $T$  – период наблюдения землетрясений.

Для определения значения сейсмической активности каждого блока в условных единицах производится наложение построенной карты  $A_{10}$  исследуемой территории на схему КОГБ с последующим определением значения условного показателя для каждого блока. Определяется максимальное ее значение, которому присваивается – 1. Между максимальным и минимальным значениями производится дробное деление (в таблице приведен пример дробного деления).

Вся информация сводится в итоговую таблицу 2, где отображается потенциальный уровень геосейсмической опасности каждого выделенного КОГБ в условных единицах.

Таблица 2 / Table 2

Суммарная оценка уровня потенциала геосейсмической опасности блоков северо-восточного сегмента Восточного Кавказа в условных единицах / Summary assessment of the potential level of geoseismic hazard of the blocks of the north-eastern segment of the Eastern Caucasus in conventional units

Квазиодородные геодинамические блоки (КОГБ) / Quasi-homogeneous geodynamic blocks (KGB)	Показатели потенциала геосейсмической опасности КОГБ (условные единицы) / Indicators of the potential of geoseismic hazard of the KGB (conventional units)										Суммарная оценка показателей, ур. ед. / Summary assessment of indicators, conl. ed.					
	мощность осадочной коры (m) / the thickness of the sedimentary cover and the earth's crust (m)	протяженность дивергентных зон фундамента и осадочного чехла (l) / extent of disjunctive zones of the foundation and sedimentary cover (l)	наличие признаков палеосейсмичности (s) / the presence of signs of paleoseismicity (s)	геотектоническая активность (a <sub>t</sub> ) / tectonic activity (a <sub>t</sub> )	период последней активизации (τ) / the period of the last activation (τ)	максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда (M <sub>max</sub> ) / maximum marked (observed) magnitude (M <sub>max</sub> )	мощность сейсмоактивного слоя (h <sub>s</sub> ) / power of the seismically active layer (h <sub>s</sub> )	сейсмическая активность (A <sub>100</sub> ) / seismic activity (A <sub>100</sub> )	1	2	3	4				
<b>1</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.8	0.4	0.4	0.4
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.5	0.4	0.4
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.5	1.2	1.0
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.0	1.3	1.2	1.2
<b>2</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.5	0.5	0.9	0.9
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.0	1.3	1.2	0.9
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.2	1.3	1.1	1.3
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.0	1.0	1.3	1.4
<b>3</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.4	0.6	0.5
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.4	0.4	0.4
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.8	0.5	1.0	1.1
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.5	0.5	1.3	0.5
<b>4</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.0	1.4	1.2	1.7
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.4	2.1	2.1	4.2
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.4	1.5	0.4	0.8
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	2.4	4.3	2.0	2.7
<b>5</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	4.4	4.6	4.0	3.3
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	3.7	2.5	4.4	2.6
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	3.0	2.9	5.1	4.6
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	3.0	2.9	2.4	3.5
<b>6</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.4	1.0	1.8	2.7
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	2.9	2.3	3.8	3.2
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	2.5	2.5	3.3	2.0
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.4	2.0	0.8	0.8
<b>7</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	2.7	2.7	2.1	2.5
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.8	0.8	0.8	0.8
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.8	1.7	0.8	0.9
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	3.8	3.3	2.9	2.9
<b>8</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	2.0	3.0	2.4	2.7
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.5	1.6	0.9	1.4
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	2.4	2.3	1.7	1.0
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	3.9	4.0	2.9	1.9
<b>9</b>	a <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	4.4	2.9	2.5	2.4
	b <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.0	1.8	0.4	1.0
	g <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.7	1.6	1.1	1.1
	z <sub>1-2,3-4</sub>	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	1.7	1.6	1.1	1.1

Примечание: в начале столбца «суммарная оценка показателей», цифры 1, 2, 3, 4 обозначены индексы КОГБ наименьшего порядка. / Note: at the beginning of the column "total score of indicators", the digits 1, 2, 3, 4 denote the indices of the lowest-order KGB

## Результаты и обсуждение

На основании результатов проведенных исследований составлена схема потенциального уровня геосейсмической опасности (рис. 2), которая позволяет идентифицировать активные, на современном этапе геологического развития региона, сейсмогенерирующие структуры и дать детальную картину распределения зон ВОЗ, т.е. выделить (выявить) потенциальные сейсмоопасные зоны (блоки), где высока вероятность свершения сильных землетрясений в исторической перспективе на исследуемой территории.

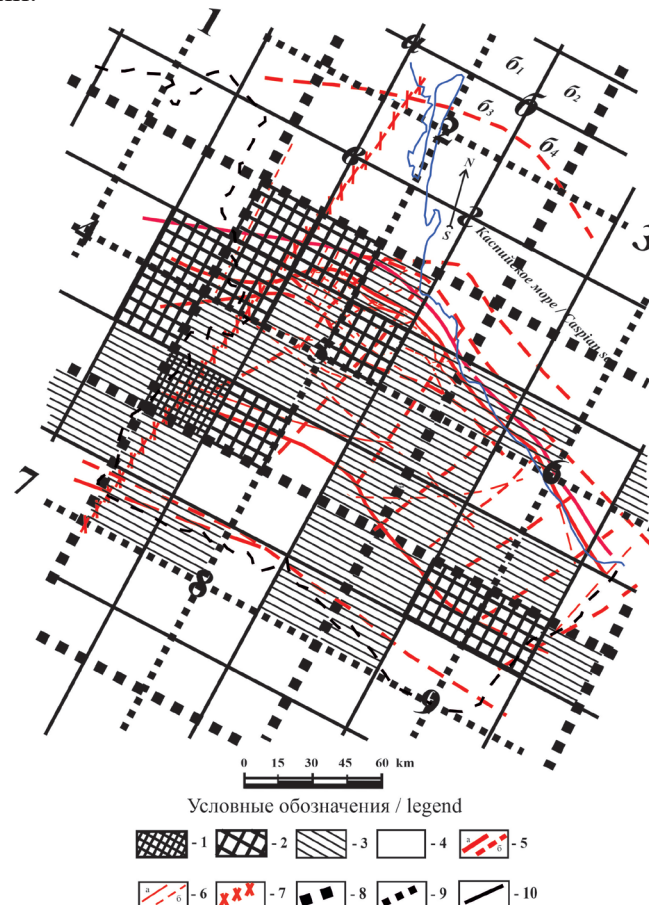


Рис. 2. Схема оценки потенциала геосейсмической опасности северо-восточного сегмента Восточного Кавказа /

Fig. 2. A scheme for assessing the potential of geoseismic hazard in the northeastern segment of the Eastern Caucasus

1 – блок, имеющий максимальное значение потенциала геосейсмической опасности;  
 2 – зоны ожидания возможных очагов сильных землетрясений в исторической перспективе;  
 3 – блоки, имеющие критический (превышающий 50 % барьер) уровень потенциала геосейсмической опасности; 4 – прочие блоки, имеющие потенциал геосейсмической опасности ниже критического; 5 – глубинные разломы (а – достоверные, б – предполагаемые); 6 – разломы осадочного чехла (а – достоверные, б – предполагаемые); 7 – Аграхано-Тбилиско-Левантийская левосдвиговая зона 1-го порядка.

Остальные обозначения приведены на рисунке 1 /

1 – a block having the maximum value of the potential of geoseismic danger; 2 – waiting zones for possible foci of strong earthquakes in the historical perspective; 3 – blocks having a critical (exceeding 50% barrier) level of potential geoseismic danger; 4 – other blocks having a potential geoseismic danger below critical; 5 – deep faults (a – reliable, b – assumed); 6 – faults of the sedimentary cover (a – reliable, b – assumed); 7 – Agrakhan-Tbilisi-Levantine left-thrust zone of the 1st order.  
 The remaining designations are shown in Figure 1



Результаты оценки показывают, что максимальное значение уровня потенциала геосейсмической опасности в условных единицах (5,1) имеет блок  $5v_3$  (рис. 2), приуроченный к зоне пересечения субкавказских глубинных разломов с одним из главных кавказских структурных элементов – Аграхано-Тбилиско-Левантийской левосдвиговой зоной 1-го порядка. К этой же зоне примыкает и диагонально ориентированный Андийско-Сулакский разлом, который отделяет Сулакский выступ от Капчугайского грабена. Помимо отмеченного блока с высоким уровнем потенциала геосейсмической опасности выделяются блоки, входящие в *современную Дагестанскую зону ВОЗ*, выделенную при оценке геодинамического и сейсмотектонического потенциалов [Магомедов и др., 2017], а также, приграничная с Чеченской республикой зона, контролируемая глубинными субкавказскими разломами. Последняя также входит в зону влияния отмеченного главного структурного элемента Кавказа. Все выделенные зоны отмечены высокой современной и исторической сейсмической активностью.

Уровень геосейсмической опасности (сейсмического потенциала) блока является величиной непостоянной, поскольку его показатели меняются в исторической и геологической перспективе.

### Выводы

В результате проведенных исследований удалось закартировать в условных единицах потенциальный уровень геосейсмической опасности (сейсмического потенциала) исследуемой территории, и приблизиться к составлению более детальной карты зон ВОЗ.

Установлено, что области с максимальными значениями потенциала геосейсмической опасности пространственно совпадают с зонами возможных очагов сильных землетрясений, имеющими историческую активность, и приурочены к зоне пересечения субкавказских глубинных разломов с главным кавказским структурным элементом – Аграхано-Тбилиско-Левантийской левосдвиговой зоной 1-го порядка.

Проведенные исследования позволят сделать обоснованный выбор объектов и методов эффективных управляющих воздействий на геологические системы с целью минимизировать негативные последствия от воздействия потенциальных катастрофических геологических процессов природного характера и обеспечат рациональное использование природных ресурсов в условиях повышенной геодинамической и сейсмической активности.

### Литература

1. Арефьев С.С., Асманов О.А., Дейнега А.Г., Мусаев М.А., Шебалин Н.В. Количественные характеристики сейсмичности Дагестана. // Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Сейсмология, геология, геофизика. М.: Наука, – 1980. С. 10–17.
2. Гаврилов Ю.О. Отражение сейсмических палеособытий в мезозойско-кайнозойских терригенных толщах Северного Кавказа. // Литология и полезные ископаемые. – 2017. – № 1. – С. 3–24.
3. Геологическая изученность СССР. Дагестанская АССР. Том 13. Период 1971-1975. Вып. I. М: Недра, – 1989. 504 с.
4. Геология и нефтегазоносность юга СССР. Дагестан. Вып. 4. Тр. КЮГЭ. Под ред. И.О. Брода. Ленинград: Гостоптехиздат, – 1959. 432 с.
5. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт. // Геология и геофизика Юга России. – 2011. – Т. 11. № 1. – С. 48–58.

6. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В., Сависько И.С. Индексы и индикаторы геоэкологической безопасности урбанизированных территорий. // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. – № 4. – С. 94–101.
7. Левкович Р.А., Магомедов А.М., Асманов О.А. К сейсмическому районированию Дагестанской АССР. // Сейсмический режим территории Дагестана. Сб. Ин-та геологии Даг. ФАН СССР. – 1977. – № 1. – С. 31–40.
8. Магомедов Р.А. Особенности связи между пространственно-временным распределением сейсмичности, уровнем геодинамического потенциала блоков земной коры и разломно-блоковой тектоникой Восточного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 69–80. DOI: 10.46698/VNC.2021.72.56.006.
9. Магомедов Р.А. Следы палеосейсмических событий в разрезах осадочного чехла Восточного Кавказа. // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. Седьмое Всероссийское совещание. 18-22 сентября 2017 г., Москва. Научные материалы / В.А. Захаров, М.А. Рогов, Е.В. Щепетова (ред.). М.: ГИН РАН, – 2017. С. 119-122.
10. Магомедов Р.А., Мусаев М.А. Оценка сейсмоструктурного потенциала блоков Восточного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 43–57. DOI: 10.46698/VNC.2021.71.60.004.
11. Милановский Е.Е., Короновский Н.В. Орогенный вулканизм и тектоника альпийского пояса Евразии. М.: Недра, – 1973. 279 с.
12. Нечаев Ю.В., Рейснер Г.И., Рогожин Е.А. и др. Геолого-геофизические и сейсмологические критерии потенциальной сейсмичности Западного Каспия. // Разведка и охрана недр. – 1998. – № 2. – С. 13–16.
13. Рейснер Г.И. и др. Типизация земной коры и сейсмический потенциал Сахалина. // Вулканология и сейсмология. – 1998. – № 4-5. – С. 103–111.
14. Рейснер Г.И., Рогожин Е.А. Прогнозирование сейсмического потенциала. // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников. Научно-практическая конференция. 26–27 июня 2001 г. Доклады и выступления. М.: Центр «Антистихия», – 2002. С. 236–241.
15. Ризниченко Ю.В. Сейсмическая активность территории СССР. М.: Наука, – 1979. 192 с.
16. Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсяченко А.Н. Оценка сейсмической опасности Северного Кавказа в детальном масштабе. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 5. – С. 14–19.
17. Рогожин Е.А., Милуков В.К., Миронов А.П., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н. Характеристики современных горизонтальных движений в зонах заметных землетрясений начала 21-го века в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с глубинным строением земной коры. // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. Т. 2. / Отв. ред. К.Е. Дегтярев. М.: ГЕОС, – 2019. С. 173–178.
18. Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами. // Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики: Избр. Науч. Тр. / Под ред. акад. В.Н. Страхова. М.: ОИФЗ РАН, – 2001. С. 279–300.
19. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.
20. Тихомиров В.В., Хаин В.Е. Подводные оползни и обвалы в третичных отложениях Северо-Восточного Азербайджана. // Докл. АН СССР. – 1947. – Т. 58. № 1. – С. 105–108.
21. Тишкин Б.М. Способ оценки геодинамического потенциала структур и использование его в геологических задачах. // Вестник КРАУНЦ, Серия «Науки о Земле». – 2006. – № 1. Вып. 7. – С. 138–152.

22. Уломов В.И. Оценка сейсмической опасности и актуализация инженерных решений. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – С. 16–21.
23. Artikaev F. F., Erteleva O. O., Tokmulina G. M. Correlation between the Points of Different Seismic Intensity Scales. // *Seismic Instruments*. – 2021. – Vol. 57(1). – pp. 75–87. DOI: 10.3103/s0747923921010035.
24. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. // *Doklady Physics*. – 2021. – Vol. 66. No. 8. – pp. 218–222. DOI: 10.1134/S1028335821080012.
25. Blinova T. Generalization of the features of the geodynamically unstable zones and their connection with the deep structure low seismic activity region. // 19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. – 2019. – Vol. 19. – pp. 813–820.
26. Mammadli T.Ya. Determination of Seismogenic Zones for Analysis of Seismotectonic Activity of Deep Faults: Seismic Hazard Assessment for the Territory of Azerbaijan. // *Geotectonics*. – 2022. – Vol. 56. No. 2. – pp. 191–199.
27. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2020. DOI: 10.1007/s10518-019-00782-2.
28. Scholz C.H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. // Cambridge University Press. Cambridge. 2019. – 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473.
29. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // *J. of Asian Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
30. Zaalishvili V.B., Rogojin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. // *The Open Construction and Building Technology Journal*. – 2011. – Vol. 5. pp. 30–40.

## References

1. Arefyev S.S., Asmanov O.A., Deinega A.G., Musaev M.A., Shebalin N.V. Quantitative characteristics of seismicity of Dagestan. Dagestan earthquake on May 14, 1970 *Seismology, geology, geophysics*. M.: Nauka, 1980. pp. 10–17.
2. Gavrilov Yu.O. Reflection of seismic paleozoic events in the Mesozoic-Cenozoic terrigenous strata of the North Caucasus. *Lithology and minerals*. 2017. No. I. pp. 3–24.
3. Geological study of the USSR. Dagestan ASSR. Vol. 13. The period 1971-1975. Issue I. Moscow. Nedra. 1989. 504 p.
4. Geology and oil and gas potential of the south of the USSR. Dagestan. Issue 4. Tr. KYUGE. Ed. by I.O. Brod. Leningrad. Gostoptehizdat. 1959. 432 p.
5. Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. Assessment of the seismic hazard of the territory and the construction of probabilistic maps. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 48–58.
6. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Buldakova E.V., Savisko I.S. Indices and indicators of geo-ecological safety of urbanized territories. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2019. No. 4. pp. 94–101.
7. Levkovich R.A., Magomedov A.M., Asmanov O.A. On seismic zoning of the Dagestan ASSR. The seismic regime of the territory of Dagestan. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan. FAN of the USSR*. 1977. No. 1. pp. 31–40.
8. Magomedov R.A. Features of the relationship between the spatial and temporal distribution of seismicity, the level of geodynamic potential of the blocks of the Earth's crust and the fault-block tectonics of the Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 69–80. DOI: 10.46698/VNC. 2021.72.56.006.
9. Magomedov R.A. Traces of paleoseismic events in sections of the sedimentary cover of the Eastern Caucasus. Jurassic system of Russia: problems of stratigraphy and paleogeography.

7th All-Russian meeting. September 18–22, 2017, Moscow. Scientific materials. V.A. Zakharov, M.A. Rogov, E.V. Shchepetova (ed.). Moscow, GIN RAS. 2017. pp. 119–122.

10. Magomedov R.A., Musaev M.A. Assessment of the seismotectonic potential of the East Caucasus blocks. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 43–57. DOI: 10.46698/VNC.2021.71.60.004.

11. Milanovsky E.E., Koronovsky N.V. Orogenic volcanism and tectonics of the Alpine belt of Eurasia. Moscow. Nedra. 1973. 279 p.

12. Nechaev Yu.V., Reisner G.I., Rogozhin E.A. et al. Geological, geophysical and seismological criteria for the potential seismicity of the Zapannoe Caspian Sea. *Exploration and protection of the subsoil*. 1998. No. 2. pp. 13–16.

13. Reisner G.I. et al. Typification of the Earth's crust and the seismic potential of Sakhalin. *Volcanology and Seismology*. 1998. No. 4-5. C. 103–111.

14. Reisner G.I., Rogozhin E.A. Forecasting of seismic potential. Problems of forecasting emergencies and their sources. Scientific and practical conference. June 26-27, 2001 Reports and speeches. Moscow. Center Antistikhia. 2002. pp. 236–241.

15. Riznichenko Yu.V. Seismic activity of the territory of the USSR. Moscow. Nauka. 1979. 192 p.

16. Rogozhin E.A., Lutikov A.I., Ovsyuchenko A.N. Assessment of the seismic hazard of the North Caucasus on a detailed scale. *Earthquake-resistant construction. Construction Safety*. 2013. No. 5. pp. 14–19.

17. Rogozhin E.A., Milyukov V.K., Mironov A.P., Gorbatikov A.V., Ovsyuchenko A.N. Characteristics of modern horizontal movements in the zones of noticeable earthquakes of the early 21st century in the central sector of the Greater Caucasus according to GPS observations and their connection with the deep structure of the Earth's crust. In: Problems of tectonics of continents and oceans. Materials of the LI Tectonic Meeting. Vol. 2. / Ed. by K.E. Degtyarev. Moscow. GEOS. 2019. pp. 173–178.

18. Rogozhin E.A., Reisner G.I., Johanson L.I. Assessment of the seismic potential of the Greater Caucasus and the Apennines by independent methods. Modern mathematical and geological models in problems of applied geophysics. Ed. V.N. Strakhov. Moscow. OIF RAS. 2001. pp. 279–300.

19. Stogniy V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: monitoring problems. *Geology and geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003.

20. Tikhomirov V.V., Khain V.E. Underwater landslides and landfalls in the tertiary sediments of Northeastern Azerbaijan. *Doklady USSR Academy of Sciences*. 1947. Vol. 58. No. 1. pp. 105–108.

21. Tishkin B.M. A method for assessing the geodynamic potential of structures and its use in geological problems. *Herald of KRAUNTS. The Earth Sciences series*. 2006. No. 1. Issue 7. pp. 138–152.

22. Ulomov V.I. Assessment of seismic hazard and updating of engineering solutions. *Earthquake-resistant construction. Earthquake engineering. Safety of structures*. 2008. pp. 16–21.

23. Aptikaev F. F., Erteleva O. O., Tokmulina G. M. Correlation between the Points of Different Seismic Intensity Scales. *Seismic Instruments*. 2021. Vol. 57. Issue 1. pp. 75–87. DOI: 10.3103/s0747923921010035.

24. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. *Doklady Physics*. 2021. Vol. 66. No. 8. pp. 218–222. DOI: 10.1134/S1028335821080012.

25. Blinova T. Generalization of the features of the geodynamically unstable zones and their connection with the deep structure low seismic activity region. 19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. 2019. Vol. 19. pp. 813–820.

26. Mammadli T.Ya. Determination of Seismogenic Zones for Analysis of Seismotectonic Activity of Deep Faults: Seismic Hazard Assessment for the Territory of Azerbaijan. ISSN 0016-8521 Geotectonics. 2022. Vol. 56. No.2. pp.191–199.

27. Masi A., Chiauuzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. Bulletin of Earthquake Engineering. 2020. DOI: 10.1007/s10518-019-00782-2.

28. Scholz C. H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge University Press, Cambridge. 2019. 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473.

29. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. J. of Asian Earth Sciences. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.

30. Zaalishvili V.B., Rogojin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. The Open Construction and Building Technology Journal. 2011. Vol. 5. pp. 30–40.



УДК 551.24

DOI: 10.46698/VNC.2024.50.37.005

Оригинальная статья

## Исследования очагов сильных исторических землетрясений методами геофизики, палео-, архео- и исторической сейсмологии: Фиагдонская котловина в Северной Осетии

А.Н. Овсюченко<sup>1, 2</sup>, Д.Е. Едемский<sup>3</sup>, С.Ю. Нечаев<sup>1</sup>, А.М. Корженков<sup>1</sup>,  
В.Б. Заалишвили<sup>2</sup>, А.С. Ларьков<sup>1</sup>, А.А. Аверин<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362002, РСО-Алания, 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, д. 4

*Статья поступила: 20.11.2023, доработана: 19.02.2024, принята к публикации: 20.02.2024*

**Резюме:** Актуальность работы определяется назревшей необходимостью разработки принципиально новой сеймотектонической 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 получении озвученных параметров для очаговой зоны в южном подножии Скалистого хребта. **Методы исследования:** георадарное профилирование, методы палео-, архео- и исторической сейсмологии, ориентированные 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.** В руинах заброшенного селения Ацоага обнаружены следы полного разрушения, имеющие четкие признаки сильных сейсмических воздействий с интенсивностью 9–10 баллов. Обнаружены первичные сеймотектонические разрывы, которые образуют закономерный праводвиговый структурный ансамбль и дважды смещали древнюю дорогу на 0.9–1.1 м (предпоследнее событие) и 0.6–0.8 м (последнее событие). До этих двух последних подвижек смещения в голоцене происходили неоднократно и привели к правому сдвигу 1-ой надпойменной террасы долины р. Фиагдон на 8–11 м. Имеющиеся данные позволяют полагать, что за последние 600–700 лет произошло два сильных землетрясения с  $M \geq 6.8$ ,  $M \geq 6.6$  и положением очага в подножии Скалистого хребта. В опубликованных источниках и материалах из центральных архивов содержатся сведения о сильном землетрясении 23 февраля 1785 г. Очаг землетрясения располагался в горах Большого Кавказа, к югу от Моздока, где были зафиксированы максимальные макросейсмические эффекты – 7–8 баллов. Предположительно, данный очаг и был изучен в осетинском селении Ацоага. Исследования в соседних котловинах Северо-юрской внутригорной впадины и привлечение более широкого круга исторических источников, вполне вероятно, уточнят параметры последнего землетрясения.

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

**Благодарности:** Научная программа выполнена по Государственному заданию ГФИ ВЦ РАН и ИФЗ РАН, в рамках плановой темы Института археологии РАН «Причерноморская и Центральноазиатская периферия античного мира и кочевнические сообщества Евразии: на перекрестке культур и цивилизаций» (№ НИОКТР 122011200269-4), георадарные исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00083.

**Для цитирования:** Овсяченко А.Н., Едемский Д.Е., Нечаев С.Ю., Корженков А.М., Заалишвили В.Б., Ларьков А.С., Аверин А.А. Исследования очагов сильных исторических землетрясений методами геофизики, палео-, архео- и исторической сейсмологии: Фиагдонская котловина в Северной Осетии. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 64–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.37.005

## GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2024.50.37.005

Original paper

## Research of sources of strong historical earthquakes using geophysical, paleo-, archeo- and historical seismology: Fiaгdon Basin in North Ossetia

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

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 Bolshaya 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

Received: 20.11.2023, revised: 19.02.2024, accepted: 20.02.2024

**Summary:** The relevance of the paper is determined by the urgent need to develop a fundamentally new seismotectonic model of the Greater Caucasus. Its content in addition to the spatial parameters and seismic potential of zones of possible earthquake sources, should include the recurrence of earthquakes with  $M_{max}$  and the kinematics of predicted displacements in the source based on direct data. **The aim of the work** is to obtain parameters for the source zone at the southern foot of the Skalisty Range. **Research methods:** georadar profiling, methods of paleo-, archeo- and historical seismology, focused on obtaining specific parameters of the sources of paleo- and historical earthquakes. These methods make it possible to approach the problem of reconstructing a long-term seismic regime based on direct data on the age and scale of occurrence of specific seismic events over a representative time interval. **Results.** In the ruins of the site Atsonaga, the effects of complete seismic destruction were found; intensity – IX-X. Primary seismotectonic ruptures were discovered, which form a regular right-lateral strike-slip structural pattern and twice displaced the ancient road by 0.9–1.1 m (the penultimate event) and 0.6–0.8 m (the last event). Before these last two events, displacements occurred repeatedly in the Holocene and led to a dextral displacement of the 1st terrace of the Fiaгdon river at 8–11 m. Available data suggest that over the past 600–700 years there have been two strong earthquakes with  $M \geq 6.8$ ,  $M \geq 6.6$  and the location of the source at the foot of the Skalisty Range. Published sources and materials from central archives contain information about a strong earthquake on February 23, 1785. The source of the earthquake was located in the Greater Caucasus Mountains, south of Mozdok, where the maximum macroseismic effects were VII-VIII were recorded. Possibly, this seismic source was studied in the Ossetian ancient village Atsonaga. Research in the neighboring basins of the North Jurassic intramountain basin and the use of a wider range of historical sources will likely clarify the parameters of the last earthquake.

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

**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 the Institute of the Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, within the framework of the planned theme of the Institute of Archeology of the Russian Academy of Sciences "The Black Sea and Central Asian periphery of the ancient world and the nomadic communities of Eurasia: at the crossroads of cultures and civilizations" (No. 122011200269-4), georadar studies were carried out at supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-12-00083.*

**For citation:** 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. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(1): 64-89. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.37.005

## Введение

Для долгосрочного сейсмического прогноза принципиально важен вопрос о повторяемости сильных землетрясений и надежности региональной сейсмотектонической модели, поскольку формирование сейсмических очагов всегда обусловлено конкретными тектоническими условиями. Определяющее значение имеет полнота каталогов землетрясений за представительный интервал времени.

Сейсмотектонические исследования для построения карты зон ВОЗ (возможных очагов землетрясений) на Большом Кавказе, включая Северную Осетию, проводятся давно. Первые такие исследования были выполнены уже в 1930-х гг. Л.А. Вardanяном [1935] в масштабе всего Кавказа. Специально для территории Северной Осетии последняя карта зон ВОЗ была составлена во второй половине 2000-х гг. [Рогожин, 2009; Заалишвили, Рогожин, 2010]. Протяженные системы линеаментов при этом идентифицировались с известными разломами, а эти разломы были квалифицированы в качестве активных на современном этапе. Сейсмический потенциал ( $M_{\max}$ ) для выделяемых зон ВОЗ оценивался по результатам внерегионального сейсмотектонического метода для Кавказа в целом [Рогожин и др., 2001].

Сейчас становится очевидным, что с тех пор были получены новые разнообразные результаты и разработаны методические подходы, которые позволяют приступить к созданию принципиально новой сейсмотектонической модели Большого Кавказа. Новизна заключается в содержании модели, которая, помимо пространственных параметров и сейсмического потенциала зон ВОЗ ( $M_{\max}$ ), должна содержать повторяемость землетрясений с  $M_{\max}$  и кинематику прогнозных смещений в очаге на основе прямых данных. Под прямыми данными об очагах сильных землетрясений понимаются параметры сейсмотектонического разрыва в очаге, основанные на полевых замерах и данные о сейсмических эффектах по всей совокупности источников информации, при конкретном датированном событии. Статья посвящена первым результатам исследований в этом направлении на примере Фиадонской котловины в Северной Осетии.

## Методы исследований

Согласно современным сейсмологическим представлениям и нормативным документам строительной отрасли, сейсмическая опасность определяется вероятностью достижения некоторого уровня сейсмических воздействий на данной территории в течение заданного периода повторяемости. В соответствии с методологией Общего сейсмического районирования Российской Федерации при оценке вероятности зем-

летрясений используются периоды повторяемости сотрясений в 500, 1000 и 5000 лет. При этом, очевидно, что период инструментальных сейсмологических наблюдений (50–100 лет) недостаточен для обеспечения каталогов землетрясений данными о сильнейших сейсмических событиях за такие огромные промежутки времени. В этих условиях на первую роль выходят методы палео-, архео- и исторической сейсмологии.

В настоящее время палеосейсмология представляет собой крупное научное направление с глубоко проработанными методическими приемами [Солоненко, 1973; McCalpin, 2009]. Использование геоморфологических методов в таких исследованиях привело к разработке весьма эффективного методического подхода – структурно-геоморфологического анализа [Флоренсов, 1978; Burbank, Anderson, 2012]. Условия возникновения сильных землетрясений нашли количественное выражение в виде конкретных морфологических параметров сеймотектонических разрывов – длины, величины смещений и их направленности [Wells, Coppersmith, 1994; Стром, Никонов, 1997 и др.], которые можно измерить по деформациям молодых отложений, форм рельефа и памятников археологии, а с использованием методов абсолютного датирования, археологии и исторической сейсмологии – оценить их возраст. По отношению к сейсмическому очагу такие нарушения являются первичными. Не менее важны исследования вторичных эффектов землетрясений, вызванных собственно сейсмическими сотрясениями. Все эти данные позволяют получать конкретные параметры очагов палеоземлетрясений.

Разрез молодых отложений на участках тектонических деформаций форм рельефа изучен методом георадарного профилирования, георадаром повышенной мощности «ЛОЗА-В» [Berkut et al., 2017], который применялся для решения различных задач. 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 ~ 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.

Выполненная аэрофотосъемка позволила построить цифровую модель рельефа, которая использована для определения морфологии и величин молодых тектонических деформаций в рельефе, а также построения георадарных профилей с учетом рельефа местности.

В целях датирования и параметризации сейсмических событий в последние 20–30 лет быстро и плодотворно развиваются методы археосейсмологии [Nikonov, 1988; Stiros, Jones, 1996; Korzhenkov, Mazor, 1999 и др.]. Изучаемые при этом деформации, по своей природе также разделяются на первичные (сеймотектонические) и вторичные (сейсмически наведенные). Наиболее показательны сеймотектонические деформации, изученные в последние годы и на Большом Кавказе [Гмыря и др., 2019; Овсяченко и др., 2020], при которых очаги сильных землетрясений достигают поверхности, разрывают и смещают строительные конструкции или культурные слои. Распознавание сейсмически наведенных повреждений архитектурных памятников наиболее достоверно при выявлении систематически направленных обруше-

ний, наклонов, изгибов, вращений и выдвинутых строительных элементов. Такие деформации, характерные для стен определенных простираний, представляют собой кинематические индикаторы для определения положения относительно очага землетрясения.

Методы исторической сейсмологии дают независимые данные о распределении и интенсивности эффектов землетрясений, часто с точной датировкой сейсмических событий [Татевосян, 2013 и др.]. Они направлены на получение и параметризацию исторических сведений об эффектах землетрясений из периодических изданий, архивов, рапортов, дневников, летописей, описаний путешествий, научных трактатов и т.д.

Эти методы позволяют подойти к проблемам реконструкции долговременного сейсмического режима и разработки сеймотектонической модели на основе прямых данных о возрасте и масштабах проявления конкретных сейсмических событий за представительный интервал времени.

### Результаты исследований

Фиагдонская котловина расположена в пределах субширотной цепочки других подобных котловин, объединяющихся в протяженную внутригорную впадину, получившую среди геологов название Северо-юрская депрессия. Эта впадина имеет ярко выраженную северную границу с моноклиалью Северного крыла, представленную грандиозным обрывом Скалистого хребта, в котором обнажены позднеюрско-меловые массивные известняки и доломиты. Вдоль подножия обрыва сплошной полосой протягивается мощный шлейф коллювиально-пролювиально-оползневых накоплений, повсеместно скрывающих зону разлома Скалистого хребта. По разлому карбонатные толщи Скалистого хребта взброшены или надвинуты с амплитудой до 6.5 км на песчано-глинистые толщи средней – нижней юры, а кое-где – магматогенно-метаморфические образования кристаллического фундамента [Ольховский, Тибилов, 1998].

Характер голоценовых тектонических деформаций отражает положение позднеплейстоценовых ледниковых образований. По долинам рек Фиагдон, Гизельдон и Геналдон у подножия Скалистого хребта позднеплейстоценовые морены слагают днища трогов и погребены толщами аллювиальных осадков мощностью в десятки – сотни метров, что свидетельствует об относительном опускании впадины в голоцене [Письменный и др., 2006]. В осевой части впадины трассируется зона регионального Пуйского разлома, представленного на территории Северной Осетии несколькими сегментами (Нузальский, Дзуарикауский, Даллагкау-Даргавский и др.).

Северо-юрская депрессия представляет собой обращенную морфоструктуру. Тектоническое строение депрессии подчеркивается системой грабенов, изученных в долинах рек Ардон и Фиагдон [Шевченко, 1985], наложенных на серию крупных антиклинальных складок в юрских отложениях [Ольховский, Тибилов, 1998]. Грабены секут раннеальпийские складки в юрских отложениях и имеют форму сходящихся вниз клиньев шириной в несколько километров, что, вероятнее всего, обусловлено сдвиговым полем деформаций.

Молодые сейсмогенные нарушения ранее были выявлены по материалам аэрофотосъемки и аэровизуальных наблюдений в долине р. Ардон, под названием Садоно-Унальской системы сейсморазрывов субширотной ориентировки, увязанной с Нузальским (Пуйским) разломом [Никитин и др., 1993]. Позже система сеймотектонических разрывов детально изучалась в основном в Кармадонской котловине



[Рогожин и др., 2014]. Она представлена системой открытых трещин растяжения, выраженных в рельефе линейными ложбинами, и сопряженных с ними структур сжатия – валов сжатия. Система разрывов укладывается в правосдвиговый структурный ансамбль. Кроме первичных нарушений, в качестве вторичных сейсмогенных образований были квалифицированы обвалы, оползни, каменные лавины и образуемые ими подпрудные озера в долинах рек.

#### Арчео- и палеосейсмологические исследования

Следы сильных сейсмических повреждений в Фиагдонской котловине были исследованы в с. Дзивгис [Корженков и др., 2023], Даллагкау, Цымыти (Чшиев и др., в печати; Корженков и др., в печати), Гули и Ацонага (рис. 1).

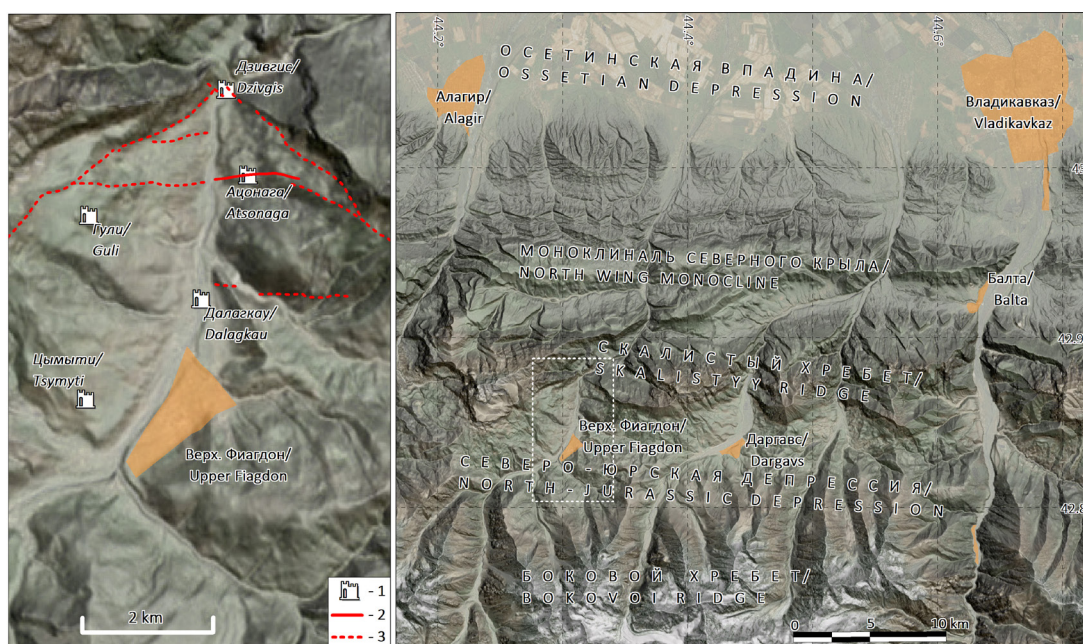


Рис. 1. Основные морфоструктуры и положение изученного района (выделен квадратом).  
1 – изученные древние поселения со следами землетрясений; 2 – сеймотектонические разрывы, изученные в молодых отложениях, формах рельефа и архитектурных памятниках древности;  
3 – сеймотектонические разрывы, предполагаемые по структурно-геоморфологическим дистанционным данным /

Fig. 1. The main morphostructures and position of the studied area (square).  
1 – studied ancient settlements with traces of earthquakes; 2 – seismic ruptures studied in young sediments, landforms and architectural monuments of ancientry;  
3 – seismic ruptures inferred from structural-geomorphological remote sensing data

В руинах заброшенного селения Ацонага наблюдаются следы полного разрушения. Разрушенными оказались очень прочные строения из разноразмерных известняковых блоков на известковом цементе, имеющие сейсмические пояса и другие антисейсмические конструктивные особенности. Блоки грубо отесаны, но тщательно подогнаны друг к другу. Исследовавший в 1977 г. памятники историко-архитектурного наследия этого района В.Х. Тменов [1984, с. 105], в центре заброшенного и разрушенного к тому времени селения, замерил и описал руины боевой башни и ганаха (дома-крепости) Хадарцевых. Южная часть башни полностью обрушена. В 7 м к западу от башни расположен ганах Хадарцевых, сохранившийся на высоту двух ярусов. Ганах доминирует над центральным комплексом жилых и хозяйственных сооружений, огражденных внешней стеной, сохранившейся на высоту до 2.5 м. К



востоку от башни расположено несколько домов с хозяйственными сооружениями, огороженными внешними стенами.

Северная и южная стены ганаха, ориентированные в субширотном направлении ( $275\text{--}280^\circ$ ) сохранились на высоту до 6 м, тогда как стены субмеридиональной ориентировки почти полностью разрушены. Южная стена изогнута внутрь помещения, испытав выпячивание до 40 см в северном направлении. Центральная, наиболее вогнутая часть стены в результате оказалась наклонена на север под углом  $10^\circ$  (рис. 2а). Аналогичный изгиб внутрь помещения, только уже в южном направлении, испытала противоположная, северная стена ганаха (рис. 2б).



Рис. 2. Деформации стен субширотной ориентировки.

a, b – южная (a) и северная (b) стены ганаха с прилегающей с запада внешней стеной (b), т. 1, 2.  
 c – стена на западной окраине центрального комплекса сооружений, т. 3 /

Fig. 2. Deformations of sublatitudinal walls.

a, b – southern (a) and northern (b) walls of the ganakh with the external wall (b) adjacent to the west, p. 1, 2.  
 c – wall on the western outskirts of the central complex of buildings, p. 3



Расположенная к западу от ганаха внешняя стена центрального комплекса сооружений испытала изгиб наружу, в северном направлении на 40–50 см (рис. 2b). В месте максимального изгиба стена полностью разрушена – блоки вывалились на север, отлетев на расстояние до 3 м.

Еще одна субширотная стена с общим простиранием  $275^\circ$ , расположенная на западной окраине центрального комплекса сооружений, испытала S-образную (в плане) деформацию (рис. 2c). Ее западная часть выгнулась на север до 20 см, а южная – на 20 см на юг. Такую деформацию получили верхние ряды кладки, в результате чего выгнутые в разные стороны фрагменты стены оказались разорваны на 20 см и испытали наклон в разные стороны на  $10\text{--}15^\circ$ . Нижний ряд кладки остался почти прямолинейным. Восточный стык с соседней стеной в верхних рядах кладки оказался оторван от своего первоначального положения и смещен в южном направлении на 20 см. Максимальное суммарное сейсмическое воздействие в данном случае было направлено перпендикулярно простиранию стены.

Стены субмеридиональной ориентировки также получили сильные повреждения в виде наклонов с обрушением верхних рядов кладки. Выше было упомянуто почти полное разрушение субмеридиональных стен ганаха. При этом восточная стена в стыковочной части с соседней стеной получила наклон до  $8^\circ$  в вертикальной плоскости на запад (рис. 3a). Противоположная, западная стена также испытала наклон с обрушением внутрь помещения. Наклон до  $10^\circ$  на восток получили нижние ряды стен, сохранившиеся на высоту до 1.5 м на западной (рис. 3b) и юго-западной (рис. 3c) окраинах центрального комплекса. Верхние ряды обрушились в том же (восточном) направлении.

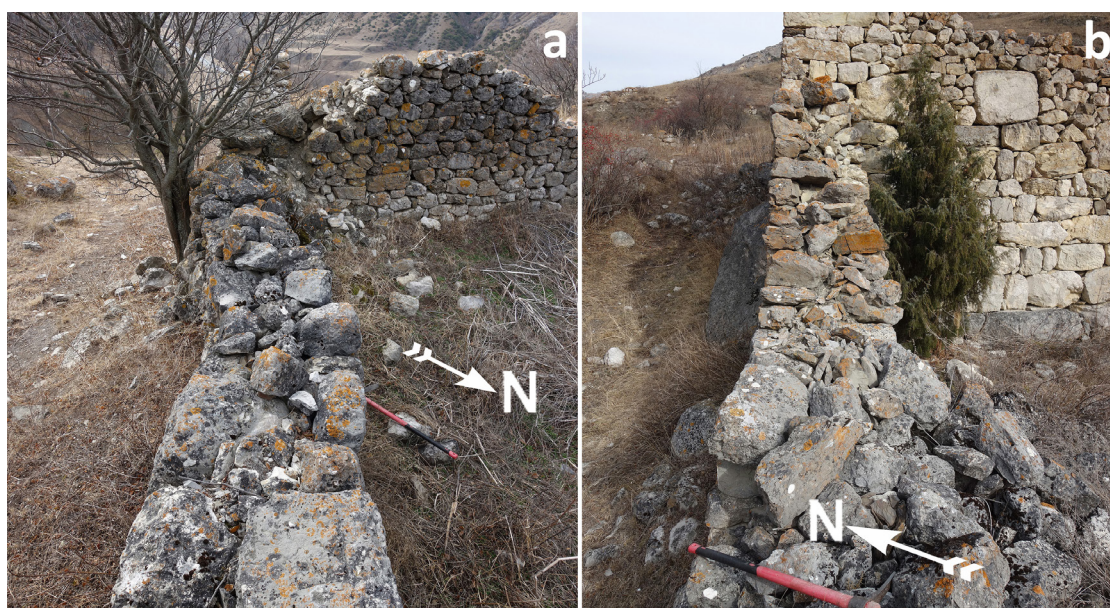






*Рис. 3. Деформации стен субмеридиональной ориентировки: а – восточная стена ганах, вид на юг, т. 4. б – стена на западной окраине центрального комплекса сооружений, вид на юг, т. 5. с – стена на юго-западной окраине центрального комплекса сооружений, вид на север, т. 6 /*  
*Fig. 3. Deformations of walls of submeridional orientation: a – eastern wall of the ganakh, view to the south, p. 4. b – wall on the western edge of the central complex of buildings, view to the south, p. 5. c – wall on the southwestern outskirts of the central complex of buildings, view to the north, p. 6*

Стены СВ ориентировки получили выпуклые (в плане) изгибы. В результате они приобрели дугообразную форму с выпячиванием на 20–40 см, ориентированным как в СЗ (рис. 4а), так и в ЮВ (рис. 4б) направлениях.



*Рис. 4. Деформации стен СВ ориентировки: а – внешняя стена дома в восточной части селения, т. 7., б – внешняя стена дома в восточной части селения, т. 8 /*  
*Fig. 4. Deformations of walls of NE orientation: a – external wall of a house in the eastern part of the village, p. 7., b – external wall of a house in the eastern part of the village, p. 8*



Стены ЗСЗ ориентировки повреждены правосдвиговыми разрывами субширотной ориентировки, получили наклон и обрушились в СВ направлении. Так, внешняя стена центрального комплекса сооружений ЗСЗ ориентировки ( $295\text{--}300^\circ$ ), сохранившаяся на высоту до 1, испытала общий наклон на  $6\text{--}7^\circ$  с обрушением в СВ направлении. В двух местах она оказалась разорвана на всю видимую высоту (рис. 5b). Разрывы имеют субширотное простирание и правосдвиговую кинематику смещений на 10–20 см. Южный фас стены на этих участках обрушился. Аналогичные деформации наблюдаются в 30 м к СВ от башни, в стене ЗСЗ ориентировки ( $305\text{--}310^\circ$ ) (рис. 5a).



Рис. 5. Деформации стен ЗСЗ ориентировки.  
 а – внешняя стена дома в СВ части селения, т. 9. Штриховыми линиями показаны смещенные фасы стен в бортах правосдвиговых разрывов,  
 б – внешняя стена центрального комплекса сооружений, т. 4 /

Fig. 5. Deformations of walls of WNW orientation.  
 а – the outer wall of the house in the north-eastern part of the village, p. 9.  
 The dashed lines show the displaced faces of the walls on the sides of right-shear faults,  
 б – the outer wall of the central complex of structures, p. 4

Руины селения имеют систематические деформации, характерные для стен определенной ориентировки – наклоны с направленными обрушениями, S-образные и выпуклые изгибы, а также сдвиговые разрывы на всю высоту стен. Трудно себе представить, что стены так были построены изначально. Четкий набор признаков показывает, что они деформировались в результате сильного землетрясения с интенсивностью 9–10 баллов.

По отношению к очагу почти все эти деформации, возможно за исключением правых сдвигов в стенах ЗСЗ ориентировки, являются вторичными. Однако, здесь обнаружены и первичные деформации. Они представлены правыми сдвигами субширотного (ЗСЗ) простирания в древней дороге, которая серпантинами вела в Ацонагу. Суммарное смещение подпорных стен древней дороги в т. 10 разделяется на две стадии (рис. 6а). В результате предпоследней подвижки произошло смещение – 0.9–1.1 м. После этого стена была отремонтирована. Последняя подвижка на



0.6–0.8 м произошла в 1 м южнее. Она привела к смещению глыбы в нижней подпорной стене и межблоковому смещению со свежим, слабо задернованным уступом в верхней. После этой подвижки верхняя часть дороги пришла в негодность, была заброшена, а на ней возведена сельскохозяйственная терраса (между т. 10-11, рис. 7). Позже террасы были заброшены, и поверх них проложена современная дорога.

Смещение насыпи древней дороги в т. 11 – 0.6–0.8 м (рис. 6b). Более древняя скальная ниша здесь же смещена примерно на 1.5–2 м. Такая разница в величине смещения также может свидетельствовать о двух разновозрастных подвижках, произошедших в течение относительно короткого интервала времени. До этих двух последних подвижек смещения в голоцене происходили неоднократно. В противоположном, левом борту долины р. Фиагдон тыловой шов 1-ой надпойменной террасы смещен в горизонтальной плоскости на 8–11 м (рис. 6b).



Рис. 6. Правосдвиговое смещение древней дороги в Ацонагу в т. 10 (а) и в т. 11 (б) /  
Fig. 6. Dextral offset of the ancient road to Atsonaga at point 10 (a) and at point 11 (b)

### *Геофизические исследования*

Георадарные исследования выполнены по профилям, проложенным вкрест простирания предполагаемых линий разломов с шагом по профилю 0.2–0.5 м (рис. 7). При интерпретации георадарных данных в первую очередь внимание уделено особенностям волновой картины отраженного сигнала, а именно – конфигурации осей синфазности отраженных волн; интенсивности осей синфазности (амплитуде отражений); протяженности осей синфазности и их непрерывности. Критериями наличия тектонических разрывов и смещений на георадарном профиле являются: нарушения геометрии слоистости отложений; разрывы осей синфазности (маркирующих горизонтов) с их смещением или изменением угла наклона по линии разрыва; изменение текстуры волновой картины отражений вдоль профиля по линии разрыва. При интерпретации учтены нарушения, смещающие несколько слоев разреза, что исключает влияние на волновую картину наклонных и вертикальных литологических разностей.



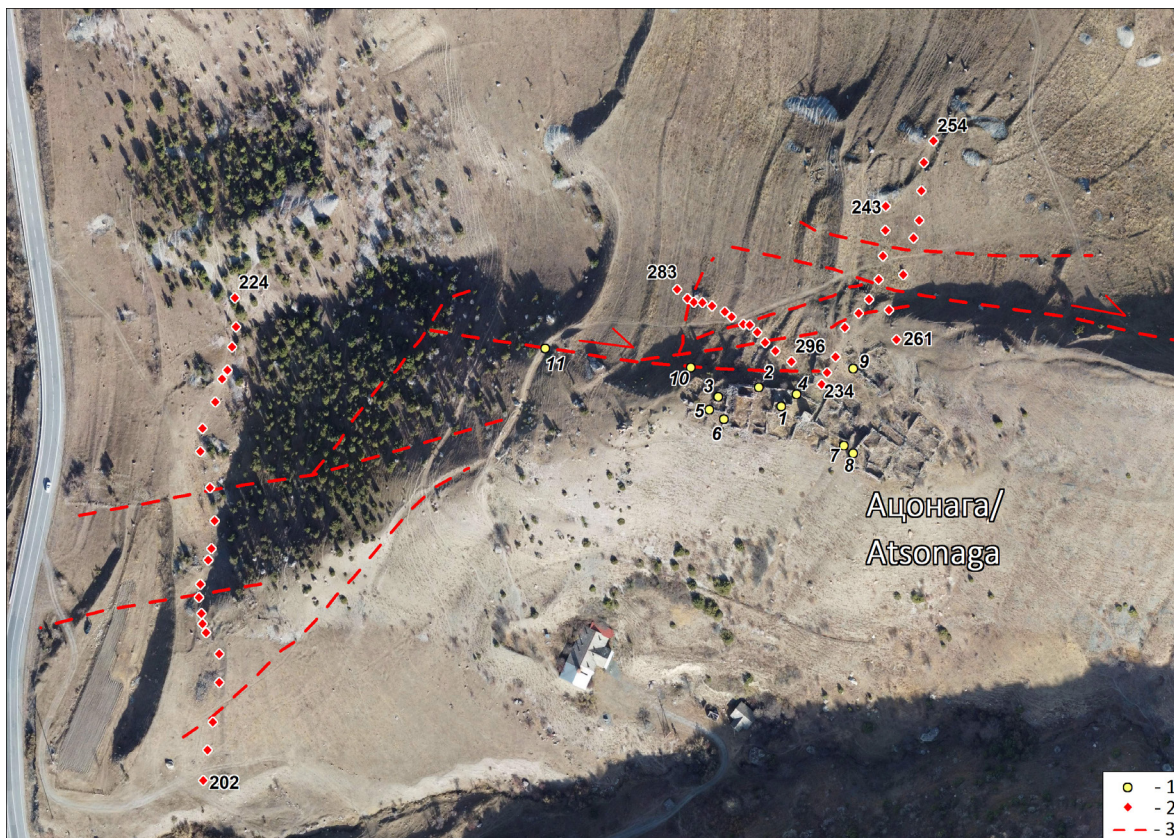


Рис. 7. Аэрофотоплан района с. Ацонага.

1 – точки, упомянутые в тексте; 2 – точки вдоль георадарных профилей;  
3 – сеймотектонические разрывы /

Fig. 7. Aerial photo plan of the Atsonaga area.

1 – points mentioned in the text;  
2 – points along georadar profiles; 3 – seismic ruptures

В строении разреза принимают участие сильно деформированные раннесреднеюрские глинистые сланцы с линзами, пластами и пачками алевролитов, реже песчаников, грубообломочные обвальные отложения, сложенные глыбами и крошкой известняков толщиной до 15 м, чехол покровных лессовидных суглинков. На полученных георадарных разрезах отложения характеризуются отсутствием многослойной субгоризонтальной структуры с радиоконтрастными границами между слоями и отсутствием маркирующих слоев, по которым можно оценивать тектонические смещения. Известняковые грубообломочные отложения и перекрывающие их суглинки – относительно мягкий материал, который в результате тектонических смещений чаще всего не формирует четко очерченных разрывов. Последние на георадарных разрезах представляют собой некую зону разрушения.

Георадарные профили 254–261 и 243–234 проложены вдоль пологого уступа на северном склоне гряды, на которой расположены развалины поселения Ацонага (рис. 8). Профили расположены параллельно друг другу и разнесены между собой не менее чем на 10 м.



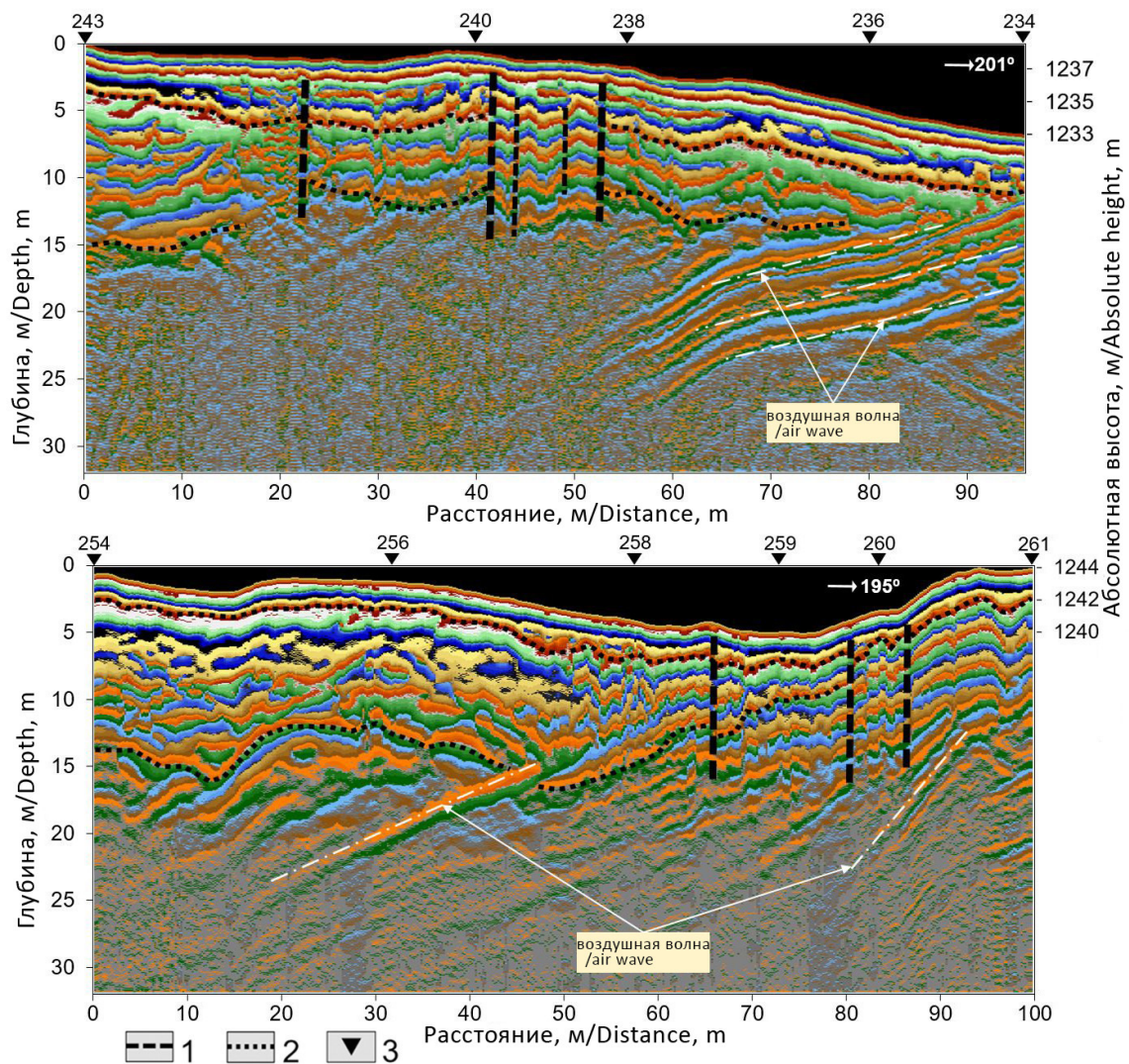


Рис. 8. Георадарные профили 254–261 и 243–234.

1 – тектонические разрывы; 2 – маркирующие горизонты; 3 – пикеты георадарных профилей /  
Fig. 8. Georadar profiles 254–261 and 243–234.

1 – tectonic faults; 2 – marking horizons; 3 – pickets of georadar profiles

Георадарный профиль 254–261 длиной 100 м пройден с шагом 0.25 м. В начале профиля на отрезке 0–50 м на радарограмме наблюдается отсутствие регулярной субгоризонтальной структуры отражений и наличие локальных неоднородностей, что может говорить о наличии чехла рыхлых отложений с примесью грубообломочного материала. На отрезке 50–100 м георадарного профиля характер отражений иной и имеет регулярную субгоризонтальную структуру отражений, нарушенную разрывами с вертикальными смещениями (65 м, 80 м, 87 м профиля). Разрывы выражены в рельефе уступами, образующими ступенчатую структуру на краю профиля (70–100 м). По всей видимости, понижение на склоне имеет тектоническое происхождение с выходом линии разлома на поверхность и формированием в верхней части структуры проседания – грабена (80–87 м), ограниченного разрывами сбросового типа.

На профиле 243–234 (отрезок 0–18 м, рис. 8) наблюдается аналогичная профилю 254–261 текстура волновых отражений с отсутствием регулярной структуры и наличием локальных неоднородностей. На отметке 20 м на глубину чехла рыхлых отложений наблюдается зона локальных нарушений маркирующих границ (осей синфазности). Характер нарушений, текстура отражений, существенно отличается от текстуры волновых отражений вдоль всего профиля. Данное локальное нарушение с изменением текстуры отражений на узком участке профиля (шириной 2–3 м), с большой долей вероятности, можно объяснить тектоническим смещением. Начиная с 20 м и до 96 м профиля наблюдается относительно регулярная субгоризонтальная структура отражений, которая на участке 40–55 м нарушена серией разрывов осей синфазности по всей толще разреза, которые мы интерпретируем как линии тектонических разрывов. Этот вывод основан на смещении и/или изменении угла наклона осей синфазности по линиям разрыва и изменении текстуры волновой формы отражений в зоне нарушений, ограниченной линиями разрывов (40 и 55 м). На отрезке 60–96 м профиля наблюдаются сильные воздушные помехи от развалин построек поселения Ацонага, что затрудняет анализ георадарного разреза на данном участке.

Георадарный профиль 296–284 проложен ниже, на террасированном склоне уступа в сторону речной долины (рис. 9). Верхняя часть георадарного профиля представляет собой чехол рыхлых склоновых отложений мощностью 5–10 м. Анализ волновой картины показал наличие серии разрывов на отметках 15 м и 30 м, падающих практически вертикально в западном направлении. Разрывы проникают в чехол молодых отложений, предположительно являются разновозрастными и образовались при разных импульсных подвижках. Максимальное смещение чехла рыхлых отложений отмечается вдоль надвига в нижней части разреза. Слои в его висячем крыле образуют антиклинальную складку – структуру принадвигового сжатия, нарушенную сбросами.

Ниже на ~ 100 м по склону относительно развалин поселения Ацонага, на надпойменной террасе вдоль реки, проложен георадарный профиль 224–202 длиной 285 м (рис. 9). В целом на георадарном профиле наблюдается относительно регулярная субгоризонтальная структура отражений, которая на отметках 100, 185 и 260 м нарушена серией разрывов, а в районе 260 м – резким изменением текстуры волновой картины отражений.

По всей видимости, данные нарушения имеют тектоническое происхождение с выходом линии разлома на поверхность. Так в районе 185 м наблюдаются нарушения с формированием в верхней части структуры проседания – грабена, ограниченного разрывами сбросового типа. У отметки 100 м линии разрыва в целом образуют структуру «цветка», характерную для присдвиговых зон растяжения. Первые 50 м профиля проложены по крутому склону, и на георадарном профиле в районе 25 м наблюдаются следы оползневой системы с формированием контрастных плоскостей скольжения.



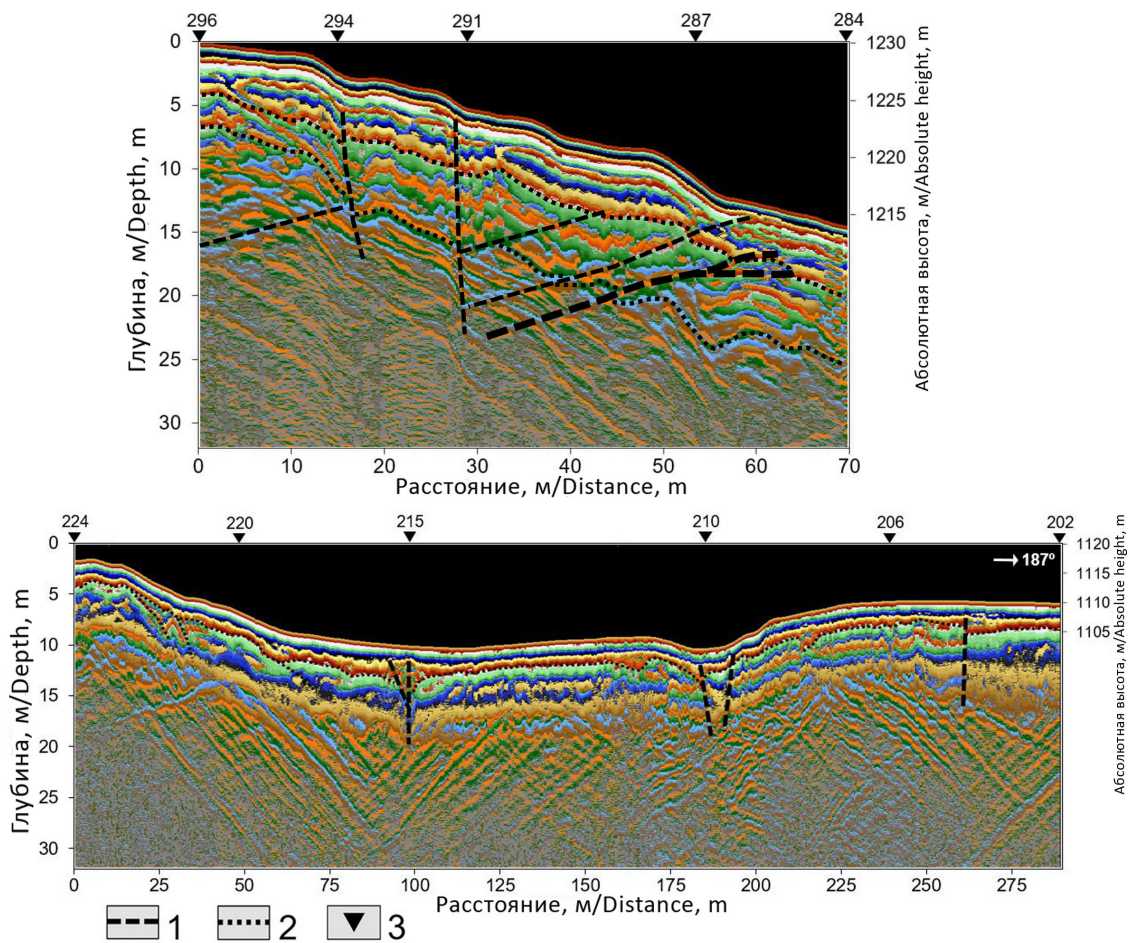


Рис. 9. Георадарные профили 296–284 и 202–224.

1 – тектонические разрывы, жирной линией показан сместитель основного надвига;

2 – маркирующие горизонты; 3 – пикеты георадарных профилей /

Fig. 9. Georadar profiles 296–284 and 202–224.

1 – tectonic faults; 2 – marking horizons; 3 – pickets of georadar profiles

В целом, собранные данные позволяют составить непротиворечивое представление о плановом структурном рисунке молодых тектонических разрывов. Они образуют эшелонированную систему сбросов и мелких грабенов в разрезе, а в плане имеют доминирующую горизонтальную компоненту – правый сдвиг. С ними сопряжены более короткие структуры сжатия. Такая структура была изучена на профиле 296–284. В целом разрывы разных типов образуют закономерный правосдвиговый структурный ансамбль кулисообразного чередования сдвиго-сбросов ЗСЗ ориентировки – структур растяжения с правым сдвигом, и поперечных по отношению к ним надвигов – структур сжатия.

#### Историко-сейсмологические исследования и археологические данные

Можно полагать, что селение Ацонага было оставлено жителями в результате полного разрушения (9–10 баллов) в очаге последнего сильного землетрясения. Когда произошло это землетрясение? Согласно базовому каталогу в Северо-юрской депрессии и окрестностях (междуречье Терек – Ардон) сильнейшим было Дарьяльское землетрясение 14.01.1915 г. ( $M = 5.4$ ,  $I_0 = 7$  баллов в долине р. Терек,



$h = 19$  км) с афтершоком 21.01.1915 г. ( $M = 5.2$ ,  $I_0 = 6$  баллов в долине р. Терек,  $h = 30$  км) [Новый..., 1977]. Помимо него имел место ряд более слабых событий: 13.03.1854 ( $M = 4.4$ ,  $I_0 =$  до 6 баллов в долине р. Ардон,  $h = 15$  км); 3.07.1902 ( $M = 4.7$ ,  $I_0 = 7$  баллов в верховьях долины р. Фиагдон,  $h = 10$  км); 18.10.1903 г. ( $M = 4.4$ ,  $I_0 = 5$  баллов,  $h = 20$  км); 6.04.1932 г. ( $M = 4.7$ ,  $I_0 = 6$  баллов в долине р. Терек,  $h = 20$  км) [Новый..., 1977]. Можно полагать, что для XX в. землетрясения параметризованы относительно надежно, а сильных сейсмических событий в Ацонаге не возникало.

Вызывает вопросы надежность определения параметров землетрясения 13.03.1854 г. В каталоге [Мушкетов, Орлов, 1893] записано: «*В том же [1854] году 1-го (13) марта, в 9 ч. 45 мин. утра, довольно сильное землетрясение в Садонском ущелье ( $42^{\circ}52'$  с.ш. и  $41^{\circ}4'$  в.д.), шедшее с NO на SW*». Ссылка дается на франкоязычный каталог А. Перрея с идентичным текстом и указанием в скобках (M. Moritz) [Perrey, 1866, p. 16]. Имеется в виду (месяе) А.Ф. Мориц – директор Тифлисской физической обсерватории, данные наблюдений которой пересылались в Петербург и помещались в ежегодниках Главной физической обсерватории, хотя таковые сведения за 1854 г. в искомом ежегоднике не обнаружены [Свод наблюдений..., 1856]. Дополнительно обследованы региональные газеты 1854 г.: «Ставропольские губернские ведомости», тифлисские «Закавказский вестник» и «Кавказ», но также безрезультатно. Вполне вероятно, что в каталоге А. Перрея допущена ошибка в датировке события, перекочевавшая в современные каталоги. Следовательно, для рассматриваемого района отсутствуют сведения о сильных сейсмических событиях и в XIX в.

Обратимся к имеющимся историко-археологическим материалам. Исследовавший в 1977 г. памятники историко-архитектурного наследия этого района В.Х. Тменов [1984, с. 105] отметил, что селение Ацонага покинуто жителями, а почти все строения разрушены. В описании котловины в районе с. Даллагкау графиней П.С. Уваровой, отмечено «...Аул Даллагкау, в Куртатии, на реке Фиагдон, расположен на нескольких холмах и низинах, связанных между собою общими воспоминаниями... Местность левее, там, где расположен дом владельца Черехова, называется Фардыгдон; поселок внизу – Ацонага; на берегу реки – поселок Даллагкау; выше, за рекой – холм Таузит с баинями, огромными колумбариями и могильником; еще дальше аул Гули; и над всею местностью – высокий, великолепный по своим размерам и цветам известковый кряж Кариу...» [Уварова, 1900, с. 60]. Селение Ацонага, наряду с селами Барзикау, Дзуарикау, Даллаг Карца, Джизи, Фардыгдон, Гусыра, Дзивгис и Гули, перечислено в составе Куртатинской общины с центром в с. Даллагкау при аналитическом рассмотрении архивных документов 1820–1860-х гг. [Бзаров, 1988]. При этом Хадарцевы, основатели Ацонаги, упоминаются в числе переселенцев на равнину в первой половине XIX в. Согласно «Описи осетинских и ингушских сел с указанием количества дворов и числа лиц, принявших от Осетинской комиссии христианство» от 1780 г. (<https://www.vostlit.info/>), в Ацонаге зафиксировано: число деревень – 3; в каждой деревне дворов – 10; в каждой деревне крещеных – 23. По «Списку населенных мест Терской области: По сведениям к 1 января 1883 г.» (<https://www.prlib.ru/>), в Ацонаге было: 9 дворов; 61 мужчина; 58 женщин.

Описания слабо совпадают с условиями изученного нами поселения. В первую очередь возникает противоречие с положением Ацонаги «внизу» относительно

с. Даллагкау в описании П.С. Уваровой. Изученные руины расположены примерно на 100 м выше Даллагкау. Не совпадает также и описание по сведениям к 1 января 1883 г. – нами изучено компактное владельческое поселение феодального типа с 3-мя тесными кварталами и 5–6-ю дворами, тогда как в описании указано 9 дворов. В описи 1780 г. фигурируют 3 деревни с 10-ю дворами в каждой. В настоящее время ниже старой Ацонаги (к югу), на выровненной бульдозером площадке, расположено два здания. По всей видимости, здесь была расположена одна из трех деревень, указанных в описи 1780 г. Можно полагать, что в конце XIX в. изученное нами верхнее поселение было уже заброшено, а фигурирующая в описаниях того времени Ацонага была расположена в другом месте, ниже старой Ацонаги. Окончательно жители Ацонаги переселились на равнину в первые годы советской власти (1920-е гг.) [Цагаева, 2010].

Для выяснения возраста старой Ацонаги можно привлечь лишь косвенные археологические сведения. Наиболее ранние археологические памятники Куртатинского ущелья датируются VI–VIII вв. [Уварова, 1900, с. 60]. Этот временной интервал был уточнен VII–VIII вв., как период формирования Куртатинской и др. общин в результате переселения аланов с равнины на фоне арабо-хазарских войн [Кузнецов, 2016]. Второй хронологический период бытования древностей ущелья наиболее широко датируется XI–XIX вв. [Кузнецов, 2014]. Масштабное строительство начинается в монгольскую эпоху (XIII–XV вв.), в связи с новым массовым притоком аланского населения, теснимого завоевателями на равнине. Период строительства боевых башен Куртатинской общины датируется XVI–XVII вв. [Тменов, 1984; Сланов, 2004].

В целом, имеющиеся археологические данные не дают материала для получения более-менее определенной даты землетрясения даже на уровне столетия. За период с VII по XVIII–XIX вв. в Дзивгисе, расположенном в 1.2 км к северу от Ацонаги, произошло не менее четырех сильных землетрясений, последнее – в XVIII–XIX вв. [Корженков и др., 2023]. Историко-археологические данные можно использовать для определения широких интервалов повторяемости землетрясений. К раннему периоду (VI–VIII вв.) относятся склепы, тогда как жилые сооружения в центре Куртатинской общины, селении Даллагкау, датируются начиная с XIV вв. [Тменов, 1984; Сланов, 2004; Кузнецов, 2014].

Рассмотрим имеющиеся каталоги землетрясений, опубликованные источники и материалы из центральных архивов. В каталоге землетрясений Северной Евразии [СКЗ ОСР-2012] имеется землетрясение 15.01.1769 г. с  $M_s=5.6$ , эпицентр которого помещен в 17–20 км к северу от Фиагдонской котловины, в зоне Владикавказского разлома. Землетрясение могло быть восстановлено только по письменным источникам, однако в каталоге ссылки на источники отсутствуют. Событие не представлено и в базовых каталогах [Новый..., 1977; Shebalin, Leydecker, 1997]. Более того, оно не обнаружено и в результате недавнего специализированного изучения газеты «Санкт-Петербургские ведомости» за 1728–1800 гг. [Никонов, 2017; Никонов, 2020], в которой публиковались сведения о значительных землетрясениях.

До второй половины XVIII в. сведения о землетрясениях Восточного и Центрального Кавказа поступали из Кизляра и казачьих станиц на Тереке. Из этого периода имеется сообщение о сильном землетрясении 1767 г., описание которого помещено в газете «Санкт-Петербургские ведомости» (1767. № 20): «Из Астрахани, от 13 февраля. В присланных от кизлярского коменданта господина генерал-

майора Потапова репортаж описывается происшедшее генваря с 20 на 21 число ночью, в 12 часу, землетрясение в Кизлярской крепости и в форшта[д]те, также при реках Каргине и Борозде в расположенных форпостах и в семейных казачьих городках. Помянутый господин генерал-майор в то время не спал, как началось сперва умеренное движение земли, от которого в покоях столы и стулья пошатывались, что продолжалось секунд с 50; потом воспоследовало колебание так, что дома тряслися, находившиеся в крепости часовые на ногах стоять не могли, а спящие жители падали с кроватей, однако оное чрез 20 секунд миновалось и больше вреда не причинило». Сообщение из газеты впервые прокомментировано в работе [Никонов, 2017]. Данная публикация предоставляет более содержательный исходный материал и показывает, что приведенная в каталоге [Мушкетов, Орлов, 1893] дата «12 февраля» является ошибочной – дважды переведенной в новый стиль датировкой события, поскольку его составители ссылаются на источники на французском языке, в которых календарный стиль уже переводился. Это землетрясение в Кизляре внесено в базовый каталог [Новый..., 1977] с ошибочной датой «12 февраля» вместо 31.01.1767 г. (по новому стилю, учитывая местное время), а сила главного толчка оценена в 7 ( $\pm 1$ ) баллов. А.А. Никонов [2017] на основе первичных данных повысил значение интенсивности до 7–8 ( $\pm 0.5$ ) баллов.

Спустя десятилетие следующие землетрясения были зарегистрированы по сообщениям из станиц гребенских казаков – современных сельских поселений Шелковского района Чеченской Республики. Их описание также помещено в газете «Санкт-Петербургские ведомости» (1778. № 7): «В Санкт-Петербурге, генваря 23-го дня. От астраханского господина губернатора и кавалера Ивана Варфоломеевича Якобия получено здесь известие, что в Кизлярском краю Гребенского войска было землетрясение, а именно: в Новогладковской и Старогладковской станицах, расстоянием в 10-ти верстах, минувшего ноября 30, а в Черленской [Червленной] станице и на Лютенской заставе – декабря 1 дня [1777 г.]. Оно начиналось в 4-м часу пополуночи сперва тихим колебанием, потом три раза весьма сильно действовало и продолжалось близ четверти часа; однако нигде, никому и никакого вреда не причинило». Сообщение впервые прокомментировано в работе [Никонов, 2017], в которой интенсивность землетрясений оценена в 4–5 ( $\pm 0.5$ ) баллов и отмечено, что события 11.12 и 12.12.1777 г. (по новому стилю) отсутствуют во всех сейсмических каталогах.

В 1763 г. начинается возведение крепости Моздок, из которой стали поступать сведения в центральные учреждения. Одно из таких описаний помещено в газете «Санкт-Петербургские ведомости» (1785. № 27): «В Санкт-Петербурге, апреля 4-го дня. В письмах из Астрахани уведомляют, что сего 1785 года февраля 12 дня было в Моздоке землетрясение, которое происходило таким образом: Оно началось пополуночи в 22-й минуте второго часа от южной стороны, то есть от Кавказских гор, из-за реки Терека, с подземным стуком, наподобие грому, в великой отдаленности происходящего; трясение было сильное в целом Моздоке и в окружности оно и продолжалось минуты с две. Другой удар слышен был в третьем часу в 22 же минуты и с той же стороны, но с большим против первого гудением, наподобие подземельного вихря; причем зыбление земли первого было больше, так что стоящие у казенного выхода часовые попадали. Сей второй удар не долее продолжался, как и первый. Третий удар сделался по вечеру в осьмом часу, но слабее двух первых.

*Четвертый удар был в первом часу пополудни с 12 на 13 число и был первым двум подобен, но вреда от них никакого не воспоследовало. То ж самое и в то же время было в Кизляре: земля колебалась, в домах многие печи попадали, и река Терек от зыблемости имела на себе такие волны, какие на пространных реках бывают.* Сообщение введено в научный оборот в работе [Никонов, 2020]. В каталоге [Мушкетов, Орлов, 1893] исключительно на основе публикаций в зарубежных газетах указывается, что землетрясение отразилось также и в Астрахани, хотя в действительности оттуда были отправлены сведения в Петербург о землетрясении в Моздоке и Кизляре, как видно из публикации в «Санкт-Петербургских ведомостях». А.А. Никонов [2020], акцентируя на том, что землетрясение началось «от южной стороны, то есть от Кавказских гор» – факте, отсутствовавшем в других описаниях, указывает на расположение источника колебаний в удалении от названных пунктов, а интенсивность сотрясений 23.02.1785 г. (по новому стилю) в Моздоке и Кизляре оценивается им в  $\sim 7 (\pm 0.5)$  баллов.

Ученые публикации в академической газете «Санкт-Петербургские ведомости» предварительно обсуждались на заседаниях Конференции Академии наук. В Санкт-Петербургском филиале Архива РАН (Ф. 1. Оп. 2. 1785. Ед. хр. 3. Л. 25–25 об.) обнаружен рукописный текст, идентичный газетной публикации, и соответствующий протокол: на заседании 31 марта 1785 г. академик Н.Я. Озерецковский зачитал отрывок из письма, в котором сообщалось о землетрясении в Моздоке и Кизляре; Конференция сочла эти сведения достаточно интересными для того, чтобы они были опубликованы в газете [Протоколы..., 1900, с. 808]. Краткое извлечение из этого протокола было опубликовано в академическом журнале на французском языке [Nova Acta..., 1788, p. 29]. Эти источники, прежде всего, свидетельствуют о том, что описание землетрясения было получено от очевидца.

Благодаря формированию сотрудниками Российского государственного архива древних актов электронных описей фонда «Кавказские дела», обнаружен обстоятельный рапорт генерал-майора при Кавказском корпусе А.А. Пеутлинга кавказскому генерал-губернатору П.С. Потемкину (Ф. 23. Оп. 1. Ч. 5. Ед. хр. 13. Ч. 14. Л. 146–146 об.) об этом же землетрясении с перечислением дополнительных пунктов: «...В Науре чувствуемо было первое [землетрясение] пополудни 2-го часа в 25-й минуте, продолжающееся две же минуты, от котораго в некоторых строениях разрушились печи, и двери из своих мест принужденно вышли. Река Терек по примечанию случившихся тогда на ней людей от зыбления земли имела волны, точно таковые, как на пространных реках от случающихся жестоких бурь бывают. Второе – в половине третьяго часа слабее перваго и продолжалось одну минуту. Третье – 4-го часа в 35-й минуте. Оное и четвертое, последовавшее в начале 8-го часа, едва только чувствуемо было. В редуте Григори Полиса примечено двоекратное землетрясение: первое – пополудни в начале четвертаго часа продолжалось одну минуту, спустя четверть часа – другой раз с полминуты. В Екатеринограде, в Павловской, Марьинской, Георгиевской крепостях и поселенных слободах также двоекратное землетрясение чувствуемо было: первое – в половине третьяго часа, а другое – спустя несколько минут, но весьма слабо. По благости Божей оное нигде вреда никакого не зделало». В упомянутой Наурской станице (современное поселение одноименного района Чеченской Республики) по совокупности повреждения строений и возмущения воды в р. Терек интенсивность оценивается не менее



6–7 баллов. Остальные перечисленные пункты располагались вдоль Азово-Моздокской линии и соответствуют современным поселениям и городам Ставропольского края России (Григориполисская станица, «Марьинская» – пос. Фазанный, гг. Новопавловск и Георгиевск) и Кабардино-Балкарской Республики (Екатериноградская станица), что свидетельствует о значительной области распространения 4–5-балльных сотрясений в отдалении от эпицентра.

В сопроводительной записке к своему рапорту (Там же. Л. 143 об. – 144) А.А. Пеутлинг сообщает о чувствительном афтершоке 15.03.1785 г. (по новому стилю), наблюдавшемся в Наурской станице: *«По собранию от всех мест известии о бывшем здесь на линии 12 февраля землетрясении обстоятельного описании, ныне к вашему высокопревосходительству посылаю, при том имею честь донести, что 4-го числа сего месяца пополудни 6-го часа в 50-той минуте в Науре оно опять чувствуемо было не более как две секунды, казавшееся с полудня».*

По всей видимости, произошедшее землетрясение оказало серьезное влияние на внутривосточную нестабильность региона и, возможно, стало одной из причин начала народно-освободительного движения горцев в 1785–1791 гг., как заключил профессор Н.А. Смирнов: *«В 80-х годах XVIII в. почва для вспышки стихийного движения на Северном Кавказе была достаточно подготовлена. Напряжение еще более усилилось после землетрясения, происшедшего в начале 1785 г. Это землетрясение и послужило поводом к выступлению Ушурмы (шейха Мансура)»* [Смирнов, 1958, с. 138].

Землетрясение внесено в базовые каталоги [Новый..., 1977; Shebalin, Leydecker, 1997] с указанием двух толчков 23 февраля (в том числе на форшок, который, наоборот, должен считаться главным ударом). В этих каталогах параметры даны с большим разбросом величин и неточностью в определении координат эпицентра и балльности, чему способствовало использование вторичных источников. Теперь ясно, что исходные данные, гораздо более надежные и подробные, были опубликованы спустя месяц после события в «Санкт-Петербургских ведомостях», а полноту картины добавляют материалы из центральных архивов. Землетрясение ощущалось в Моздоке и Кизляре, Науре, а также в нескольких пунктах Ставропольского края и Кабардино-Балкарии. Самым сильным отмечен первый толчок в Моздоке в 13 ч. 22 мин. по местному времени: на интенсивность 7–8-балльных сотрясений указывает падение часовых. Интенсивность в Науре и Кизляре оценивается в 6–7 баллов (падение печей (печных труб?), волны на р. Терек). Принципиальное значение имеет сообщение о приходе колебаний *«от южной стороны, то есть от Кавказских гор»*, и подземном стуке, *«в великой отдаленности происходящем»*. Вместе с продолжительностью гула, проявлением землетрясения на большой территории, прямые указания на приход колебаний с юга указывают на расположение очага землетрясения в горах Большого Кавказа. Можно предположить, что очаг этого события и был изучен в селении Ацонага.

### Обсуждение результатов

В руинах заброшенного селения Ацонага наблюдаются следы полного разрушения. Руины имеют систематические деформации, характерные для стен определенной ориентировки – наклоны с направленными обрушениями, S-образные и выпуклые изгибы, а также сдвиговые разрывы на всю высоту стен. Четкий набор



признаков показывает, что деформации возникли в результате сильного землетрясения с интенсивностью 9–10 баллов.

Обнаружены также первичные деформации. По данным георадарного профилирования и геолого-геоморфологических наблюдений разрывы разных типов образуют закономерный правосдвиговый структурный ансамбль кулисообразного чередования сдвига-сбросов ЗСЗ ориентировки – структур растяжения с правым сдвигом, и поперечных по отношению к ним надвигов – структур сжатия.

Правый сдвиг сместил древнюю дорогу, которая вела в центральное владение с боевой башней и домом-крепостью (ганахом) Хадарцевых. В результате последней подвижки произошло смещение на 0.9–1.1 м (один замер). После этого подпорная стена дороги была отремонтирована, т.е. жизнь в центральном владении и поселении продолжилась. Последняя подвижка сместила дорогу на 0.6–0.8 м (по двум замерам). В результате, верхняя часть дороги была заброшена, а на ней возведена сельскохозяйственная терраса. Позже и террасы были заброшены, а поверх них проложена современная дорога на сенокос. По всей видимости, причиной оставления старой Ацонаги стало также исчезновение источника воды, что могло быть связано с подвижкой по разлому, в зоне которого расположены многочисленные современные источники на горных склонах. Разновозрастные подвижки произошли в течение относительно короткого интервала времени. До этих двух последних подвижек смещения в голоцене происходили неоднократно и привели к правому сдвигу 1-ой надпойменной террасы долины р. Фиэгдон на 8–11 м.

По археосейсмологическим данным последнее сильное землетрясение произошло в XVIII–XIX вв. и привело к разрушениям построек в селении Дзивгис, расположенном в 1.2 км к северу от Ацонаги [Корженков и др., 2023]. Предыдущее землетрясение в Ацонаге произошло на последнем этапе бытования, начало которого по археологическим данным датируется XIV в. В Дзивгисе периодом XI–XV вв. датировано два сильных землетрясения с интенсивностью 8 и 9 баллов. Не исключено, что это было одно событие, очаг которого изучен в Ацонаге.

В опубликованных источниках и материалах из центральных архивов содержатся сведения о сильном землетрясении 23 февраля 1785 г., с тремя последовавшими толчками в течение полсуток и гораздо более поздним чувствительным афтершоком. Осуществленный поиск исторических документов и их комплексное рассмотрение позволило определить интенсивность проявления этого землетрясения, по крайней мере, в восьми населенных пунктах. Очаг землетрясения располагался в горах Большого Кавказа, к югу от Моздока, где были зафиксированы максимальные макросейсмические эффекты – 7–8 баллов. Предположительно, данный очаг и был изучен в осетинском селении Ацонага.

По всей видимости, произошедшее землетрясение оказало серьезное влияние на внутривулканическую нестабильность региона и, возможно, стало одной из причин начала народно-освободительного движения горцев в 1785–1791 гг. под руководством Ушурмы (шейха Мансура).

С использованием уравнения и коэффициентов для сейсмотектонической подвижки сдвиговой кинематики [Wells, Coppersmith, 1994] получены оценки магнитуды двух последних землетрясений –  $M=6.8-7.1$  (предпоследнее) и  $M=6.6-6.9$  (последнее). В этих оценках не учитывается вертикальная компонента подвижки, что характеризует полученные цифры как минимальные величины полученного интер-

вала магнитуд. Исследования в соседних котловинах Северо-юрской внутригорной впадины и привлечение более широкого круга исторических источников, вполне вероятно, уточнят параметры последнего землетрясения.

### Выводы

Имеющиеся данные позволяют полагать, что в Фиагдонской котловине за последние 600–700 лет произошло два сильных землетрясения с минимальными значениями  $M \geq 6.8$ ,  $M \geq 6.6$  и положением очага в подножии Скалистого хребта. При этих событиях подвижка в очаге субширотной ориентировки имела праводвиговую кинематику смещений. Последнее сильное землетрясение с интенсивностью в эпицентральной зоне 9–10 баллов, вероятнее всего, датируется 23 февраля 1785 г. В ближайшем крупном населенном пункте Моздок при событии 23 февраля 1785 г. были зафиксированы сотрясения интенсивностью 7–8 баллов. Кроме Моздока, землетрясение ощущалось, по меньшей мере, в семи населенных пунктах. Получены прямые данные для разработки сеймотектонической модели Северо-юрской зоны ВОЗ, которая, помимо пространственных параметров и сейсмического потенциала, содержит повторяемость сильных землетрясений и кинематику смещений в очаге.

### Литература

1. Бзаров Р.С. Три осетинских общества в середине XIX века. Орджоникидзе: Ир. – 1988. 155 с.
2. Варданянц Л.А. Сеймотектоника Кавказа. М.: Изд-во АН СССР, 1935. 190 с.
3. Гмыря Л.Б., Корженков А.М., Овсюченко А.Н., Ларьков А.С., Рогожин Е.А. Вероятные палеосейсмические деформации на Рубасском археологическом памятнике середины VI в., Южный Дагестан. // Геофизические процессы и биосфера. – 2019. – Т. 18. № 3. – С. 91–103.
4. Заалишвили В.Б., Рогожин Е.А. Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2010. – № 56. – С. 251–262.
5. Корженков А.М., Чшиев В.Т., Ларьков А.С., Овсюченко 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.
6. Кузнецов В.А. Древности Куртатинского ущелья. Владикавказ: Проект-Пресс – 2014. 256 с.
7. Кузнецов В.А. Древности Алагирского ущелья. Владикавказ: Проект-Пресс. – 2016. 176 с.
8. Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи. СПб.: Тип. Имп. Акад. наук. – 1893. 582 с.
9. 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.
10. Никонов А.А. Сообщения о землетрясениях на территории России в газете «Санкт-Петербургские ведомости» и научные комментарии к ним. Часть первая. 1758–1783 годы. // Необычные и экстремальные явления XVIII века. Вып. 1 / Рук. проекта, сост. С.Ю. Нечаев; отв. ред. Н.В. Колпакова. – СПб.: БАН. – 2017. – С. 88–118.
11. Никонов А.А. Сообщения о землетрясениях на территории России в газете «Санкт-Петербургские ведомости» и научные комментарии к ним. Часть вторая. 1785–1795 годы. //

Необычные и экстремальные явления XVIII века. Вып. 3 / Рук. проекта, сост. С.Ю. Нечаев; отв. ред. Н.В. Колпакова. – СПб.: БАН. – 2020. – С. 130–147.

12. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. М.: Наука. – 1977. 535 с.

13. Овсяченко А.Н., Корженков А.М., Гаджиев М.С., Ларьков А.С., Рогожин Е.А. О сейсмоструктурной деформации раннесредневековой крепостной стены г. Дербент (Дагестан). // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 493. № 1. – С. 63–67.

14. Ольховский Г.П., Тиболов С.М. Составление специализированной геологической основы масштаба 1:50000 для прогнозно-металлогенической карты Горной Осетии. Владикавказ: ГПП «Севосгеологоразведка. – 1998.

15. 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.

16. Протоколы заседаний Конференции Императорской Академии наук с 1725 по 1803 года. Т. III: 1771–1785. СПб.: Тип. Имп. Акад. наук. – 1900. 976 с.

17. Рогожин Е.А. Сейсмоструктура центрального сектора Большого Кавказа как основа для сейсмического мониторинга и оценки сейсмической опасности. // Вестник Владикавказского научного центра РАН. – 2009. Т. 9. №. 4. – С. 16–22.

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

19. Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами. // Геофизика и математика XXI. Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики. М.: ОИФЗ РАН. – 2001. С. 279–299.

20. Свод наблюдений, произведенных в Главной физической обсерватории и подчиненных ей обсерваториях, по высочайшему повелению изданный Главным управлением корпуса горных инженеров за 1854 год / сост. А. Купфер. СПб. – 1856. 888 с.

21. СКЗ ОСР-2012. Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии для общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Отв. ред. В.И. Уломов. М.: 2012.

22. Сланов А.А. Памятники Куртатинского ущелья. Фортификационные системы. // Дарьял. – 2004. – № 1. – С. 220–223.

23. Смирнов Н.А. Политика России на Кавказе в XVI–XIX веках. М.: Изд-во социально-экономической литературы. – 1958. 244 с.

24. Солоненко В.П. Палеосейсмогеология. // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1973. – № 9. – С. 3–16.

25. Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношение между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений. // Физика Земли. – 1997. – № 12. – С. 55–67.

26. Татевосян Р.Э. Макросейсмические исследования. М: Наука и образование. – 2013. 383 с.

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

28. Уварова П.С. Могильники Северного Кавказа. // Материалы по археологии Кавказа. Вып. 8. М. – 1900. 476 с.

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

30. Цагаева А.Дз. Топонимия Северной Осетии. Владикавказ: Ир. – 2010. 623 с.

31. Шевченко В.И. Происхождение структур горизонтального сжатия в складчатом сооружении (на примере Большого Кавказа). М.: Наука. – 1985. 157 с.

32. 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. // 9<sup>th</sup> International

Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 28–30 June 2017. Edinburgh, United Kingdom.

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

34. Korzhenkov A.M., Mazor E. Structural reconstruction of seismic events: Ruins of ancient cities as fossil seismographs. // Science and New Technologies. – 1999. – No. 1. – pp. 62–74.

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

36. Nikonov A.A. On the methodology of archaeoseismic research into historical monuments. // Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, Preservation and Protection / Marinis P.G., Koukis G.C. (eds.). Balkema, Rotterdam. – 1988. pp. 1315–1320.

37. Nova Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae. T. III: Praecedit Historia Eiusdem Academiae ad Annum 1785. Petropoli: Typis Academiae Scientiarum. – 1788. 196 p.

38. Perrey A. Note sur les tremblements de terre en 1864, avec suppléments pour les années antérieures, de 1843 à 1863. // Mémoires couronnés et autres mémoires, publiés par l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. Vol. 18. Bruxelles. – 1866. pp. 1–98.

39. Shebalin N.V., Leydecker G. Earthquake Catalogue for the Former Soviet Union and Borders up to 1988. European Commission, Report No. EUR 17245 EN, Nuclear Science and Technology Series. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. – 1997. 135 p.

40. Stiros S., Jones R.E. (eds.) Archaeoseismology. Fitch Laboratory occasional paper 7, British School at Athens. – 1996. 268 p.

41. 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. Bzarov R.S. Three Ossetian societies in the mid-19th century. Ordzhonikidze. Ir. 1988. 155 p. (in Russ.)

2. Vardanyants L.A. Seismotectonics of the Caucasus. Moscow. USSR Academy of Sciences, 1935. 190 p. (in Russ.)

3. Gmyrya L.B., Korzhenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., Rogozhin E.A. Probable paleoseismic deformations at the Rubas archeological site, mid-6th century AD, South Dagestan. Geophysical processes and biosphere. 2019. Vol. 18. No. 3. pp. 91–103. (in Russ.)

4. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of the seismic hazard of the territory based on modern methods of detailed seismic microzonation. Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS. 2010. No. 56. pp. 251–262. (in Russ.)

5. 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.)

6. Kuznetsov V.A. Antiquities of the Kurtatinsky Gorge. Vladikavkaz. Project-Press. 2014. 256 p. (in Russ.)

7. Kuznetsov V.A. Antiquities of the Alagir Gorge. Vladikavkaz: Project-Press. 2016. 176 p. (in Russ.)

8. Mushketov I.V., Orlov A.P. Catalog of earthquakes in the Russian Empire. Saint Petersburg. Imperial Academy of Sciences. 1893. 582 p. (in Russ.)

9. 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. Doklady Earth Sciences. 1993. Vol. 330. No. 6. pp. 740–744. (in Russ.)

10. Nikonov A.A. Reports about earthquakes on the territory of Russia in the newspaper “St. Petersburg Vedomosti” and scientific comments on them. Part one. 1758–1783. Unusual and

extreme phenomena of the 18th century. Vol. 1 Hand. project, comp. S.Yu. Nechaev; resp. ed. N.V. Kolpakova. Saint Petersburg. BAN. 2017. pp. 88–118. (in Russ.)

11. Nikonov A.A. Reports about earthquakes on the territory of Russia in the newspaper “St. Petersburg Vedomosti” and scientific comments on them. Part two. 1785–1795. Unusual and extreme phenomena of the 18th century. Vol. 3 Hand. project, comp. S.Yu. Nechaev; resp. ed. N.V. Kolpakova. Saint Petersburg. BAN. 2020. pp. 130–147. (in Russ.)

12. New Catalog of Earthquake in USSR from Ancient Times trough 1975. Kondorskaya, N.V. and Shebalin, N.V., Eds., Moscow: Nauka. 1977. 535 p. (in Russ.)

13. Ovsyuchenko A.N., Korzhenkov A.M., Gadjiev M.S., Larkov A.S., Rogozhin E.A. Seismotectonic deformation of the early medieval fortress wall of Derbent (Dagestan). *Doklady Earth Sciences*. 2020. Vol. 493. No 1. pp. 63–67. (in Russ.)

14. 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. (in Russ.)

15. 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). St. Petersburg: VSEGEI. 2006. 277 p. (in Russ.)

16. Protocols of the meetings of the Conference of the Imperial Academy of Sciences from 1725 to 1803. Vol. III: 1771–1785. Saint Petersburg. Imperial Academy of Sciences. 1900. 976 p. (in Russ.)

17. Rogozhin E.A. Seismotectonics of the central sector of the Greater Caucasus as a basis for seismic monitoring and assessment of seismic hazard. *Vestnik of Vladikavkaz Scientific Centre*. 2009. Vol. 9. No. 4. pp. 16–22. (in Russ.)

18. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbaticov A.V. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS. 2014. 256 p. (in Russ.)

19. Rogozhin E.A., Reisner G.I., Ioganson L.I. Assessment of the seismic potential of the Greater Caucasus and the Apennines by independent methods. *Geophysics and Mathematics XXI. Modern mathematical and geological models in problems of applied geophysics*. Moscow. UIPE RAS. 2001. pp. 279–299. (in Russ.)

20. A set of observations made at the Main Physical Observatory and its subordinate observatories, by the highest order, published by the Main Directorate of the Corps of Mining Engineers for 1854. Compiled by A. Kupfer. Saint Petersburg. 1856. 888 p. (in Russ.)

21. SCE GSZ-2012. Specialized catalog of earthquakes in Northern Eurasia for general seismic zoning of the territory of the Russian Federation. Responsible. ed. V.I. Ulomov. Moscow. 2012. (in Russ.)

22. Slanov A.A. Monuments of the Kurtatinsky Gorge. Fortification systems. *Daryal*. 2004. No. 1. pp. 220–223. (in Russ.)

23. Smirnov N.A. Russian policy in the Caucasus in the 16th–19th centuries. M.: Publishing house of socio-economic literature. 1958. 244 p. (in Russ.)

24. Solonenko V.P. Paleoseismogeology. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth*. 1973. No. 9. pp. 3–16. (in Russ.)

25. Strom A.L., Nikonov A.A. Relationship between the parameters of seismogenic ruptures and the magnitude of earthquakes. *Physics of the Earth*. 1997. No. 12. pp. 55–67. (in Russ.)

26. Tatevosyan R.E. Macroseismic studies. Moscow. Science and Education. 2013. 383 p. (in Russ.)

27. Tmenov V.Kh. Medieval historical and architectural monuments of North Ossetia. *Ordzhonikidze. Ir*. 1984. 344 p. (in Russ.)

28. Uvarova P.S. Burial grounds of the North Caucasus. Materials on the archeology of the Caucasus. Vol. 8. Moscow. 1900. 476 p. (in Russ.)

29. Florensov N.A. Essays on structural geomorphology. Moscow. Nauka. 1978. 283 p. (in Russ.)



30. Tsagaeva A.Dz. Toponymy of North Ossetia. Vladikavkaz: Ir. 2010. 623 p. (in Russ.)
31. Shevchenko V.I. Origin of horizontal compression structures in folded structures (on the example of the Greater Caucasus). Moscow. Nauka. 1985. 157 p. (in Russ.)
32. 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. 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 28–30 June 2017. Edinburgh, United Kingdom.
33. Burbank D.W., Anderson R.S. Tectonic geomorphology (2nd edition). Chichester, Wiley Blackwell. 2012. 454 p.
34. Korzhenkov A.M., Mazor E. Structural reconstruction of seismic events: Ruins of ancient cities as fossil seismographs. *Science and New Technologies*. 1999. No. 1. pp. 62–74.
35. McCalpin J.P. (ed.) *Paleoseismology*. Elsevier, 2nd edition, 2009. 613 p.
36. Nikonov A.A. On the methodology of archaeoseismic research into historical monuments. *Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, Preservation and Protection* / Marinos P.G., Koukis G.C. (eds.). Balkema. Rotterdam. 1988. pp. 1315–1320.
37. *Nova Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*. T. III: Praecedit Historia Eiusdem Academiae ad Annum 1785. Petropoli: Typis Academiae Scientiarum. 1788. 196 p.
38. Perrey A. Note sur les tremblements de terre en 1864, avec suppléments pour les années antérieures, de 1843 à 1863. *Mémoires couronnés et autres mémoires, publiés par l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique*. Vol. 18. Bruxelles. 1866. pp. 1–98.
39. Shebalin N.V., Leydecker G. Earthquake Catalogue for the Former Soviet Union and Borders up to 1988. European Commission, Report No. EUR 17245 EN, Nuclear Science and Technology Series. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 1997. 135 p.
40. Stiros S., Jones R.E. (eds.) *Archaeoseismology*. Fitch Laboratory occasional paper 7, British School at Athens. 1996. 268 p.
41. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84. No. 4. pp. 974–1002.

DOI: 10.46698/VNC.2024.47.37.006

Original paper

# Geo-electric assessment of groundwater potentials and vulnerability to contaminants for sustainable water management at Utue-Ogume, Delta State, Nigeria

D.A. Ogwu <sup>1</sup>, O.C. Molua <sup>1</sup>, T.C. Irunkwor <sup>2</sup>, J.O. Ataman <sup>3</sup>, M. Edobor <sup>1</sup>,  
A.O. Ukpene <sup>4</sup>, A.O. Egheneji <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, University of Delta, Agbor, Delta State, Nigeria;

<sup>2</sup> Department of Environmental Management and Toxicology, University of Delta, Agbor, Delta State, Nigeria;

<sup>3</sup> Physics department, Ambrose Alli University, Ekpoma-Edo State Nigeria;

<sup>4</sup> Biological Sciences department, University of Delta, Agbor, Delta State, Nigeria,  
e-mail: collins.molua@unidel.edu.ng

Received: 15.09.2023, revised: 25.02.2024, accepted: 28.02.2024

**Abstract: Relevance.** The study focuses on assessing groundwater potentials and the effectiveness of the overburden protective layer in preventing contaminant intrusion into the groundwater aquifer within a municipality in the Western Niger Delta. **Aim.** Employing Vertical Electrical Sounding (VES), 2-D resistivity imaging, and Dar-zarrouk parameters, the research aims to investigate the geoelectric characteristics of the subsurface layers, delineate the aquiferous layer, and assess the protective capacity of the overburden. **Methods.** Nine VES were conducted using the Mini-Res Resistivity Meter with the Schlumberger array. Data processing utilized IPI2win software, revealing seven to eight geoelectric layers. The aquiferous layer, situated between the fifth and sixth layers, exhibited varying resistivity (924.9 $\Omega$ m to 1629 $\Omega$ m), thickness (34.52 m to 79.20 m), and depth (55.95 m to 106.00 m). **Results.** Dar-zarrouk hydraulic parameters (hydraulic conductivity, longitudinal conductance, transverse resistance, and transmissivity) were derived from aquifer resistivity and thickness. Hydraulic conductivity ranged from 6.55 m/day to 6.80m/day, transmissivity from 228.5 m<sup>2</sup>/day to 538.6 m<sup>2</sup>/day, longitudinal conductance from 0.031 $\Omega^{-1}$  to 0.076 $\Omega^{-1}$ , and transverse resistance from 37385.1 $\Omega$ m<sup>2</sup> to 129016.8 $\Omega$ m<sup>2</sup>. Zones with contrasting parameter values were identified. **Conclusion.** The overburden protective layer was rated as having poor capacity, rendering the aquifer highly vulnerable to contaminants. Conversely, the aquifer demonstrated potential for providing portable water, reflecting subsurface heterogeneity and ample hydraulic pressure. A recommended hydrochemical study will further assess water portability.

**Keywords:** aquifer, Dar-zarrouk parameters, hydraulic conductivity, protective overburden capacity, transmissivity.

**For citation:** Ogwu D.A., Molua O.C., Irunkwor T.C., Ataman J.O., Edobor M., Ukpene A.O., Egheneji A.O. Geo-electric assessment of groundwater potentials and vulnerability to contaminants for sustainable water management at Utue-Ogume, Delta State, Nigeria. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 90-101. DOI: 10.46698/VNC.2024.47.37.006

УДК 556.3:550.837

DOI: 10.46698/VNC.2024.47.37.006

Оригинальная статья

## Геоэлектрическая оценка потенциала подземных вод и уязвимости к загрязнителям для устойчивого управления водными ресурсами в Утуэ-Огуме, штат Дельта, Нигерия

Д.А. Огву<sup>1</sup>, О.С. Моlua<sup>1</sup>, Т.С. Ирунквор<sup>2</sup>, Дж.О. Атаман<sup>3</sup>,  
М. Эдобор<sup>1</sup>, А.О. Укпене<sup>4</sup>, А.О. Эгенеджи<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Факультет физики, Университет Дельты, Агбор, штат Дельта, Нигерия;

<sup>2</sup> Факультет экологического менеджмента и токсикологии, Университет Дельты, Агбор, штат Дельта, Нигерия;

<sup>3</sup> Физический факультет, Университет Амброза Алли, Экпома, штат Эдо, Нигерия;

<sup>4</sup> Факультет биологических наук, Университет Дельты, Агбор, штат Дельта, Нигерия,  
e-mail: collins.molua@unidel.edu.ng

Статья поступила: 15.09.2023, доработана: 25.02.2024, принята к публикации: 28.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Исследование посвящено оценке потенциала подземных вод и эффективности водоупорного слоя вскрышных пород в предотвращении проникновения загрязняющих веществ в водоносный горизонт подземных вод на территории муниципалитета в дельте Западного Нигера. **Цель.** Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), двухмерная резистивная визуализация и параметры Дар-Заррук использовались для исследования потенциала грунтовых вод и прочности пород водоупорного слоя. **Методы.** Девять профилей ВЭЗ были исследованы с использованием измерителя сопротивления Mini-Res установкой Schlumberger. Данные ВЭЗ были обработаны с помощью программного обеспечения IPI2win, которое оконтурило от семи до восьми геоэлектрических слоев. Водоносный горизонт, расположенный между пятым и шестым слоями, показал вариацию сопротивления от 924,9 Ом·м до 1629 Ом·м, мощность от 34,52 до 79,20 м и глубину от 55,95 до 106,00 м. **Результаты.** Гидравлические параметры Дар-Заррука (гидравлическая проводимость, продольная проводимость, поперечное сопротивление и пропускающая способность) были получены на основе удельного сопротивления и мощности водоносного горизонта. Гидравлическая проводимость варьировалась от 6,55 м/день до 6,80 м/день, пропускающая способность – от 228,5 м<sup>2</sup>/день до 538,6 м<sup>2</sup>/день, продольная проводимость – от 0,031 Ом<sup>-1</sup> до 0,076 Ом<sup>-1</sup> и поперечное сопротивление – от 37385,1 Ом·м<sup>2</sup> до 129016,8 Ом·м<sup>2</sup>. Выявлены зоны с контрастными значениями параметров. **Заключение.** Защитные свойства водоупорного горизонта были оценены как низкие, что делает водоносный горизонт очень уязвимым для загрязнений. И наоборот, водоносный горизонт продемонстрировал потенциал для обеспечения питьевой водой, что отражает неоднородность недр и достаточное гидравлическое давление. Рекомендованное гидрохимическое исследование позволит дополнительно оценить возможность переноса веществ воды.

**Ключевые слова:** водоносный горизонт, параметры Дар-Заррук, гидравлическая проводимость, защитные свойства пород водоносного горизонта, коэффициент фильтрации.

**Для цитирования:** Огву Д.А., Моlua О.С., Ирунквор Т.С., Атаман Дж.О., Эдобор М., Укпене А.О., Эгенеджи А.О. Геоэлектрическая оценка потенциала подземных вод и уязвимости к загрязнителям для устойчивого управления водными ресурсами в Утуэ-Огуме, штат Дельта, Нигерия. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 90-101. DOI: 10.46698/VNC.2024.47.37.006

## Introduction

The United Nations' sixth agenda for Sustainable Development Goals emphasizes access to clean water and sanitation, as waterborne diseases are linked to unsafe, polluted water and poor sanitation. Around 1.1 billion people worldwide lack access to safe water, with 67% of the rural population lacking a safe water supply [Pandya, 2018]. Groundwater, a clean and portable water source, is under pressure due to regional population growth and urbanization. Around 2 billion people worldwide depend on underground water for daily consumption, and it can contribute to regional water crises if used sustainably [Owoyemi et al., 2019]. Groundwater promotes living standards, economic growth, food security, and livelihoods. However, less than 5% of the population has access to public water, and many rely on untreated water from shallow boreholes and dug wells [Ugbaja, 2021; Chinyem, Ovwamuedo, 2023; Mahdi, Khayyun, 2019]. Groundwater contamination from surface contaminants poses a significant challenge, and indiscriminate disposal of waste can harm the environment and health [Adimalla et al., 2020].

Electrical geophysical surveys are crucial for investigating potential geologic units and avoiding drilling abortive boreholes/wells. These surveys from primary electrical resistivity data estimate geo-hydraulic parameters like hydraulic conductivity, transmissivity, porosity, longitudinal conductance, and transverse resistance. The method involving vertical electrical sounding (VES) is helpful in groundwater study, determining depth to the water table, aquifer geometry, and groundwater quality [Eke, Ekpelu, 2021; Chukwudi et al., 2022]. This study uses surface electrical resistivity measurements for sustainable water management in Utue-Ogume, Delta State, Nigeria.

The Utue-Ogume community in Delta State, Nigeria, is underlain by the Benin Formation, a sedimentary rock formation deposited during the Cretaceous and Tertiary periods. The area is part of the Niger Delta Basin, a large sedimentary basin that covers parts of Nigeria, Cameroon, and Equatorial Guinea. The area's geology is characterized by sedimentary rocks deposited in marine environments, mainly sandstones, shales, and claystones. The Ndokwa area, which comprises Utue-Ogume, is underlain by modern and Holocene delta top deposits, which resulted in various physiographic landforms [Mgbolu et al., 2019]. The deposits of the Freshwater Swamps and the Sombreiro-Warri Deltaic Plain are considered recent expressions of and a continuation of the Benin Formation, which resulted from sediment-laden discharges of the River Niger. The sediment is an admixture of medium to coarse-grained sands, sandy clays, silts, and clays that settle in fluvial/tidal channels, tidal flats, and mangrove swamp environments. The Benin Formation, the youngest of three significant formations, is usually described as consisting of massive continental/fluvial sands and gravels [Anthony et al., 2019].

The hydrogeology of Utue-Ogume, located in the Ndokwa West Local Government Area of Delta State, Nigeria, is influenced by the area's geology. The sedimentary rocks are permeable, allowing for easy groundwater movement. The water table is shallow, and groundwater is recharged by rainfall and runoff from nearby hills. Groundwater flows generally towards the coast, where aquifers discharge into the Atlantic Ocean [Egbueri, Igwe, 2020; Salufu, Aigbedion, 2021]. The aquifers in the area are primarily unconfined, composed of unconsolidated sand and gravel deposits. Groundwater quality in the Niger Delta Basin is generally good, but concerns about contamination from agricultural activities and poor sanitation practices have been raised [Owoyemi et al., 2019]. Additionally, there have been reports of saltwater intrusion in some parts of the region due to excessive pumping.



Utue-Ogume is part of the physiographic province described as the Low Deltaic Plain and Freshwater Swamps, coinciding with the Upper and Lower Floodplain [Shaari et al., 2020]. The province is further subdivided into three distinct landform assemblages: the combined Ase River, River Niger floodplain, Sombreiro-Warri, and low ridged plain. Utue-Ogume is drained by four central river systems: the Adofi River to the north, the Ethiopie River and Okumeshi River (Warri River) to the northwest, and secondary tropical lowland forests due to the loss of original primary forest due to farming and timber exploitation [McLachlan et al., 2020].

In conclusion, the geology and hydrogeology of Utue-Ogume are crucial factors that influence the availability and quality of groundwater in the area. Sustainable groundwater resource management and water supply protection are essential for the community's well-being.

### Materials and methods

The electrical resistivity method involves injecting current into the subsurface via two current electrodes, AB. The potential difference created due to the passage of the electric current through the earth's materials is measured across a pair of potential electrodes, MN. The Schlumberger array was employed for the survey, and the data was acquired using the *Mini-res Resistivity Meter*, where consecutive readings are taken automatically and the results are averaged continuously. The continuously updated running average is displayed as resistance automatically.

Vertical Electrical Sounding (VES) was conducted in the NE-SW and NW-SE directions using random spot sampling of nine points. A maximum current electrode spread (AB/2) of 300m was used using the Schlumberger array due to its speed, cost-effectiveness, and sensitivity to lateral variation. A reading of resistance R of the earth material within the electrical space of the electrode configuration was obtained at each resistivity station. These values were converted into apparent resistivity ( $\rho_a$ ) by multiplying with a geometric factor (K). The resulting apparent resistivity values were used to generate sounding curves interpreted qualitatively and quantitatively. Quantitative interpretation was done using partial curve matching and computer iteration techniques using the 1-D inversion IPI2WIN software. The software uses the least-squares optimization technique to adjust the starting model until the difference between field data and model output is minimized. The software also converts apparent resistivities obtained as a function of field spacing to true resistivities as a function of depth. The resulting true resistivities represent the best average bulk resistivity for the given layer.

Knowledge of aquifer hydraulic characteristics or parameters (also known as Dar-Zarrouk Parameters) is essential to ensure excellent and proper groundwater resource management. The Dar-Zarrouk parameters are hydraulic conductivity, transmissivity, permeability, longitudinal unit conductance and transverse unit resistance. These Dar-Zarrouk parameters are used to estimate aquifer hydraulic characteristics.

Moreover, [Hasan et al., 2018] and [Sanuade et al., 2018] opined that the hydrogeological characteristics of a site that is useful in the simulation of groundwater flow and in evaluating overburden protective capacity and transmissivity of an area are the Dar-Zarrouk parameters (i.e. longitudinal conductance (SL) and transverse resistance (Tr). The Dar-zarrouk parameters are calculated from the field values of the resistivities and thicknesses of the subsurface layering units. Thus, the derived values for hydraulic

conductivities and transmissivities are used in evaluating the overburden rock's protective capacity and the aquifer's vulnerability to surface contaminants.

The longitudinal conductance of a geologic formation refers to its ability to conduct electrical current along its length. The electrical resistivity geophysical method is used to measure the electrical conductivity of these underground formations. The longitudinal conductance is also regarded as the medium's ability to retard and filter percolating fluid, which is considered the protective capacity of the aquifer overburden and is expressed as:

Longitudinal unit conductance,

$$SL = \sigma h_i \quad (1)$$

Where  $\sigma$  is the aquifer conductivity and  $h_i$  is the aquifer thickness

According to [Ahmed et al., 2020] and [Oguama et al., 2019] transverse resistance is a parameter that describes areas with high potential for groundwater exploration/exploitation such that high values of transverse resistance indicate that the area has a high potential for groundwater exploration and vice versa. The transverse resistance ( $Tr$ ) in this study was computed using this relation as expressed:

$$Tr = h \cdot \rho \quad (2)$$

Where  $h$  is the thickness of the aquifer and  $\rho$  is the aquifer resistivity.

The hydraulic conductivity ( $k$ ) is a hydrogeologic property of the medium, which refers to the ease with which a fluid can flow through the medium. It depends upon the porous medium and flowing fluid [Oborie et al., 2018]. Apart from characterizing the dynamic behaviour of the hydrogeologic units that allow the groundwater flow, the hydraulic conductivity also affects the yield of wells and contaminant spread. [Tijani et al., 2021; Idris et al., 2018] opined that in areas with few or sparse pumping test information (spatial distribution of aquifer properties), applying the surface resistivity method can provide helpful information on aquifer properties. Thus, arising from a dearth of pumping test information in the research area, the hydraulic conductivity data was estimated from empirical relationship using the exponential law function by [Tartakovsky et al., 2020] and it is given as:

$$Lnk = 0.068 \ln \rho_i + 6.02 \quad (3)$$

Where  $\rho_i$  is the aquifer resistivity,  $K$  is the hydraulic conductivity.

## Results and Discussion

The 1D resistivity survey results show an AHK lithology in the area, with seven to eight geoelectric layers delineated. The first layer is ferruginised topsoil, with resistivity ranging from 286.8 $\Omega$ m to 3236 $\Omega$ m. The layers include dried sand, sandy clay, clayey sand, dried sand/indurated, saturated sand (aquifer), clayey sand, and sandy clay. Primary aquifer parameters (resistivity and thickness) were determined from Table 1 and used to estimate Dar-zarrouk (hydraulic) parameters. The lithologic pseudo section of the aquiferous layer comprises saturated sand, with resistivity ranging from 924.9 $\Omega$ m to 1629 $\Omega$ m, similar to the reports of Enebeli et al., [2021]. This layer is less conductive. Figure 7 shows the variation of resistivity with depths, while Figure 8 shows the spatial distribution of the resistivity of the aquifer. The superposition of 1D and 2D cross-correlation along the NW-SE transverse line perfectly correlates the conductive zone, unsaturated vadose zone, and aquiferous phreatic zone with resistivity values and depth.

This study's hydraulic conductivity ( $k$ ) ranges from 6.55m/day to 6.80m/day, which is high compared to Kransny's transmissivity standard rating. The conductivity value falls

within the range of 4.6m/day to 8.8m/day, as found in previous studies on groundwater flow in Isoko South Local Government Area of Delta State and 6.8m/day in Ozoro, Nigeria, as determined by pumping test results. These results align with previous studies on aquifer hydraulic characteristics.

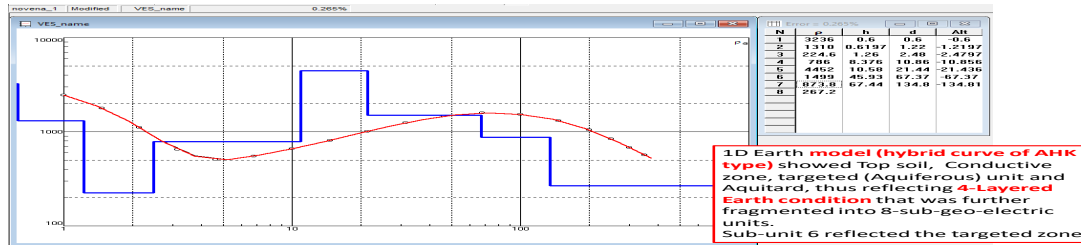


Fig. 1. VES Field Curves of the 1-D Resistivity Model

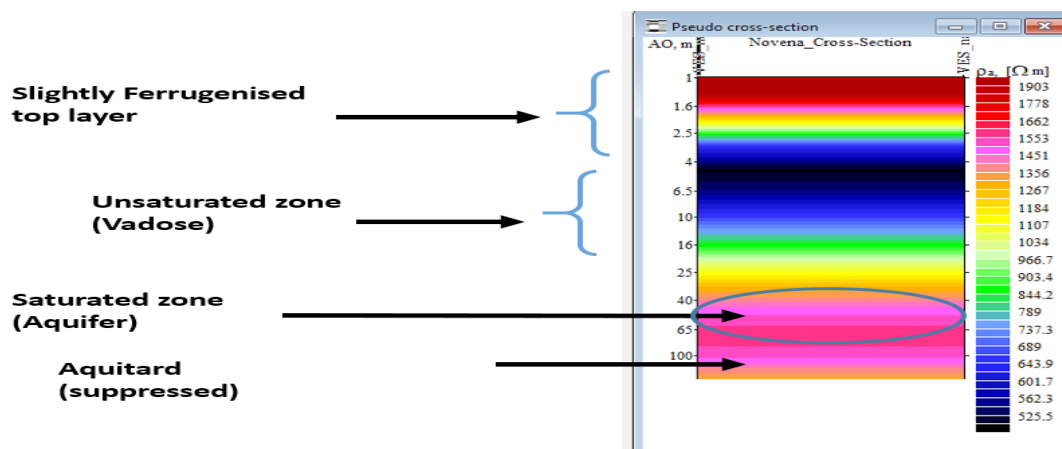


Fig. 2. VES Lithologic Pseudosection of the area showing Aquiferous Zone

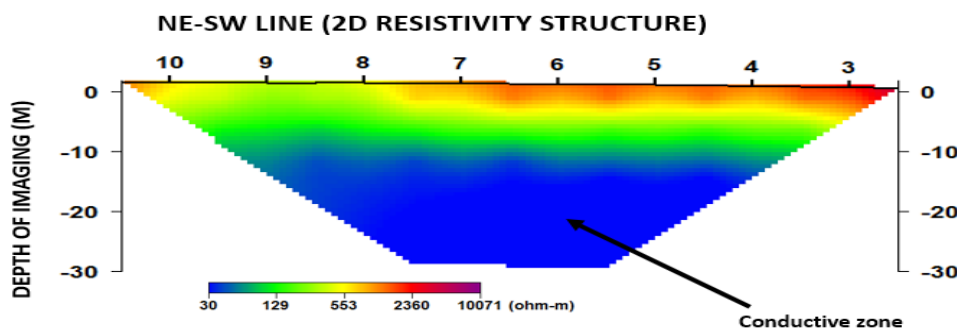


Fig. 3. 2-D Resistivity Imaging along NE-SW transverse line showing the thickness of the Conductive zone

The hydraulic conductivity (k) estimated from equation 5 ranged from 6.55m/day to 6.80m/day (table 2). The hydraulic conductivity is rated high (table 6) when compared to the transmissivity standard rating by Dewandel et al., [2017] as shown in table 5 since the transmissivity rating is between 100m-1000m<sup>2</sup>/day. The hydraulic conductivity value of this study falls within the range from 4.6m/day to 8.8m/day in the works by Assouline and Selker [2017] on the hydraulic conductivity of modeled groundwater flow in Isoko South Local Government Area of Delta State. It is also in agreement with the

hydraulic conductivity value of 6.8m/day calculated from the pumping test result in the works of Asfahani [2016] and Oguama [2020] in the determination of aquifer hydraulic characteristics from surface electrical and borehole measurements in Ozoro, Nigeria.

Table 1

### Aquifer Hydraulic Parameters in the Study Area

VES Points	Aquifer Resistivity, $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Aquifer Thickness, h (m)	Aquifer Depth, d (m)	Aquifer Conductivity, $\sigma = 1/\rho$ ( $\Omega\text{m}^{-1}$ )	Longitudinal Conductance, $S = \sigma h$ ( $\Omega^{-1}$ )	Transverse Resistance, $R = hp$ ( $\Omega\text{m}^2$ )	Hydraulic Conductivity, K (m/day)	Transmissivity, $T = Kh$ ( $\text{m}^2/\text{day}$ )
VES 1	1499	45.93	67.37	$6.67 \times 10^{-4}$	0.031	68849.1	6.77	310.9
VES 2	1276	43.25	64.69	$7.84 \times 10^{-4}$	0.034	55187.0	6.69	289.3
VES 3	1083	34.52	55.95	$9.23 \times 10^{-4}$	0.032	37385.1	6.62	228.5
VES 4	1020	41.70	63.10	$9.80 \times 10^{-4}$	0.041	42534.0	6.59	274.8
VES 5	942	64.60	86.10	$1.06 \times 10^{-3}$	0.068	60853.2	6.56	423.8
VES 6	1340	60.00	81.50	$7.46 \times 10^{-4}$	0.045	80400.0	6.71	402.6
VES 7	1629	79.20	106.00	$6.14 \times 10^{-4}$	0.048	129016.8	6.80	538.6
VES 8	1010	75.18	102.00	$9.90 \times 10^{-4}$	0.074	75931.8	6.59	495.4
VES 9	924.9	70.45	92.49	$1.08 \times 10^{-3}$	0.076	65159.2	6.55	461.4

Table 2

### Aquifer Protective Capacity and Vulnerability Ratings

Sum of Longitudinal Conductance (mho or $\Omega^{-1}$ )	Overburden Protective Capacity Rating (Oladapo, and Akintorinwa, 2007)	Vulnerability Rating (Van Stempvoort et. al, 1992; Ofomola, 2014)
>10	Excellent	Extremely low Vulnerability
5-10	Very good	Low Vulnerability
0.7-0.49	Good	Moderate Vulnerability
0.2-0.69	Moderate	High Vulnerability
0.1-0.19	Weak	Extremely High Vulnerability
<0.1	Poor	

Table 3

### Aquifer Overburden Protective Capacity to Surface Contaminants in the Study Area

VES Points	Aquifer Resistivity, $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Aquifer Thickness, h (m)	Aquifer Depth, d (m)	Longitudinal Conductance, $S = \sigma h$ ( $\Omega^{-1}$ )	Transverse Resistance, $R = hp$ ( $\Omega\text{m}^2$ )	Aquifer Protective Capacity Rating	Aquifer Vulnerability Rating
VES 1	1499	45.93	67.37	0.031	68849.1	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 2	1276	43.25	64.69	0.034	55187.0	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 3	1083	34.52	55.95	0.032	37385.1	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 4	1020	41.70	63.10	0.041	42534.0	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 5	942	64.60	86.10	0.068	60853.2	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 6	1340	60.00	81.50	0.045	80400.0	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 7	1629	79.20	106.00	0.048	129016.8	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 8	1010	75.18	102.00	0.074	75931.8	Poor	Extremely High Vulnerability
VES 9	924.9	70.45	92.49	0.076	65159.2	Poor	Extremely High Vulnerability



Table 4

**Standards for Transmissivity (Krasny, 1993)**

Transmissivity (m <sup>2</sup> /day)	Designation	Groundwater Supply Potential
1000	Very High	Withdrawal of great regional importance
100-1000	High	Withdrawal of lesser regional importance
10-100	Intermediate	Withdrawal of local water supply (Small community, plants, e.t.c)
1-10	Low	Smaller Withdrawal for local water supply (Private consumption)
0.1-1	Very Low	Withdrawal for Local water supply (Private consumption)
<0.1	Impermeable	Sources of Local water supply are difficult

Table 5

**Summary of Results of Aquifer Properties of VES Stations in the Study Area**

VES Stations	Hydraulic Conductivity, K (m/day)	Transmissivity, T = Kh (m <sup>2</sup> /day)	Transmissivity (m <sup>2</sup> /day) {Krasny, 1993}	Designation	Groundwater Supply Potential
VES 1	6.77	310.9	100-1000	High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 2	6.69	289.3		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 3	6.62	228.5		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 4	6.59	274.8		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 5	6.56	423.8		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 6	6.71	402.6		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 7	6.80	538.6		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 8	6.59	495.4		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance
VES 9	6.55	461.4		High	Withdrawal of Lesser Regional Importance

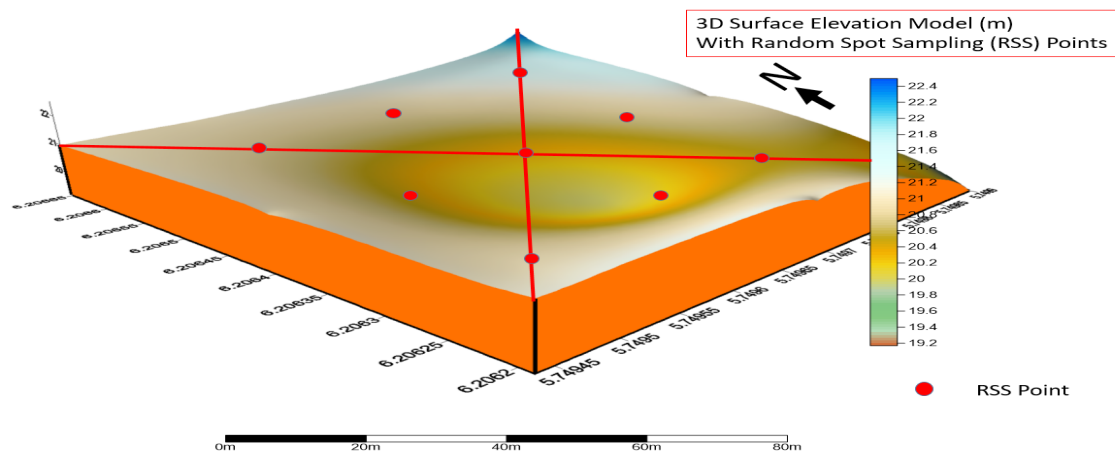


Fig. 4. 3-D surface Elevation Model with Random Spot sampling Points

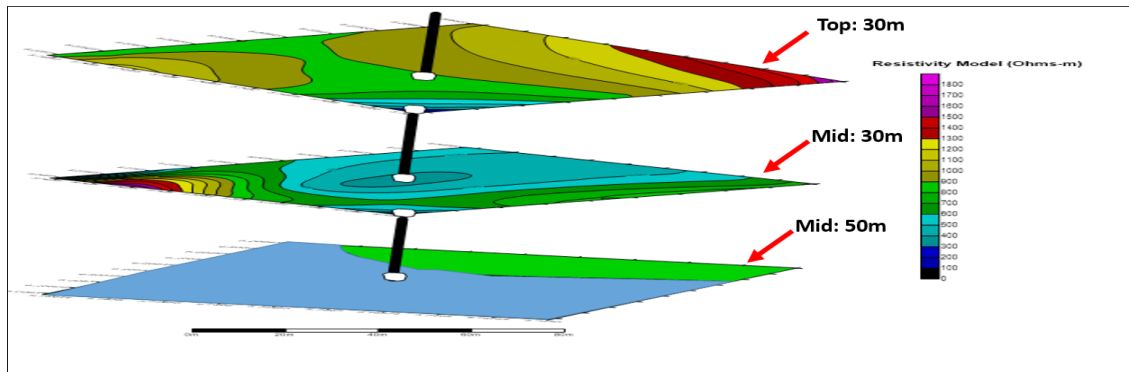


Fig. 5. Comparison between Cross Section of Random Spot Sampling and Horizontal Slice through Arithmetic Progressive Layers of Subsurface Formation in the Area

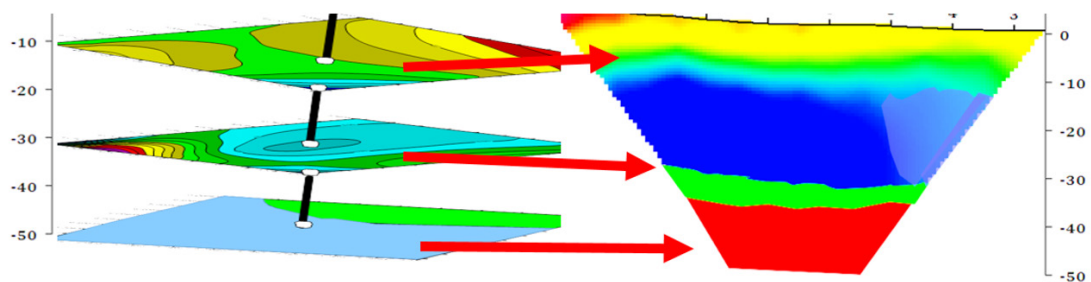


Fig. 6. Hydraulic Conductivity in the Lateral Electro-Facies from Cross Correlation of 1-D, 2-D and 3-D Earth Model

The study focuses on the hydraulic conductivity of a 3-D surface elevation model of an area, which was mapped using random spot sampling (RSS) points. The resistivity at 10m depth was observed to be erratic, indicating a near surface effect, while at 30m, the erratic effect became low with high conductivity, likely due to the effect of clay material. At 50m, a fairly uniform effect was observed, indicating profiling within the aquiferous unit.

The hydraulic conductivity of the Earth Model from Correlation of 1-D, 2-D and 3-D Surface Elevation showed consistency with the 1-D, 2-D, and 3-D dicer models within the study area. It was concluded that hydraulic conductivity becomes poorer towards the North-East section of the mapped area.

Transverse resistance is another important factor in determining areas with high potential for groundwater exploration. The values of transverse resistance ranged from  $37385.1\Omega\text{m}^2$  at VES 3 to  $129016.8\Omega\text{m}^2$  at VES 7, with the maximum at VES 7. High transverse resistance values correspond to high groundwater transmissivity, suggesting high potential yield of the groundwater in the area.

Longitudinal conductance varied from  $0.031\Omega^{-1}$  to  $0.076\Omega^{-1}$ , with low values indicating high permeability, hydraulic conductivity, and low clay volume. These low values were compared to the Standards for rating aquifer overburden protective capacity and vulnerability ratings, revealing that the aquifer's protective capacity is rated poor/ extremely high vulnerability, indicating it is unprotected from pollution and prone to contamination risk from surface contaminants.

Transmissivity values in the area ranged from  $228.5\text{m}^2/\text{day}$  to  $538.6\text{m}^2/\text{day}$ , with the maximum at VES 7. High transmissivity values indicate that the probability of good yield of groundwater is high, encouraging sinking of productive boreholes in the area. High

transmissivity values also indicate that the area is underlain by relatively thick aquifer materials, and as transmissivity is a function of thickness, it increases with thickness.

The study found that regions of high hydraulic conductivity and transmissivity, such as VES 7, VES 6, VES 1, VES 2, and VES 5, have good aquifer productive potential but poor overburden protective layer, corresponding to regions of high transmissivity values. Portable groundwater can be harnessed sufficiently within the depth range of 40m -65m, but the distal end should be given preference to ensure better transmissivity.

### Conclusion

The VES field data revealed that the subsurface lithology of the area is characterized by seven to eight geoelectric layers of topsoil, dried sand, sandy-clay, clayey sand, dried sand/indurated, saturated sand, clayey sand and sandy clay. Computer modeling software programme was used to obtain values of the subsurface resistivity, thickness and depth. The layer thickness, depth and their corresponding resistivity values were used to determine the Dar- Zarrouk parameters in order to estimate the hydraulic conductivity, longitudinal conductance, transverse resistance and transmissivity of the aquifer in the area. The results of the longitudinal conductance were used to characterize the aquifer overburden protective capacity which was rated as poor and extremely high vulnerability to contaminants. The area is characterized with high transverse resistance and high transmissivity values indicating a good groundwater yielding material that is capable of promoting adequate recharge from precipitation as well as having high groundwater supply potential to satisfy the needs of people living in the region. The VES gave the range of hydraulic conductivity from 6.55m/day to 6.80m/day and this would affect the direction and magnitude of groundwater velocity, groundwater flow as well as pollutants transport. The results of the aquifer hydraulic characteristics estimated from the Dar-zarrouk parameters revealed that the aquifer in the area contain adequate quantity of water sufficient to meet economic needs in the region and has enough hydraulic pressure to release portable water to serve the people living in the region. Thus, portable groundwater can be harnessed sufficiently within depth range of 40m to 65m but the distal end should be given preference to assure for better transmissivity. This is because a slice through the 10m, 30m and 50m geometrically showed variation in earth resistivity structure with hydraulic conductivity becoming poorer within the North-East section of the mapped area. Arising from the poor rating of the overburden protective capacity resulting to extremely high vulnerability to surface contaminants, it is recommended that a comprehensive hydrochemical study be carried out to determine the portability of the water. It is also advised that the groundwater be treated after abstraction before supply to the inhabitants in the area for consumption.

### References

1. Adimalla N., Qian H., Nandan M. Groundwater chemistry integrating the pollution index of groundwater and evaluation of potential human health risk: A case study from hard rock terrain of south India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020. Vol. 206. No. 111217. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111217.
2. Ahmed N., Saleh S., Kilian A., Sani Y. Geo-electrical investigation for groundwater potential of Kaltungo and environs, North Eastern Nigeria. *Applied Journal of Physical Science*. 2020. Vol. 2. Issue 3. pp. 55–67. 2. DOI: 2. 10.31248/AJPS2020.029.
3. Anthony E., Almar R., Besset M., Reyns J., Laibi R., Ranasinghe R., Ondoa G., Vacchi M. Response of the Bight of Benin (Gulf of Guinea, West Africa) coastline to anthropogenic

and natural forcing, Part 2: Sources and patterns of sediment supply, sediment cells, and recent shoreline change. *Continental Shelf Research*. 2019. Vol. 173. pp. 93–103. DOI: 10.1016/J.CSR.2018.12.006.

4. Asfahani J. Hydraulic parameters estimation by using an approach based on vertical electrical soundings (VES) in the semi-arid Khanasser valley region, Syria. *Journal of African Earth Sciences*. 2016. Vol. 117. pp. 196–206. DOI: 10.1016/J.JAFREARSCI.2016.01.018.

5. Assouline S., Selker J. Introduction and evaluation of a Weibull hydraulic conductivity-pressure head relationship for unsaturated soils. *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53. Issue 6. pp. 4956–4964. DOI: 10.1002/2017WR020796.

6. Chinyem F.I., Ovwamuedo G. Evaluation of Aquifer Characteristics and Groundwater Protective Capacity in Abavo, Nigeria. *Research Square*. 2023. pp. 1–16.

7. Chukwudi C., Chibuzo P., Austin C. Combined application of vertical electrical sounding and 2D electrical resistivity tomography for groundwater exploration in parts of Enugu metropolis, Southeastern Nigeria. *International Journal of Physical Sciences*. 2022. Vol. 17. No. 3. pp. 67–83. DOI: 10.5897/ijps2022.5005.

8. Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Join J., Maréchal J. Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. *Journal of Hydrology*. 2017. Vol. 550. pp. 118–129. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2017.03.075.

9. Eke P., Ekpelu G. Detection of shallow Aquifers Using Vertical Electrical Sounding in Abua Town, Rivers State, Nigeria. *Asian Journal of Basic Science & Research*. 2021. Vol. 3. Issue 2. pp. 95–101. DOI: 10.38177/ajbsr.2021.3210.

10. Egbueri J., Igwe O. The impact of hydrogeomorphological characteristics on gully processes in erosion-prone geological units in parts of southeast Nigeria. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2020. Vol. 5. Issue 3. pp. 227–240. DOI: 10.1080/24749508.2020.1711637.

11. Enebeli V., Okorafor C., Kolagbodi R. 2-D Electrical Resistivity Imaging Survey for Lithological Assessment at Igwete Primary School, Amai, South-South Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 2021. Vol. 25. No. 5. pp. 823–827. DOI: 10.4314/jasem.v25i5.21.

12. Hasan M., Shang Y., Akhter G., Jin W. Evaluation of groundwater potential in Kabirwala area, Pakistan: A case study by using geophysical, geochemical and pump data. *Geophysical Prospecting*. 2018. Vol. 66. Issue 9. pp. 1737–1750. DOI: 10.1111/1365-2478.12679.

13. Idris A.M., Ahmed A.L., Lawal K.M., Osumeje J.O., Ahmed G. Subsurface Lithology and Aquifer Delineation Using Vertical Electrical Sounding Method in Dorayi Area of Kano State, Nigeria. *Nigerian Research Journal of Chemical Sciences*. 2018. Vol. 4. pp. 17–25.

14. Krasny J. Classification of Transmissivity Magnitude and Variation. *Groundwater*. 1993. Vol. 31. pp. 230–236. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1993.tb01815.x.

15. Mahdi H.H., Khayyun T.S. Hydraulic Conductivity Estimation by Using Groundwater Modelling System Program for Upper Zone of Iraqi Aquifers. *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 584. pp. 1–11.

16. McLachlan R., Ogston A., Asp N., Fricke A., Nittrouer C., Schettini C. Morphological evolution of a macrotidal back-barrier environment: The Amazon Coast. *Sedimentology*. 2020. Vol. 67. No. 7. pp. 3492–3512. DOI: 10.1111/sed.12752.

17. Mgbolu C., Obiadi I., Obiadi C., Okolo C., Irumhe P. Integrated groundwater potentials studies, aquifer hydraulic characterisation and vulnerability investigations of parts of Ndokwa, Niger Delta Basin, Nigeria. *Solid Earth Sciences*. 2019. Vol. 4. Issue 3. pp. 102–112. DOI: 10.1016/J.SESCI.2019.06.002.

18. Oborie E., Opigo A.M., Nwankwoala H.O. Estimation of Aquifer Hydraulic Conductivity and Evaluation of Empirical Formulae Based on Grain Size Analysis and Permeability Test in Yenagoa, Bayelsa State, Nigeria. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 2018. Vol. 3. Issue 3. pp. 313–321.

19. Oguama B., Ibuot J., Obiora D., Aka M. Geophysical investigation of groundwater potential, aquifer parameters, and vulnerability: a case study of Enugu State College of Edu-



cation (Technical). *Modeling Earth Systems and Environment*. 2019. Vol. 5. pp. 1123–1133.. DOI: 10.1007/s40808-019-00595-x.

20. Oguama B.E., Ibuot J.C., Obiora D.N. Geohydraulic Study of Aquifer Characteristics in Parts of Enugu North Local Government Area of Enugu State Using Electrical Resistivity Soundings. *Applied Water Science*. 2020. Vol. 10. pp. 1–10.

21. Owoyemi F., Oteze G., Omonona O. Spatial patterns, geochemical evolution and quality of groundwater in Delta State, Niger Delta, Nigeria: implication for groundwater management. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol. 191. DOI: 10.1007/s10661-019-7788-2.

22. Pandya A. Irrigation in Support of an Evergreen Revolution. *Irrigation and Drainage*. 2018. Vol. 67. Issue 5. pp. 801–803. DOI: 10.1002/ird.2318

23. Salufu S., Aigbedion I. Re-Construction of Palaeo-Sedimentation Processes of Aquifers underlying Igueben using Geo-Electrical Resistivity Signature and Borehole Data. *Asian Journal of Geographical Research*. 2021. Vol. 4. Issue 4. pp. 46–54. DOI: 10.9734/ajgr/2021/v4i4104.

24. Sanuade O.A., Oyeyemi K.D., Amosun J.O., Fatoba J.O., Hammed O.S. Prediction of Transmissivity of Aquifer from Geoelectric Data Using Artificial Neural Network. *Earth and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 173. pp. 1–13.

25. Shaari H., Nasir Q., Pan H., Mohamed C., Yusoff A., Khalik W., Naim E., Setiawan R., Anthony E. Sedimentation and sediment geochemistry in a tropical mangrove channel meander, Sungai Kerteh, Peninsular Malaysia. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020. Vol. 7. pp. 1–11. DOI: 10.1186/s40645-020-00362-y.

26. Tartakovsky A., Marrero C., Perdikaris P., Tartakovsky G., Barajas-Solano D. Physics-Informed Deep Neural Networks for Learning Parameters and Constitutive Relationships in Sub-surface Flow Problems. *Water Resources Research*. 2020. Vol. 56. Issue 5. e2019WR026731. DOI: 10.1029/2019WR026731.

27. Tijani M., Obini N., Inim I. Estimation of aquifer hydraulic parameters and protective capacity in basement aquifer of south-western Nigeria using geophysical techniques. *Environmental Earth Sciences*. 2021. Vol. 80. No. 466. DOI: 10.1007/s12665-021-09759-4.

28. Ugbaja A.N. Evaluation of Groundwater Potential Using Aquifer Characteristics of Parts of Boki Area, South-Eastern Nigeria. *Research Square*. 2021. pp. 1–17.

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

Оригинальная статья

## Литий-цезий-танталовые пегматиты горы Ваза-Хох (Северный Кавказ)

А.И. Гусев 

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет  
им. В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Короленко, 53,  
e-mail: anzerg@mail.ru

Статья поступила: 30.08.2023, доработана: 10.02.2024, принята к публикации: 16.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** На Северном Кавказе описаны различные типы оруденения, связанные с гранитоидами. Гранитные пегматиты Ваза-Хоха не получили должного освещения в открытой печати, хотя они содержат высококонцентрированное оруденение стратегических металлов: Li, Cs, Ta, которые в минерально-сырьевой базе России относятся к остродефицитным. Следовательно, актуализация современных сведений о пегматитах указанного района не вызывает сомнений. **Целью исследования** является получение комплексной петрологической и геохимической характеристики гранитных пегматитов Ваза-Хоха и их типизация на современном уровне. **Объектом для исследований** были выбраны тела пегматитов Ваза-Хоха, выделенные в качестве потенциального редкометалльного рудного поля. **Материалы исследования.** Материалы, используемые в статье, получены автором в процессе проведения специализированных металлогенических исследований, проведенных в 1989, 2021-2022 годах на пегматитовом поле Ваза-Хох. **Методы.** Методы изучения, кроме геологического и петрографического описания пегматитов, включали получение количественных характеристик состава пород. Силикатный анализ пород на главные компоненты определён рентгено-спектральным флуоресцентным методом, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – ISP-AES, остальные элементы, в том числе РЗЭ – методом ISP-MS в лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). **Полученные результаты и выводы.** В результате комплексных исследований получены новые данные по петро-геохимии пегматитов с отнесением их к литий-цезий-танталовому (ЛСТ) типу и выделением нескольких стадий минерализации. В вертикальной зональности пегматитового поля, наиболее продуктивными на редкометалльное оруденение, являются самые верхние тела пегматитов. Впервые в составе пегматитов описаны минералы: сподумен, поллуцит, пиррохлор, циркон, алланит. В породах проявлен тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов М – типа. Менявшиеся физико-химические условия пегматитовых флюидов приводили к предпочтительному обогащению последних рудными компонентами в условиях повышения кислотности среды.

**Ключевые слова:** Северный Кавказ, гранитные пегматиты, сподумен, поллуцит, танталит, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, кислотность-щёлочность среды.

**Для цитирования:** Гусев А.И. Литий-цезий-танталовые пегматиты горы Ваза-Хох (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 102-113. DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

Original paper

# Lithia-cesium-tantalum pegmatites of mountain Vaza-Khokh (Northern Caucasus)

A.I. Gusev 

Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy,  
53 Korolenko Str., Biisk 659333, Russian Federation,  
e-mail: anzerg@mail.ru

Received: 30.08.2023, revised: 10.02.2024, accepted: 16.02.2024

**Abstract: Relevance.** Different types ore mineralization related with granitoids on the Northern Caucasus are described. A granitic pegmatites of Vaza-Khokh did not received elucidating in public press although they contain high concentrate ore mineralization of strategic metals: Li, Cs, Ta, that are in very short supply for mineral-raw materials base of Russia. Consequently, the updating of modern information about the pegmatites of the indicated area is beyond doubt. **The aim** of the study is to obtain a comprehensive petrological and geochemical characteristic of the Vaza-Khokh granite pegmatites and their typification at the modern level. **The objects for research** were the bodies of the Vaza-Khokh pegmatites, identified as a potential rare metal ore field. **Materials.** The materials used in the article were obtained by the author in the process of specialized metallogenic studies carried out in 1989, 2021-2022 on the Vaza-Khokh pegmatite field. **Methods.** Research methods, in addition to the geological and petrographic description of pegmatites, included obtaining quantitative characteristics of the composition of the rocks. Silicate analysis of rocks for the main components was determined by the X-ray spectral fluorescence method, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – ISP-AES, other elements, including rare earth elements – by the ISP-MS method in the laboratory of the Institute of Mineralogy, Geochemistry and crystal chemistry of rare elements (Moscow). **Results and conclusions.** As a result of complex studies, new data on the petro-geochemistry of pegmatites were obtained, assigning them to the lithium-cesium-tantalum (LCT) type and identifying several stages of mineralization. In the vertical zoning of a pegmatite field, the most productive rare metal mineralization is the uppermost bodies of pegmatites. For the first time, the following minerals have been described in pegmatites: spodumene, pollucite, pyrrrochlore, zircon, and allanite. The rocks exhibit a tetrad effect of fractionation of M-type rare earth elements. The changing physicochemical conditions of pegmatite fluids led to the preferential enrichment of the latter in ore components under conditions of increasing acidity of the environment.

**Keywords:** Northern Caucasus, granitic pegmatites, spodumene, pollucite, tantalite, tetradic effect fractionation of TEF, acidic- alkali of environment.

**For citation:** Gusev A.I. Lithia-cesium-tantalum pegmatites of mountain Vaza-Khokh (Northern Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 102-113. DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

## Введение

Центральный сектор Большого Кавказа характеризуется разнообразными и разновозрастными гранитоидами, с которыми пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения [Парада и др., 2015; Парада, 2021; Газеев и др., 2022]. Некоторые типы редкометалльного оруденения в этой части Кавказа связаны с Пшиш-Вазахским комплексом позднего палеозоя [Гусев, 2023]. Редкометалльная минерализация в Ваза-Хохском рудном поле представлена гранитными пегматитами и альбититами. Указанные пегматиты не изучались со времён проведения

работ поисково-ревизионной партией на редкие и рассеянные элементы в 60-е годы прошлого века, возглавляемой Кузнецовым К.М. Известно, что гранитные пегматиты характеризуются сильным обогащением несовместимыми литофильными элементами, такими как Rb, Cs, Li, Be и Sn и часто ассоциированы с Nb–Ta–Sn–W минерализацией [Simmons, Webber, 2008; Linnen et al., 2012]. Гранитные пегматиты являются важным источником стратегических металлов, таких как Li, Be, Nb, Ta, Rb, Cs, Zr, Hf, REE (редкоземельных элементов), Th and U, а также геммологических минералов [Černý et al., 2012]. Пегматитовые поля и рои распространены в Главном Кавказском хребте на Каргашили-тау, Лабардан-су, Кюген-кае, Ваза-Хохе, Пшише, Туяле, Аксауте, где они тесно ассоциируют с позднепалеозойскими гранитоидами. Ваза-Хохское пегматитовое поле – одно из самых крупных и в нём насчитывается более 60 пегматитовых тел, имеющих различный состав, а в некоторых из них и высокие концентрации Li, Cs, Ta, Nb, Be, W. В последние годы в связи с резким возрастанием производства литиевых батарей появилось понятие «батарейный литий», т.е. особо чистый гидроксид этого металла. Его, как оказалось, не менее рентабельно получать напрямую из сподумена, а не только из дешевой, но загрязненной рапы соляных озер. Поэтому интерес к литиевым пегматитам опять возрастает. Так в настоящее время готовится к отработке Колмозерское месторождение лития с попутными Nb, Ta и Be [Морозова, 2018]. Оно является крупнейшим месторождением редкометалльных пегматитов России, на долю которого приходится 26% запасов лития страны [Быховский, Архипова, 2016]. Указанные факты не вызывают сомнений в актуальности изучения пегматитов Ваза-Хоха.

### Методы исследований

Вещественный состав пегматитов изучался с использованием агрегатно-фазового анализа, включавшего в себя структурно-текстурные взаимоотношения минеральных агрегатов и отдельных минералов. Построенная автором диаграмма Ta – TE<sub>1,3</sub>, устанавливающая зависимость концентраций тантала и тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов пегматитового ареала, позволяет оценивать кислотно-щелочные условия среды кристаллизации в геологических образованиях, что очень важно для понимания связи флюидного режима и литий-цезий-тантал-ниобиевого оруденения в конкретных пегматитовых процессах.

### Геологическое строение Ваза-Хохского участка пегматитов

Рой пегматитов расположен в левом борту р. Урух юго-восточнее вершины г. Ваза-Хох (3529,4 м) (рис. 1) среди кристаллических сланцев и гнейсов и разgneйсованных кварцевых диоритов в надинтрузивной позиции поздне-палеозойских гранитоидов пшиш-вазахохского комплекса. Рой насчитывает более 60 пегматитовых тел дайкообразной, жилообразной и линзовидной форм (рис. 2). Протяжённости тел варьируют от 0,3 до 2,5 км, мощности от 1 до 45 м в раздувах. Преимущественное падение северо-западное под углами 40-50°.

### Результаты работы и их обсуждение

Пегматиты Ваза-Хоха весьма разнообразны по составу и степени их изменения в результате наложенных процессов. Основная масса пегматитов, расположенных к юго-востоку от горы Ваза-Хох, представляет наибольшую ценность, так как в них



отмечаются наибольшие концентрации сподумена, поллуцита и танталита. Кроме этих различий к западу локализуются редкие пегматиты с интенсивной альбитизацией и развитием редкой вкрапленности колумбита и танталита. Протяжённости и мощности этих пегматитов незначительные.

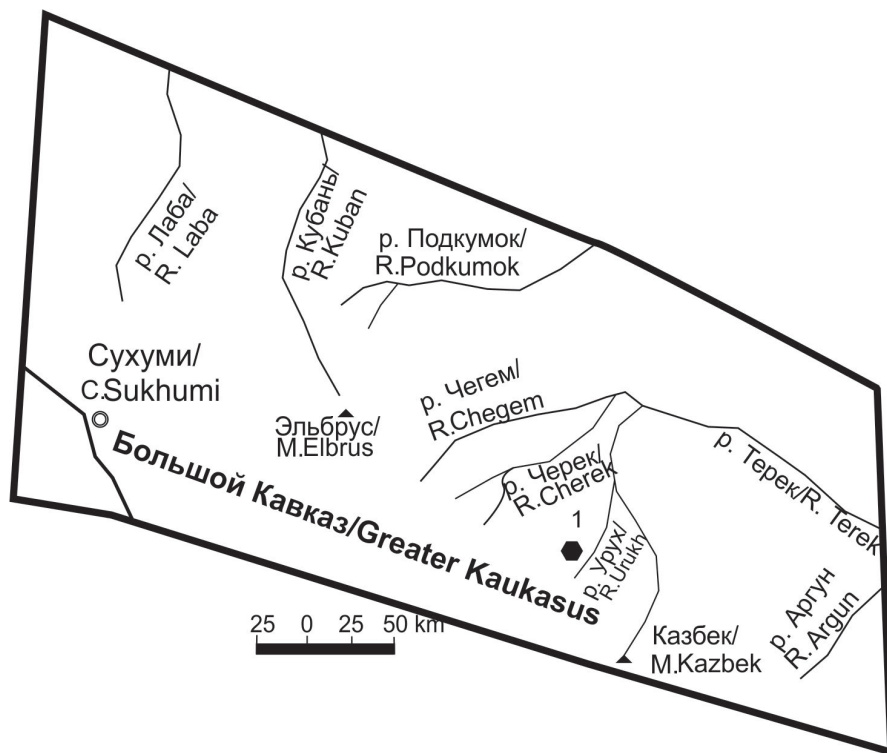


Рис. 1. Схема локализации пегматитов Ваза-Хоха на Большом Кавказе  
1 – Пегматиты Ваза-Хоха /

Fig. 1. Scheme of localization pegmatites of Vaza-Khokh on the Greater Caucasus  
1 – Pegmatites of Vaza-Khokh

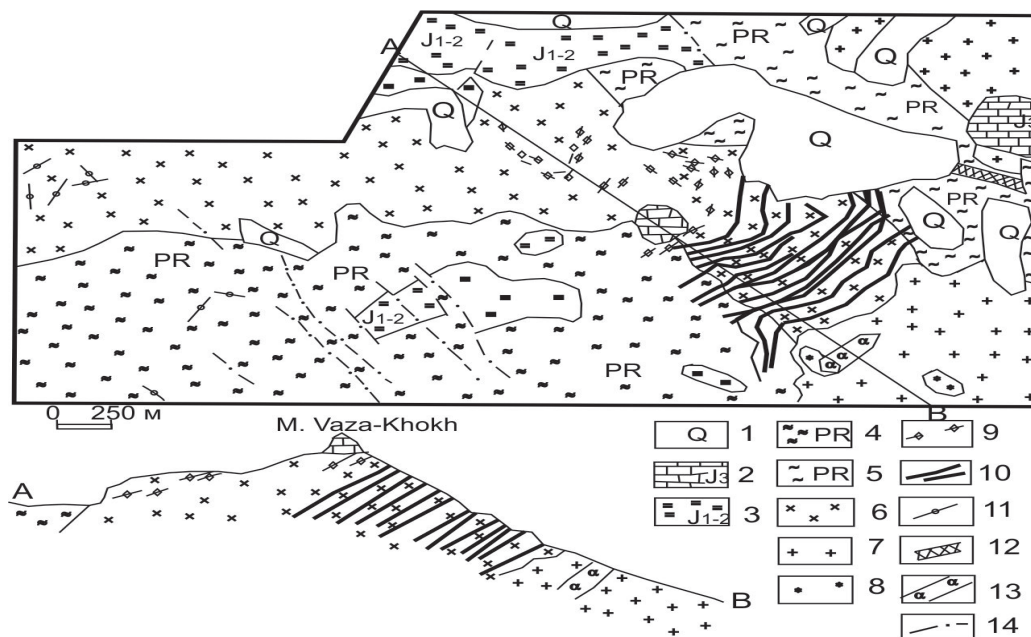


Рис. 2. Схематическая геологическая карта участка горы Ваза-Хох (по А.И. Гусеву с учётом данных К.М. Кузнецова).

1 – четвертичные образования; 2 – известняки верхней юры; 3 – глинистые сланцы ранней-средней юры; 4 – слюдяные сланцы протерозоя; 5 – биотитовые гнейсы протерозоя; 6 – огнейсованные кварцевые диориты раннего палеозоя; 7 – альбитизированные лейкограниты пшиш-вазахского комплекса позднего палеозоя; 8 – аплиты пшиш-вазахского комплекса; 9 – гранит-пегматиты; 10 – сподумен-поллуцитовые пегматиты с танталитом; 11 – интенсивно альбитизированные пегматиты; 12 – шеелитоносные скарны; 13 – альбититы с танталитом; 14 – разломы /

*Fig. 2. Scheme geological map of tract mountain Vaza-Khoh (after A.I. Gusev with discount of data K.M. Kuznetsov).*

1 – Quaternary deposits; 2 – limestones of Last Jurassic; 3 – clay shall of Early-Middle Jurassic; 4 – micaceous shalls of Proterozoic; 5 – biotite gneiss of Proterozoic; 6 – gneissing of quartz diorites of Early Paleozoic; 7 – albitization leucogranites of Pshish – Vaza-Khokh complex of Last Paleozoic; 8 – aplites of Pshish – Vaza-Khokh complex; 9 – granite-pegmatites; 10 – spodumen-pollucitic pegmatites with tantalites; 11 – intensive-albitization of pegmatites; 12 – scheelite skarns; 13 – albitites with tantalite; 14 – faults

По комплексу текстурных признаков выделены 3 стадии минерализации в наиболее обогащённых пегматитах сподуменом, поллуцитом и танталитом, которые локализуются в самых верхах распространения роя пегматитов.

Последовательность минерализации и минеральный состав пегматитов Ваза-Хоха представлен на парагенетической схеме последовательности (рис. 3).

Минералы/Minerals	Стадии минерализации/Stages of mineralization		
	I	II	III
Кварц/Quartz	●	●	●
Мусковит/Muscovite	●	●	●
Олигоклаз/Oligoclase	●		
Микроклин/Microcline	●		
Сподумен/Spodumene	●		
Поллуцит/Pollucite	●	●	
Альбит/Albite			Альбититы/Albitites
Берилл/Beryl	●		
Гранат/Garnet	●		●
Танталит/Tantalite	●	●	●
Пироклор/Pyrochlore			●
Циркон/Zircon			●
Апатит/Apatite			●
Ильменит/Ilmenite			●
Сульфиды/Sulfides			●

*Рис. 3. Стадии и последовательности минералообразования в пегматитах Ваза-Хоха /*

*Fig. 3. Stages and sequences of mineral formation in pegmatites of Vaza-Khokh*

Нами выделены по вещественному составу две разновидности редкометалльных пегматитов: танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевая и танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевая, химический состав которых представлен в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Состав пегматитов с танталовой минерализацией (оксиды в %, элементы – в г/т) /  
Composition of pegmatites with tantalum mineralization (oxides in %, elements in ppm)**

Компоненты/ Components	Номера проб/Numbers of probes					
	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	73,9	74,63	74,4	74,08	75,1	75,7
TiO <sub>2</sub>	0,45	0,42	0,02	0,03	0,05	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,9	15,02	13,2	14,2	12,3	12,0
FeOt	0,44	0,42	0,91	0,45	0,7	0,6
MnO	0,07	0,05	0,1	0,07	0,01	0,02
MgO	0,3	0,25	0,77	1,96	0,2	0,1
CaO	0,11	0,13	0,06	0,05	0,3	0,2
Na <sub>2</sub> O	6,3	6,22	5,93	6,97	7,1	7,0
K <sub>2</sub> O	2,2	2,38	2,97	1,4	3,4	4,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,16	0,13	0,13	0,22	0,22
Ппп/Loi	0,9	0,45	1,53	0,55	0,3	0,2
Σ	99,67	100,07	100,02	99,92	99,68	100,16
Li	432	235	914	859	10100	8250
Be	154	145	82	91	119	97,8
Cs	98	65	84	101	434	542
Rb	908	895	969	864	6300	9147
Ba	44	41	24	22	35	40
Sr	8	6	4	7	31	43
Ga	19	15	13	16	24	26
Tl	123	121	134	54	195	203
Cu	17	20	18	21	19	14
Zn	43	54	62	50	66	32
Pb	16	21	25	17	18	14
Th	6	4	5	4	3,7	2,8
U	42	22	31	27	28	29
Zr	142	133	121	118	121	143
Hf	15	12	11	9	12	16
Nb	64	55	80	53	67	71
Ta	195	154	162	187	327	325
Sn	40	33	34	28	133	270
Y	15	17	12	15	3	2,5
La	14	15	4,02	6,09	1,61	1,88
Ce	33	35	7,88	10,5	2,68	3,32
Pr	3,0	4,23	1,05	1,06	0,27	0,35
Nd	10,2	25,0	3,84	3,51	0,86	1,03
Sm	5,0	22,0	0,89	0,73	0,22	0,35
Eu	0,17	4,0	0,07	0,17	0,03	0,02
Gd	10,5	63,0	0,65	0,55	0,18	0,26
Tb	4,99	30	0,14	0,12	0,05	0,08
Dy	32,9	328	0,73	0,66	0,25	0,46
Ho	6,8	98	0,1	0,08	0,05	0,05
Er	19,96	385	0,27	0,24	0,13	0,13
Tm	3,39	78	0,04	0,05	0,03	0,03
Yb	24,99	670	0,4	0,33	0,16	0,17
Lu	3,37	107	0,05	0,04	0,02	0,02
Σ REE	187,27	1856,2	32,1	39,1	9,51	10,65
(La/Yb) <sub>N</sub>	0,38	0,01	6,8	12,8	6,87	7,55
Eu/Eu*	0,07	0,3	0,27	0,78	0,44	0,19
TE <sub>1,3</sub>	1,42	1,14	1,2	1,24	1,15	1,47

Примечание. В таблице содержания элементов нормализованы по хондриту C1 [McDonough, Sun, 1995]. Eu\*=(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>)/2. TE<sub>1,3</sub> – тетрадный эффект фракционирования REE как среднее между первой и третьей тетрадами по [Irber, 1999]. 1-2 – танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевый пегматит; 3-6 – танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевый пегматит /

Note. Contents of elements normalized on chondrites C1 (McDonough, Sun, 1995). Eu\*=(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>)/2. TE<sub>1,3</sub> – Tetradic effect fractionation of REE, as middle between first and third tetrads after (Irber, 1999). 1-2 – tantalite-garnet-spodumen-muscovite-quartz pegmatite; 3-6 – tantalite-spodumen-pollucite-muscovite-quartz pegmatite

По химизму изучаемые пегматиты относятся к ультракислым и умеренно-щелочным породам, за исключением проб 5 и 6, которые следует рассматривать щелочными разностями. В проанализированных пробах они характеризуются повышенными концентрациями элементов (г/т): Li от 325 до 10100, Be от 82 до 154, Cs от 65 до 542, Rb от 895 до 9147, Ta от 154 до 327, Nb от 53 до 80. В них наблюдаются значительные вариации суммы редких земель – от 9,51 до 1856 г/т. Нормированные отношения La к Yb колеблются от 0,01 до 12,8, указывая на различную степень фракционирования лёгких и тяжёлых редкоземельных элементов (РЗЭ). Она значительно выше у танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевых пегматитов. Отношения Eu/Eu\* устойчиво ниже хондритовых значений. Во всех проанализированных пробах пегматитов проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М–типа, варьирующий от 1,14 до 1,47. Особо отличаются анализы 5 и 6. Они представляют собой ультракислые и высокощелочные породы, в отличие от кислых и умеренно щелочных предыдущих 4-х анализов. Именно в двух последних содержание лития достигает 1%, содержание рубидия на порядок, а цезия в 5 и более раз выше, чем в первых 4-х анализах.

На спайдер-диаграмме разновидности редкометалльных пегматитов Ваза-Хоха контрастно различаются по концентрациям редкоземельных элементов с отчётливым европиевым минимумом и выпуклой кривой распределения в области Gd-Но, подтверждая проявление ТЭФ РЗЭ М–типа [Masuda, Ikeuchi, 1979] (рис. 4).

На диаграмме Ta – TE<sub>1,3</sub> общий тренд концентраций Ta в пегматитах связан с увеличением значений ТЭФ РЗЭ М–типа (рис. 5). Так как проявление ТЭФ РЗЭ М–типа связано с активностью фтор-комплексов [Гусев, Гусев, 2011], то, следовательно, можно сделать вывод о том, что высокие значения тантала в пегматитах обусловлены высокими содержаниями фтора в пегматитовом расплаве.

В нашей стране в классификации редкометалльных пегматитов выделяется 2 подформации; петалитовая и сподуменовая с выделением геохимических эволюционных рядов и парагенетических типов [Загорский и др., 1997]. Согласно этой классификации пегматиты Ваза-Хоха следует относить к сподуменовой подформации, комплексному цезий-тантал-литиевому геохимическому эволюционному ряду и сподумен-калишпат-альбитовому парагенетическому типу, формировавшемуся при повышенном начальном давлении 5-3 кбар. Типичными представителями этого типа являются промышленные месторождения Гольцовое (Восточный Саян), Коктогай (Китай) [Макагон, Шмакин, 1988; Zhang et al., 2004], а также крупнейшие в мире месторождения Парунского пегматитового поля Афганистана [Россовский и др., 1976].

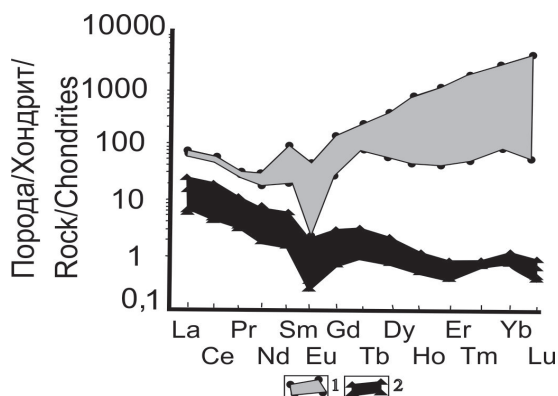


Рис. 4. Спайдер-диаграмма распределения редкоземельных элементов в пегматитах Ваза-Хоха. 1 – танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевый пегматит; 2 – танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевый пегматит /

Fig 4. Spider-plot of distribution rare earth elements in pegmatites of Vaza-Khokh 1 – tantalite-garnet-spodumene-muscovite-quartz pegmatite; 2 – tantalite-spodumene-pollucite-muscovite-quartz pegmatite.



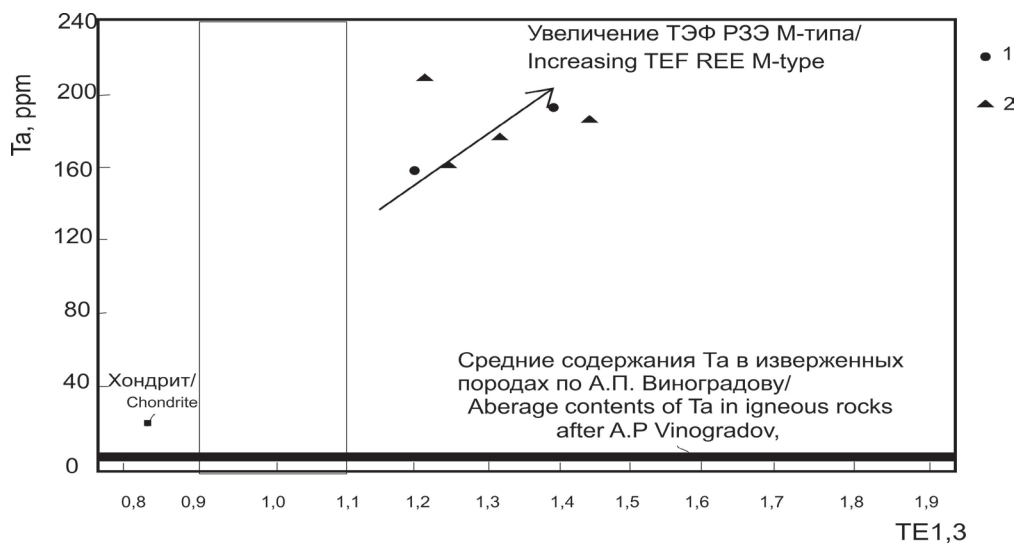


Рис. 5. Диаграмма Та – TE<sub>1,3</sub> для пегматитов Ваза-Хоха.

Содержания Та в хондритах по [Wasson, Kallemeun, 1988].

Содержания тантала в изверженных породах по [Виноградов, 1962].

Пегматиты участка: 1 – танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевые; 2 – танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевые /

Fig. 5. Plot of Ta – TE<sub>1,3</sub> for pegmatites of Vaza-Khokh.

Pegmatites of tract: 1 – tantalite-garnet-spodumene-muscovite-quartz; 2 – tantalite-spodumene-pollucite-muscovite-quartz.

В распределении различных по составу пегматитов Ваза-Хоха наблюдается вертикальная зональность относительно кровли выступа рудогенерирующих альбитизированных лейкогранитов. Вблизи кровли указанных гранитоидов локализуются преимущественно микроклиновые разности пегматитов, выше располагаются микроклин-альбитовые и на самом крайнем удалении от кровли распространены наиболее продуктивные сподумен-альбитовые пегматиты, в которых обнаруживаются поллуцит и танталит (рис. 6).

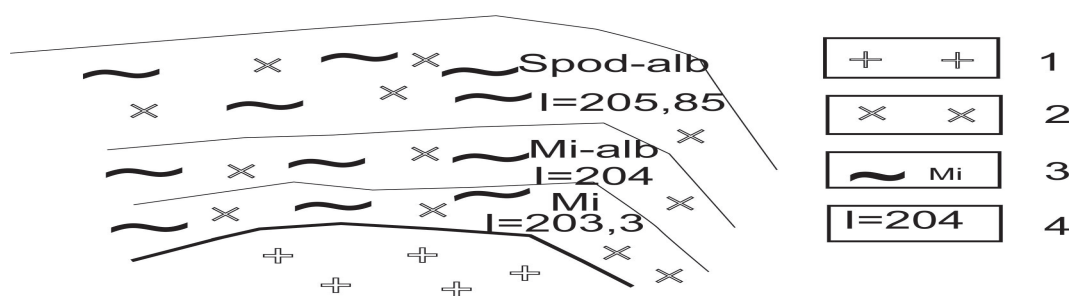


Рис. 6. Схема зональности распределения различных по составу пегматитов Ваза-Хоха относительно кровли рудогенерирующих гранитоидов.

1 – рудогенерирующие альбитизированные лейкограниты, 2 – рудовмещающие разgneйсованные кварцевые диориты; 3 – пегматиты и их состав (Mi – микроклиновые, Mi-alb – микроклин-альбитовые, Spod-alb – сподумен-альбитовые); 4 – потенциал ионизации составов пегматитов и его значения по [Жариков, 1967] /

Fig.6. Scheme of zoning distribution different on composition pegmatites Vaza-Khokh relatively roof of ore generation granitoids.

1 – ore generation albitization leucogranites; 2 – ore containing gneissic quartz diorites; 3 – pegmatites and it composition (Mi- microcline, Mi-alb – microcline-albitic, Spod-alb – spodumene-albitic); 4 – potential ionization of composition pegmatites and it values after [Zharikov, 1967].

Как видно из схемы снизу вверх происходит возрастание значений потенциала ионизации, указывающее на увеличение кислотности среды [Жариков, 1967] пегматито-образования в указанном направлении.

Можно определить физико-химические условия пегматито-образования и другим методом, используя соотношения  $Eu/Eu^*$  и  $TE_{1,3}$ . На авторской диаграмме указанных соотношений отчётливо видно, что с увеличением значений  $Eu/Eu^*$  в пегматитах Ваза-Хоха происходит повышение и  $TE_{1,3}$  (рис. 7).

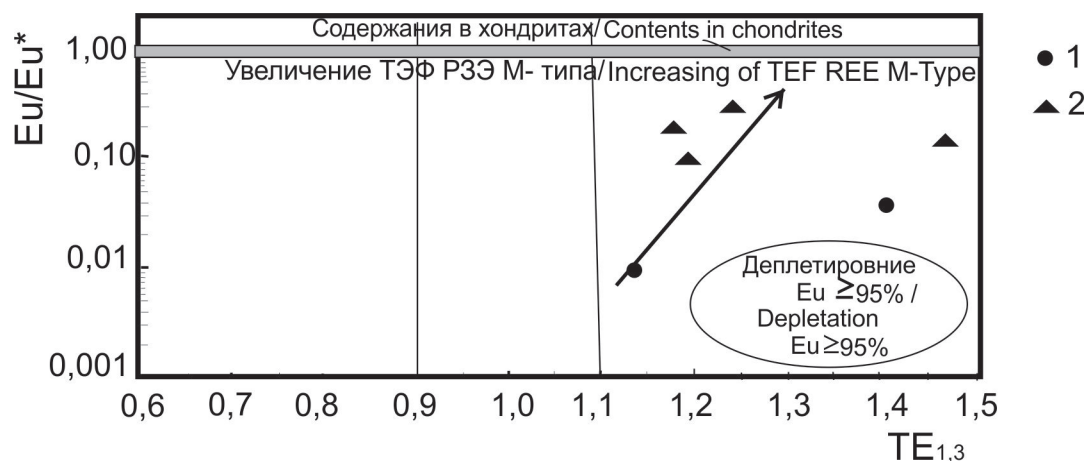


Рис. 7. Диаграмма  $Eu/Eu^*$  –  $TE_{1,3}$  для пегматитов Ваза-Хоха. Содержания  $Eu$  по [McDonough, Sun, 1995]. Условные обозначения на рис. 5 /

Fig. 7. Plot  $Eu/Eu^*$  –  $TE_{1,3}$  for pegmatites of Vaza-Khokh. Contents of  $Eu$  after [McDonough, Sun, 1995]. Legend on fig 5.

Известно, что увеличение величины  $Eu/Eu^*$  при проявлении ТЭФ REE М-типа согласно рядам кислотности–щёлочности элементов по [Маракушев, 1976] спектра элементов Sm, Gd, Eu (участвующих в соотношении  $Eu/Eu^*$ ) в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях отвечает повышению кислотности среды. Следовательно, формирование разных по составу пегматитов Ваза-Хоха происходило в условиях повышения кислотности среды.

За рубежом существуют 2 типа классификации гранитных пегматитов. Первая из них основана на содержаниях главных рудных компонентов в пегматитах, в которой выделяют 3 семейства [Černý, 1991]: 1 – ниобий-иттрий-фтористое (NYF); 2 – литий-цезий-танталовое (LCT); 3 – смешанное NYF-LCT. Пегматиты Ваза-Хоха следует относить по этой классификации к семейству литий-цезий-танталовому (LCT). Другая классификация, основанная на комплексной оценке геолого-минералогических, физико-химических и геохимических признаков [Sánchez-Munoz et al., 2016], предусматривает выделение 2-х групп пегматитов: первой группы «Высоко- $T^\circ$  низко-флюидных» с двумя подгруппами: 1 – кремнисто-обеднённых, 2 – кремнисто-обогащённых; второй группы «низко- $T^\circ$  высоко-флюидных» с двумя подгруппами: 3 – кремнисто-обогащённых, низко-фосфористых и 4 – кремнисто-обогащённых высоко-фосфористых. По этой классификации пегматиты Ваза-Хоха следует относить к 4 подгруппе – кремнисто-обогащённых и высоко-фосфористых. Такие пегматиты связаны с эпизональными–мезозональными гранитными массивами в синколлизонных обстановках в условиях растяжения [Sánchez-Munoz et al., 2016].

Значительные масштабы пегматитов Ваза-Хоха и промышленные концентрации в них Li, Cs, Ta позволят в будущем при проведении более детальных работ оценить для потенциального рудного поля прогнозные ресурсы стратегических металлов.

### Выводы

Пегматиты Ваза-Хоха формировались в три стадии и относятся к литий-цезий-танталовому типу. В вертикальном разрезе снизу вверх выделяются три зоны пегматитов: микроклиновья, микроклин-альбитовая и сподумен-альбитовая. Последняя зона наиболее продуктивна и в ней выделены две разновидности пегматитов: танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевая и танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевая. В составе последней две пробы, характеризующиеся повышенной щёлочностью среды, имеют и более высокие концентрации Li, Cs, Rb, Sr, Ga, Ta, Sn. Формирование наиболее продуктивных пегматитов на стратегические металлы характеризовалось высокой насыщенностью флюидов фтор-комплексами и происходило в условиях повышения кислотности и щёлочности среды минералообразования.

### Литература

1. Быховский Л.З., Архипова Н.А. Редкометалльное сырьё России: перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 11. – С. 26–36.
2. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.
3. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А. Раннекиммерийские вулканоплутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерагения. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001.
4. Гусев А.И., Гусев А.А. Тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов и его использование в решении проблем петрологии гранитоидов. // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 5. – С.45–49.
5. Гусев А.И. Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 96–111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.
6. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов. // Геология рудных месторождений. – 1967. – № 5. – С. 75–89.
7. Загорский В.Е., Кузнецова Л.Г., Макагон В.М., Макрыгина В.А., Шмакин Б.М. Редкометалльные пегматиты. – Нск: Наука, Сиб. предприятие РАН. – 1997. (Гранитные пегматиты; Т. 2) – 285 с.
8. Макагон В.М., Шмакин Б.М. Геохимия главных формаций гранитных пегматитов. – Нск: Наука. Сиб. Отделение. – 1988. 210 с.
9. Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности. // Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. М.: Наука. – 1976. С. 36–51.
10. Морозова Л.Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные по редкоэлементному составу (Кольский полуостров). // Литосфера. – 2018. – Т. 18. № 1. – С. 82–98.
11. Парада С.Г., Маркин М.Ю., Столяров В.В., Шишкалов И.Ю. Геологические условия локализации золотоносных минерализаций и структура Муштинского рудного поля (Кабардино-Балкарская республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 2. – С. 51–65. DOI: 10.23671/VNC.2015.2.55266.

12. Парада С.Г. Рудно-магматические системы медно-порфирового типа Большого Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.01.
13. Россковский Л.Н., Чмырёв В.М., Ерёменко Г.К., Мир-Акбар. Геология и условия формирования сподуменовых месторождений Гиндукуша (Афганистан). // *Геология рудных месторождений*. – 1976. – Т. 18. № 6. – С. 19–33.
14. Černý P. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? // *Precambrian Research*. – 1991. – Vol. 51. – pp. 429–468.
15. Černý P., London D., Novak M. Granitic pegmatites as reflections of their sources. // *Elements*. – 2012. – Vol. 8. – pp. 289–294.
16. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. // *Geochim Comochim Acta*. – 1999. – Vol. 63. No. 3/4. – pp. 489–508.
17. Linnen R.L., Van Lichtervelde M., Cerny P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. // *Elements*. – 2012. – Vol. 8. – pp. 275–280.
18. Masuda A., Ikeuchi Y. Lanthanide tetrad effect observed in marine environment. // *Geochim J.* – 1979. – Vol. 13. – pp. 19–22.
19. Mc Donough W.F., Sun S. The composition of the Earth. // *Chem. Geol.* – 1995. – Vol. 120. – pp. 223–253.
20. Sánchez-Muñoz L., Müller A., Andrés S.L., Martin R.F., Modreski P.J., de Moura O.J.M. The P-Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites. // *Lithos*. – 2016. – Vol. 244. – pp. 134–152.
21. Simmons W.B., Webber K.L. Pegmatite genesis: state of the art. // *Eur. J. Mineral.* – 2008. – Vol. 20. – pp. 421–438.
22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Mean composition of the chondrite groups. // *Phil. Trans. R. Soc. London*. – 1988 – Vol. 5. – pp. 535–544.
23. Zhang A.C., Wang R.C., Hu H., Zhang H., Zhu J.C., Chen X.M. Chemical evolution of Nb–Ta oxides and zircon from the Koktokay No. 3 granitic pegmatite, Altai, northwestern China. // *Mineralogical Magazine*. – 2004. – Vol. 68. No. 5. – pp. 739–756.

## References

1. Bykhovskiy L.Z., Arkhipova N.A. Rare metal raw materials in Russia: prospects for exploration and development of mineral resources. Prospect and protection of mineral resources. 2016. No. 11. pp. 26–36. (in Russ.)
2. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geochemistry*. 1962. No.7. pp. 555–572. (In Russ.)
3. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Y., Kondrashov I.A. Early cimmerian volcanoplutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in north Ossetia: geodynamic typification and minerageny. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001. (in Russ.)
4. Gusev A.I., Gusev A.A. Tetrad-effect fractionation of rare earth elements and it using in solve problems of petrology granitoids. *Advances of modern natural science*. 2011. No.5. pp. 45–49. (In Russ.)
5. Gusev A.I. High-fractionation granitoids of Pschish rare metal of district the Northern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 96–111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007. (In Russ.)
6. Zharikov V.A. Acid-base characteristics of minerals. *Geology of ore deposits*. 1967. No.5. pp. 75–89. (In Russ.)
7. Zagorsky V.E., Kuznetsova L.G., Makagon V.M., Makrygina V.A., Shmakin B.M. Rare-metal pegmatites. *Novosibirsk. Nauka. Siberian Enterprise of the RAS*. 1997. (Granitic pegma-



tites; Vol. 2.). 285 p. (In Russ.)

8. Makagon V.M., Shmakin B.M. Geochemistry of the main formations of granite pegmatites. Novosibirsk. Nauka. Siberian Branch. 1988. 210 p. (In Russ.)

9. Marakushev A.A. Thermodynamic factors of ore zonation formation. Prediction of latent mineralization based on the zonality of hydrothermal deposits. M: Nauka. 1976. pp. 36–51. (In Russ.)

10. Morozova L.N. Lithium kolmozero deposit of rare metal pegmatites: new data on rare element composition (Kola peninsula). Lithosphere. 2018. Vol. 18. No. 1. pp. 82–98. (In Russ.)

11. Parada S.G., Markin M.Yu., Stolyarov V.V., Shishkalov I.Yu. Geological conditions of auriferous mineralization localization and the structure of Mushtinskoe ore field (Kabardino-Balkar Republic). Geology and Geophysics of Russian South. 2015. No 2. pp. 51–65. DOI: 10.23671/VNC.2015.2.55266. (In Russ.)

12. Parada S.G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.01. (In Russ.)

13. Rossovskiy L.N., Chmyrev V.M., Eremenko G.K., Mir-Akbar. Geology and conditions for the formation of spodumene deposits in the Hindu Kush (Afghanistan). Geology of ore deposits. 1976. Vol. 18. No. 6. pp. 19–33. (In Russ.)

14. Černý P. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? Precambrian Research. 1991. Vol. 51. pp. 429–468.

15. Černý P., London D., Novak M. Granitic pegmatites as reflections of their sources. Elements. 2012. Vol. 8. pp. 289–294.

16. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. Geochim Comochim Acta. 1999. Vol. 63. No. 3/4. pp. 489–508.

17. Linnen R.L., Van Lichtervelde M., Cerny P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. Elements. 2012. Vol. 8. pp. 275–280.

18. Masuda A., Ikeuchi Y. Lanthanide tetrad effect observed in marine environment. Geochim J. 1979. Vol. 13. pp. 19–22.

19. Mc Donough W.F., Sun S. The composition of the Earth. Chem. Geol. 1995. Vol. 120. pp. 223–253.

20. Sánchez-Muñoz L., Müller A., Andrés S.L., Martín R.F., Modreski P.J., de Moura O.J.M. The P-Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites. Lithos. 2016. Vol. 244. pp. 134–152.

21. Simmons W.B., Webber K.L. Pegmatite genesis: state of the art. Eur. J. Mineral. 2008. Vol. 20. pp. 421–438.

22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Mean composition of the chondrite groups. Phil. Trans. R. Soc. London. 1988 Vol. 5. pp. 535–544.

23. Zhang A.C., Wang R.C., Hu H., Zhang H., Zhu J.C., Chen X.M. Chemical evolution of Nb–Ta oxides and zircon from the Koktokay No. 3 granitic pegmatite, Altai, northwestern China. Mineralogical Magazine. 2004. Vol. 68. No. 5. pp. 739–756.

УДК 553.982

DOI: 10.46698/VNC.2024.49.96.008

Оригинальная статья

## Оценка влияния тектонического фактора на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях нефтекумской свиты (на примере Восточно-Безводненского месторождения)

К.И. Черненко 

Северо-Кавказский федеральный университет,  
Россия, 355009, г. Ставрополь, пр-т Кулакова 16/1, корп. 16,  
e-mail: kchernenko@ncfu.ru

Статья поступила: 06.11.2023, доработана: 29.02.2024, принята к публикации: 01.03.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Для повышения уровня добычи углеводородного сырья в общем балансе топливно-энергетического комплекса России важным фактором является обоснованная оценка и прогноз нефтегазоносности не только новых перспективных районов, но и вовлечение в промышленное освоение невыработанных остаточных запасов и пропущенных недоразведанных участков разрабатываемых месторождений в старых нефтегазодобывающих районах, в том числе и на Восточном Предкавказье. Объектом исследования являются залежи нефти в карбонатных трещинных отложениях нефтекумской свиты нижнего триаса Восточно-Безводненского месторождения, которое находится на завершающей стадии разработки. Данные залежи характеризуются геологической и технологической неоднородностью. Предлагаемые исследования станут необходимым шагом для отработки научно-методической основы выделения дополнительных объектов для доразработки углеводородов на примере Восточного Предкавказья и адаптации полученных результатов к их геологическим аналогам в пределах других нефтегазоносных провинций. **Целью исследования является** оценка влияния тектонического фактора на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях нефтекумской свиты на примере Восточно-Безводненского месторождения. **Методы исследования.** В ходе исследования применялись следующие методы: сбор, анализ, систематизация и обработка геолого-геофизических данных. Использовались также специализированные методы, такие как аэрокосмогеологический метод и комплексный анализ линеаментов и геолого-промысловых данных. **Результаты работы.** Выявлена высокая степень зависимости величины накопленной добычи нефти от индикаторов влияния тектонического фактора. Установлено, что доминирующим фактором формирования повышенной трещиноватости коллекторов нефти на исследуемом месторождении является тектонический. Полученные результаты позволят разработать новые индикаторы влияния тектонического фактора на продуктивность скважин, внедрить их в цифровые геологические модели в условиях дефицита данных о параметрах трещиноватости.

**Ключевые слова:** карбонатный коллектор, трещиноватость, тектонический фактор, геолого-промысловая модель, дешифрирование космоснимков, узлы линеаментов, зоны повышенной продуктивности.

**Для цитирования:** Черненко К.И. Оценка влияния тектонического фактора на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях нефтекумской свиты (на примере Восточно-Безводненского месторождения). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 114-126. DOI: 10.46698/VNC.2024.49.96.008

DOI: 10.46698/VNC.2024.49.96.008

Original paper

# Assessment of tectonic factor influence on the formation of zones of increased productivity of oil deposits in carbonate rocks of the Neftekumsk suite (on the example of the Vostochno- Bezvodnenskoye field)

K.I. Chernenko 

North-Caucasus Federal University,  
16/1 Kulakova Ave., Stavropol 355009, Russian Federation,  
e-mail: kchernenko@ncfu.ru

Received: 06.11.2023, revised: 29.02.2024, accepted: 01.03.2024

**Abstract: Relevance.** To increase the level of hydrocarbon production in the overall balance of the fuel and energy complex of Russia, an important factor is a reasonable assessment and forecast of the oil and gas potential. This refers not only to new promising areas, but also to the involvement in the industrial development of unprocessed residual reserves and missed undiscovered areas of developed fields in old oil and gas producing areas, including in the Eastern Caucasus. The object of the study is oil deposits in carbonate fractured rocks of the Neftekumsk suite of the Lower Triassic of the Vostochno-Bezvodnenskoye field, which is at the final stage of development. These deposits are characterized by geological and technological heterogeneity (the degree of development of objects and sites). The proposed research will be a necessary step to develop the scientific and methodological basis for the allocation of additional facilities for the further development of hydrocarbons on the example of the Eastern Caucasus and the adaptation of the obtained results to their geological analogues within other oil and gas provinces. **The aim of the study** is to assess the influence of the tectonic factor on the formation of zones of increased productivity of oil deposits in the carbonate rocks of the Neftekumsk suite on the example of the Vostochno-Bezvodnenskoye field. **Methods.** The following methods were used in the course of the study: collection, analysis, systematization and processing of geological and geophysical data. Specialized methods were also used, such as the aerospace geological method and complex analysis of lineaments and geological-field data. **Results.** A high degree of dependence of accumulated oil production on indicators of the influence of the tectonic factor has been revealed. It has been established that the dominant factor in the formation of increased fracturing of oil reservoirs in the studied field is tectonic. The obtained results will allow us to develop new indicators of the influence of the tectonic factor on the productivity of wells, to introduce them into digital geological models in conditions of a shortage of data on fracture parameters.

**Keywords:** carbonate reservoir, fracturing, tectonic factor, geological and field model, interpretation of satellite images, nodes of lineaments, zones of increased productivity.

**For citation:** Chernenko K.I. Assessment of tectonic factor influence on the formation of zones of increased productivity of oil deposits in carbonate rocks of the Neftekumsk suite (on the example of the Vostochno-Bezvodnenskoye field). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 114-126. DOI: 10.46698/VNC.2024.49.96.008

## Введение

Значительное число нефтяных месторождений на российской территории находится на стадии падающей добычи или же закончено разработкой, существует острая необходимость в приросте углеводородного потенциала.

По различным оценкам запасы углеводородов в карбонатных коллекторах достигают от 40 % до 60% от мировых [Мусин и др., 2013]. На Северном Кавказе одним из таких объектов являются нефтекумские отложения нижнетриасового возраста, которые входят в состав пермо-триасового нефтегазоносного комплекса. Исследованию этого объекта в последние годы посвящены работы [Томашев, 2012; Ульмасвай и др., 2013; Хасанов и др., 2020; Черненко и др., 2022; Попков В.И., Попков И.В., 2023а; Попков В.И., Попков И.В., 2023б]. Это один из основных объектов промышленной разработки Восточного Предкавказья. Для всех продуктивных пластов характерна геологическая и технологическая неоднородность.

Восточно-Безводненское нефтяное месторождение приурочено к Величаевско-Максимокумской зоне нефтегазонакопления, которая находится в западной части Прикаспийской низменности. В административном отношении исследуемый объект расположен в восточной части Ставропольского края РФ на территории Нефтекумского района. Разработка месторождения начата в 1965 году. Нефтяные залежи в триасовых отложениях приурочены к среднему ( $T_2$ ) и нижнему ( $T_{1nf}$ ) триасу. Нефтекумская свита представлена доломитами и известняками с прослоями мергелей и аргиллитов. Коллекторы этих залежей относятся к трещинно-кавернозному и трещинному типам, имеют рифогенный генезис.

Из основных залежей нефтекумских отложений Восточно-Безводненского месторождения всего 8 скважин отобрали 45 % всей накопленной добычи нефти, 13 скважин отобрали 35 %, остальные 28 скважин – оставшиеся 20 %, причем все скважины расположены преимущественно на максимальных нефтенасыщенных толщинах. Это говорит о сложности геологического строения залежей, что в значительной степени затрудняет их разработку. Факторы, влияющие на интенсивность трещиноватости, и как следствие, продуктивность, до настоящего времени не в полной мере установлены.

Общеизвестно, что определяющим продуктивность в карбонатных коллекторах, является тектонический фактор. Однако, недостаточно исследований, позволяющих количественно охарактеризовать степень его влияния. Разработка индикаторов влияния тектонического фактора на интенсивность трещиноватости, и как следствие, повышение продуктивности скважин, позволяет повысить качество, информативность и достоверность доразведки и разработки залежей углеводородов. Это определяет актуальность обозначенной проблемы и имеет огромную научную значимость.

## Материалы и методы исследований

Для оценки влияния тектонического фактора на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях нефтекумской свиты выполнен сбор, анализ, систематизация и обобщение геолого-промысловой и



геофизической информации о накопленной добыче нефти и данных по разработке более 55 глубоких скважин.

Автором для проведения линеаментного анализа были отдешифрированы и интерпретированы космические снимки Восточного Предкавказья регионального и локального уровней генерализации видимого и инфракрасного спектров.

Существуют многочисленные работы российских и зарубежных исследователей, посвященные изучению факторов формирования трещиноватости в горных породах, в том числе в карбонатных коллекторах. Трещиноватость, которая в целом определяет продуктивность залежей углеводородов в карбонатных отложениях, может быть исследована следующими группами методов:

- аэрокосмогеологические методы (линеаментный анализ). Выполняется структурное дешифрирование и интерпретация космических снимков разного масштаба и генерализации [Мусин и др., 2013]. Методика позволяет изучить тектоническую напряженность карбонатных отложений на больших площадях, выявить зоны интенсивной повышенной трещиноватости при заложении скважин [Голованов, Дроздов, 1997; Корчуганова, Корсаков, 2009; Narr et al., 2006; Ульмасвай и др., 2013; Никонов, 2019; Miloserdova et al., 2021; Ammari et al., 2022];

- геофизические методы исследования трещиноватости – 3D сейсморазведка и скважинные методы. При интерпретации сейсморазведки разломы и приразломные макротрещины отмечаются в виде зон некогерентности сейсмического сигнала и уточняются на картах акустического импеданса [Мусин и др., 2013; Зеленков, 1997; Бембель и др., 2006; Гулиев и др., 2013]. Скважинные методы исследований неоднородности пласта [Narr et al., 2006; Hennings et al., 2012; Князев, Некрасов, 2019; Абдуллин, Рахматуллина, 2018; Гарифуллин и др., 2018; Симоненко и др., 2018; Ozkaya, 2018; Орехов, Аmani Мангуа, 2019] позволяют проследивать разные структурные особенности на больших интервалах в скважине;

- исследования трещиноватости прямыми методами – на керновом материале [Narr et al., 2006; Nelson et al., 2001; Ozkaya, 2018; Panza et al., 2019; Hu et al., 2022] позволяют получать характеристики микротрещин (по шлифам), макротрещин – на полноразмерном керне;

- исследования трещинных коллекторов промысловыми методами (гидродинамические, индикаторные и другие исследования [Кривова, 2014; Морозовский и др., 2014; Мартюшев, Пономарева, 2016; Du et al., 2019]). Наряду с геофизическими методами исследований скважин являются основными источниками данных высокой достоверности.

Все перечисленные методы изучения трещиноватости имеют свои преимущества и ограничения. В данной работе предлагается использовать комплексирование методов, что позволит более точно и достоверно проводить оценку доминирующего фактора, влияющего на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях.

### Результаты работы и их обсуждение

Залежи нефти нефтекумской свиты нижнего триаса расположены на двух полях: Восточное и Безводненское. Запасы нефти нефтекумской свиты нижнего триаса

Восточного поля относятся к трем залежам, имеющим самостоятельные водонефтяные контакты: залежь I (Пушкарская), залежь II, залежь IV (район скв. 1ср). Анализ структуры фонда скважин и показателей их эксплуатации показал следующее.

**Залежь I (Пушкарская)** является составной частью и продолжением соответствующего пласта Пушкарской площади Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения. Всего в разработке залежи перебивало 5 скважин. Накопленная добыча нефти на одну эксплуатационную скважину в среднем составляет 34,8 тыс. т. Фактические накопленные отборы нефти на одну скважину изменяются от 26,1 тыс. т. до 49,1 тыс. т.

**Залежь II** нефтекумской свиты нижнего триаса Восточного поля введена в пробную эксплуатацию в 1976-1977 гг. Всего в разработке залежи перебивала 21 добывающая скважина. Накопленная добыча нефти на одну эксплуатационную скважину в среднем составляет 55,2 тыс. т. Фактические накопленные отборы нефти на одну скважину изменяются от 0,7 тыс. т. до 182,9 тыс. т.

**Залежь IV (район скв. 1ср)** разрабатывается скважиной 1ср, переведенной с вышезалегающего продуктивного пласта юрского возраста. Скважина вступила в эксплуатацию в сентябре 2002 г. с дебитом нефти 43 т/сут. при обводненности 27%. Накопленная добыча нефти – 17,3 тыс. т.

Запасы нефти нефтекумской свиты нижнего триаса Безводненского поля относятся к залежи III.

**Залежь III** нефтекумской свиты нижнего триаса Безводненского поля введена в пробную эксплуатацию одновременно с залежью II нефтекумской свиты нижнего триаса Восточного поля. Всего в разработке залежи перебивало 19 добывающих скважин. Накопленная добыча нефти на одну эксплуатационную скважину в среднем составляет 41,5 тыс. т. Фактические накопленные отборы нефти на одну скважину изменяются от 0,5 тыс. т. до 191,5 тыс. т.

Анализ структуры фонда скважин и показателей их эксплуатации показал, что характерной особенностью залежей нефти в карбонатных трещинных коллекторах является относительное равномерное распределение скважин по площади и неравномерные значения накопленной добычи нефти. Они характеризуются сложным геологическим строением и анизотропией фильтрационно-емкостных свойств.

Далее был проведен анализ влияния различных геологических и технологических факторов на значения накопленной добычи нефти в скважинах (рис. 1).

Наиболее значимым из проанализированных факторов является значение эффективной нефтенасыщенной толщины – теснота связи по Чеддоку ( $R=0,48$ ) умеренная.

Остальные факторы – абсолютная отметка кровли пласта, длительность периода эксплуатации, накопленная добыча воды – имеют более низкую тесноту связи с накопленной добычей нефти ( $R$  от 0,04 до 0,39). Это говорит о том, что данные факторы не являются доминирующими факторами высокой накопленной добычи нефти в скважинах нефтекумских отложений восточного окончания Величаевско-Максимокумского вала Восточного Предкавказья.

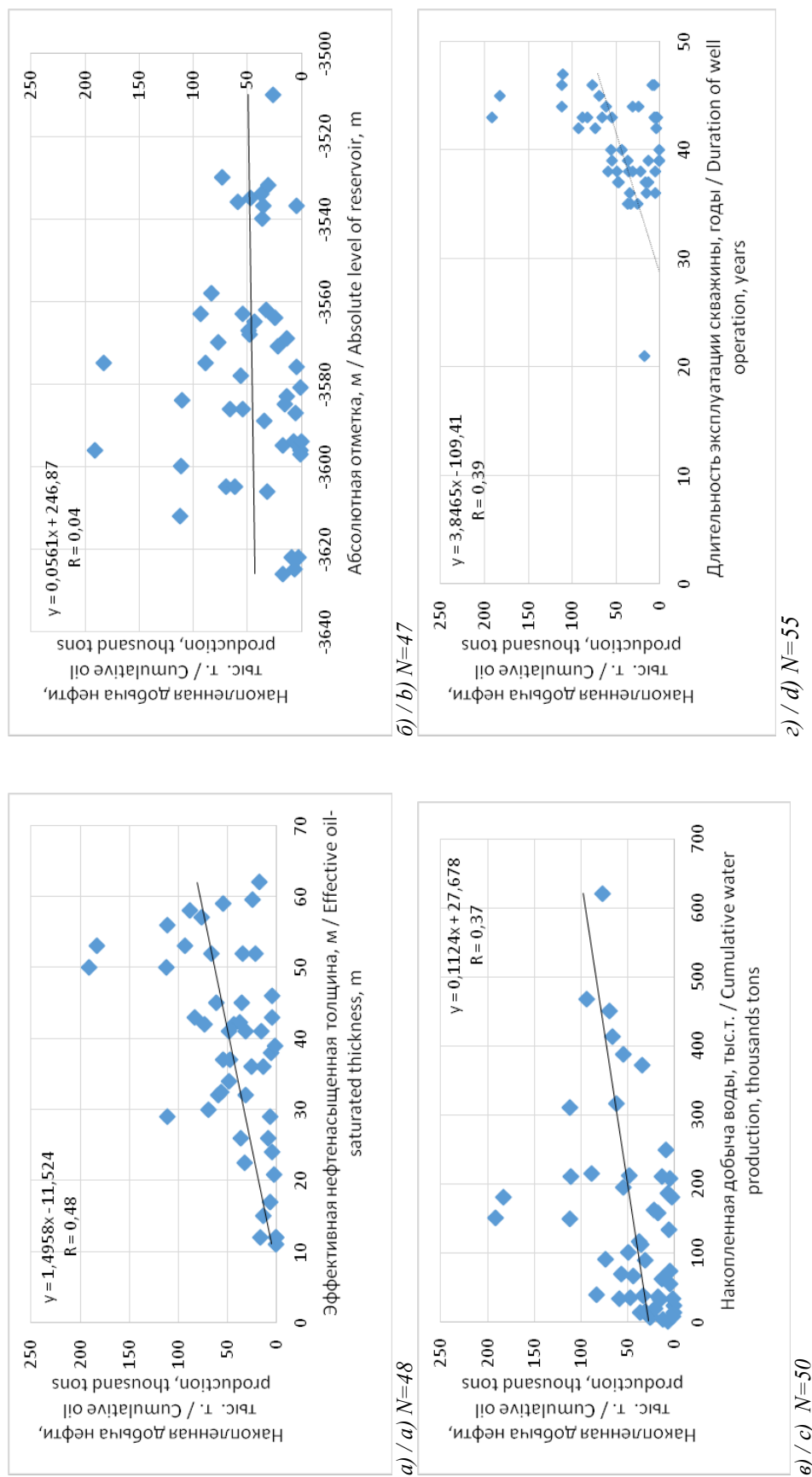


Рис. 1. График зависимости накопленной добычи нефти, тыс. т. от: а) эффективной нефтенасыщенной толщины, м; б) абсолютной отметки пласта, м; в) накопленной добычи воды, тыс. т.; г) длительности эксплуатации скважин, годы / Fig. 1. Graph of the dependence of cumulative oil production, thousand tons on: a) the effective oil-saturated thickness, m; b) the absolute level of the reservoir, m; c) cumulative water production, thousand tons; d) the duration of well operation, years

Далее был проведен анализ связи направлений линеаментов, выявленных на космоснимках регионального и локального масштабов [Черненко и др., 2022], с продуктивностью скважин залежей нефти нефтекумской свиты Восточно-Безводненского месторождения. Примечательно, что основные направления линеаментов совпадают с зонами повышенной продуктивности нефтяных залежей, которые в свою очередь характеризуются линейностью и определенной направленностью. В результате построена схема накопленной добычи нефти, совмещенная с зонами повышенной продуктивности, с учетом полученных данных линеаментного анализа Восточно-Безводненского месторождения (рис. 2).

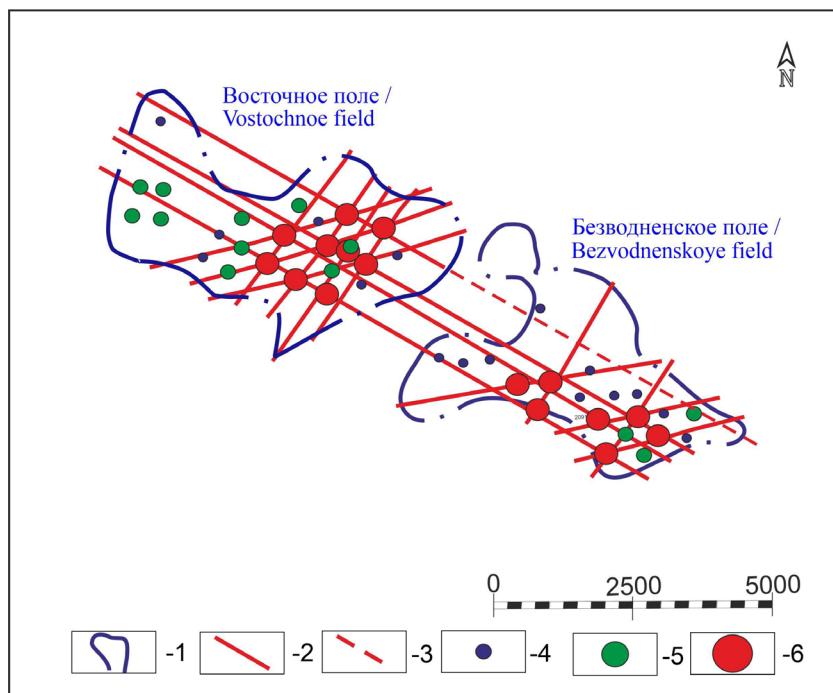
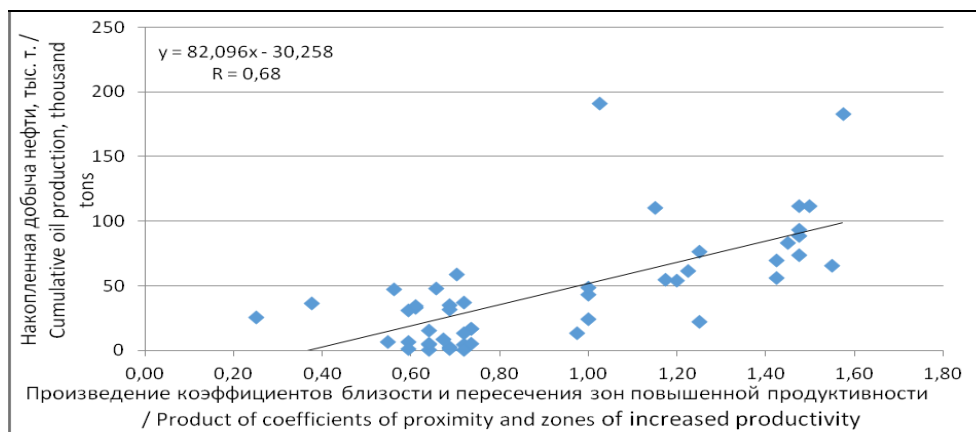


Рис. 2. Схема накопленной добычи нефти, совмещенная с зонами повышенной продуктивности, с учетом полученных данных линеаментного анализа Восточно-Безводненского месторождения. Условные обозначения: 1 – контур нефтеносности; 2 – достоверная линейная зона повышенной продуктивности; 3 – предполагаемая линейная зона повышенной продуктивности. Цветом и размером указаны величины накопленной добычи нефти залежей нефтекумской свиты: 4 – низкие (синие); 5 – средние (зеленые); 6 – максимальные (красные) /

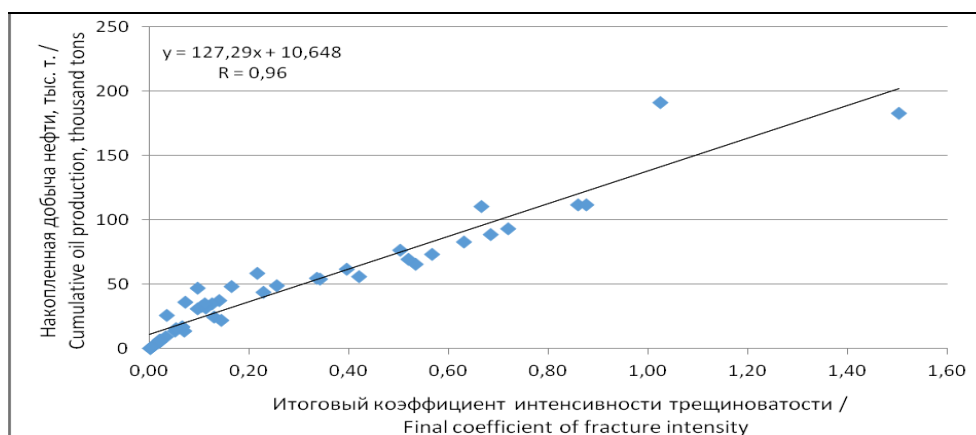
Fig. 2. The scheme of accumulated oil production combined with zones of increased productivity, taking into account the obtained data of the lineament analysis of the Vostochno-Bezvodnenskoye field. Symbols: 1 – oil content contour; 2 – reliable linear zone of increased productivity; 3 – assumed linear zone of increased productivity. The color and size indicate the values of the accumulated oil production of the deposits of the Neftekumsk assise: 4 – low (blue); 5 – medium (green); 6 – maximum (red)

Для количественной оценки влияния тектонического фактора на формирование зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных отложениях нефтекумской свиты, а также получения параметров трещиноватости в условиях дефицита данных (отсутствие ориентированного керна и данных микроимджеров) для построения трехмерных цифровых геологических моделей применялся усовершенствованный итоговый коэффициент интенсивности трещиноватости [Саидова и др., 2022]. Этот коэффициент определялся как произведение трех условных коэффициентов, присвоенных точкам расположения скважин (рис. 3).





а) / a)



б) / b)

Рис. 3. График произведения коэффициентов близости и пересечения зон повышенной продуктивности (а) и график зависимости итогового коэффициента интенсивности трещиноватости в пласте от накопленной добычи нефти залежей Восточно-Безводненского месторождения (б) /

Fig. 3. The graph of the product of the coefficients of proximity and intersection of zones of increased productivity (a) and the graph of the dependence of the final coefficient of the fracturing intensity in the formation on the cumulative oil production of deposits of the Vostochno-Bezvodnenskoye field (b)

На основании схемы накопленной добычи нефти, совмещенной с зонами повышенной продуктивности Восточно-Безводненского месторождения (рис. 2), построены два графика: (а) – график произведения коэффициентов близости и пересечения зон повышенной продуктивности и (б) – график зависимости итогового коэффициента интенсивности трещиноватости в пласте от накопленной добычи нефти залежей Восточно-Безводненского месторождения (рис. 3).

Технология определения коэффициентов (коэффициент относительной накопленной добычи нефти, коэффициент удаленности скважин от линий повышенной продуктивности, коэффициент, учитывающий количество точек пересечения линейных зон повышенной продуктивности скважин) приведена в работе [Саидова и др., 2022].

Заметная теснота связи по Чеддоку ( $R=0,68$ ) для верхнего графика (а) свидетельствует о преобладающем влиянии тектонического фактора на величину нако-

пленной добычи нефти по сравнению с геологическими (эффективной нефтенасыщенной толщиной; абсолютной отметкой пласта) и технологическими (накопленной добычей воды; длительностью эксплуатации скважин) факторами.

Весьма высокая теснота связи по Чеддоку ( $R=0,96$ ) по графику (б) говорит о высокой степени корреляции исследуемых параметров, возможности использования итогового коэффициента трещиноватости при моделировании трещиноватости в цифровых геологических моделях.

Проведенное автором исследование показало, что доминирующим фактором, определяющим продуктивность скважин залежей нефти Восточно-Безводненского месторождения, является тектонический фактор. Применение комплексного анализа линеаментов и геолого-промысловых данных позволяет установить особенности локализации зон повышенной продуктивности нефтяных залежей в карбонатных трещинных коллекторах. Это необходимо учитывать при построении геолого-технологических моделей месторождений углеводородов.

### Выводы

Проведенные исследования привели к следующим результатам.

1. При анализе структуры фонда скважин Восточно-Безводненского месторождения и показателей их эксплуатации выявлена крайняя степень неоднородности локализации зон повышенной продуктивности при относительно равномерном распределении скважин по площади нефтеносности.

2. С целью уточнения параметров неоднородности изучаемых коллекторов разработан новый подход к исследованию и прогнозированию трещиноватости карбонатных коллекторов на основе выявленных особенностей распределения и направлений тектонического стресса с использованием комплексного анализа линеаментов и геолого-промысловых данных.

3. Показана эффективность применения индикаторов (коэффициента относительной накопленной добычи нефти для скважин; коэффициента удаленности скважин от линий повышенной продуктивности; коэффициента, учитывающего количество точек пересечения линейных зон повышенной продуктивности скважин) для оценки влияния тектонического фактора на продуктивность скважин залежей нефти Восточно-Безводненского месторождения.

4. Предложенный подход позволит повысить достоверность цифровых геологических моделей в условиях дефицита данных о параметрах трещин. Расстановка скважин для уплотняющего бурения и проведения ГТМ в узлах зон повышенной продуктивности будет способствовать увеличению степени выработки остаточных запасов углеводородов на месторождениях, имеющих аналогичное строение.

### Литература

1. Абдуллин Р.Н., Рахматуллина А.Р. Пример практического применения информации о трещиноватости по данным комплекса ГИС и высокотехнологических методов. // Георесурсы. – 2018. – № 3. – С. 261–266.
2. Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Поиски и разведка месторождений углеводородов на базе геосолитонной концепции дегазации Земли. // Геология нефти и газа. – 2006. – №2. – С. 2–7.
3. Гарифуллин Р.И., De Joussineau Gh., Rouvroy P. Моделирование трещиноватости, как важный этап проектирования разработки трещиноватых коллекторов. // Труды международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные ме-

тоды изучения и освоения недр Евразии». Издательство: ООО «ПолиПРЕСС». – 2018. – С. 267–272.

4. Голованов М.П., Дроздов В.В. Опыт линеamentного анализа в Предкавказье. // Космическая информация при поисках, разведке и эксплуатации газовых месторождений: результаты и перспективы использования. – М.: Труды ВНИИГАЗА. – 1987. – С. 61–68.

5. Гулиев И.С., Ализаде Ак.А., Исмаил-Заде А.Д., Гусейнов Д.А. Углеводородные системы субвертикальных зон дезинтеграции Южно-Каспийской впадины. // Тезисы докладов Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти: 2-е Кудрявцевские чтения. – М.: ЦГЭ. – 2013. С. 72–75.

6. Зеленков В.А. Отчет о детальном сейсмическом исследовании двухотрядной партии I/93 в пределах Восточно-Маньчжурского прогиба, Величаевско-Максимокумского вала и Арзгирского прогиба на территории нефтекумского и Левокумского районов Ставропольского края. – 1996. – 106 с.

7. Князев А.Р., Некрасов А.Н. Опыт выделения трещинных коллекторов в карбонатных породах по данным стандартного каротажа и сканеров. // Каротажник. – 2019. – № 5(299). – С. 40–54.

8. Корчуганова Н.И., Корсаков А.К. Дистанционные методы геологического картирования: учебник. – М.: КДУ. – 2009. 288 с.

9. Кривова Н.Р. Технологии разработки многопластовых месторождений с разрывными нарушениями: монография. // Тюм.: ТюмГНГУ. – 2014. 96 с.

10. Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Исследование особенностей выработки запасов в трещинно-поровых коллекторах с привлечением данных гидродинамических исследований скважин (на примере фаменской залежи Озерного месторождения). // Инженер-нефтяник. – 2016. – № 2. – С. 48–52.

11. Морозовский Н.А., Кременецкий М.И., Сирота А.С. Локализация зон карбонатных коллекторов по результатам гидродинамических исследований скважин. // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 8. – С. 44–47.

12. Мусин К.М., Сингатуллина Р.Р., Хусаинов В.М. Опыт и перспективы изучения трещиноватости карбонатных коллекторов. // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть. – Каз.: ООО «Центр инновационных технологий». – 2013. – Т. 81. – С. 75–86.

13. Никонов А.И. Применение метода структурного дешифрирования с целью выявления потенциально опасных деформаций земной поверхности и зон вертикальных флюидоперетоков в пределах локальных платформенных структур (на примере Совхозного ПХГ). // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2019. – № 3(26). – 16 с. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art16.

14. Орехов А.Н., Амани Мангуа М.М. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 6. – С. 198–209. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2140.

15. Попков В.И., Попков И.В. Складчато-надвиговые дислокации в триасовых отложениях Скифско-Туранской платформы. // Геология и геофизика Юга России. – 2023а. – Т. 13. № 1 – С. 34–46. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003.

16. Попков В.И., Попков И.В. О сохранении поровых коллекторов в нижней части разреза нефтегазоносных отложений триаса Скифско-Туранской платформы. // Геология и геофизика Юга России. – 2023б. – Т. 13. № 2. – С. 106–117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009.

17. Саидова К.М., Луценко О.О., Черненко К.И., Рыжковский Т.И. Моделирование сети трещин в объеме природных резервуаров нефтекумских отложений Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения на основе промыслово-линеamentного метода в программном обеспечении Petrel. // Геология и геофизика Юга России. – 2022 – Т. 12. № 4. – С. 101–113. DOI: 10.46698/VNC.2022.46.87.008.

18. Симоненко Е.П., Долгирев С.С., Кириченко Ю.В. Возможности методов ГИС для изучения трещиноватости. // Научно-технический журнал Георесурсы. – 2018. – № 3. – С. 267–273.

19. Томашев Д.В. Строение природного резервуара нефти в нижнетриасовых отложениях (нефтекумская свита) Восточного Ставрополя по данным гидродинамических исследований. // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2012. – № 3(32). – С. 96–100.
20. Ульмасвай Ф.С., Сидорчук Е.А., Добрынина С.А. Геодинамический фактор в распределении скоплений углеводородов в осадочной толще Предкавказья. // Геология, география и глобальная энергия. – 2013. – № 2(49). – С. 060–071.
21. Хасанов М.А., Эзирбаев Т.Б., Эльжаев А.С. Пространственное распространение пермо-триасовых отложений Восточного Предкавказья и их нефтегазоносность. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. – С. 113–126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008
22. Черненко К.И., Еремина Н.В., Туманова Е.Ю. Линейные зоны повышенной продуктивности нефти в карбонатной залежи Пушкарского поля Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения. // Наука. Инновации. Технологии. – 2022. – № 3. – С. 29–46. DOI: 10.37493/2308-4758.2022.3.2
23. Ammari A., Abbes Ch., Abida H. Geometric properties and scaling laws of the fracture network of the Ypresian carbonate reservoir in central Tunisia: Examples of Jebels Ousselat and Jebil. // Journal of African Earth Sciences. – 2022. – Vol. 196. – 104718. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2022.104718.
24. Du X., Lu Zh, Li D., Xu Y., Li P., Lu D. A novel analytical well test model for fractured vuggy carbonate reservoirs considering the coupling between oil flow and wave propagation. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. Vol. 173. – pp. 447–461. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.077.
25. Hennings P., Allwardt P., Paul P., Zahm Ch., Reid R., Alley H., Kirschner R., Lee B., Hough E. Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia. // AAPG Bulletin. – 2012. – Vol. 96. No. 4. – pp. 753–772. DOI: 10.1306/08161109084.
26. Hu X.-F., Deng H.-Ch., He J.-H., Shen Zh.-M., Peng X.-F. Complex genesis of multiple-period fractures in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Pengzhou gas field, western Sichuan Basin, China. // Petroleum Science. – 2023. – Vol. 20. Issue 1. – pp. 161–176. DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.001.
27. Miloserdova L.V., Dintsova K.I., Khafizov S.F., Iskaziev K.O., Osipov A.V. Connection of lineaments and nodes of their intersections with the oil and gas content of the Caspian syncline and its framing (Russian). // Oil Industry Journal. – 2021. – No. 6. – pp. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26.
28. Narr W., Schechter D.S., Thompson L.B. Naturally Fractured Reservoir Characterization. // SPE. – 2006. – 121 p.
29. Nelson R.A., Moldovanyi E.P., Matcek C.C., Azpirtxaga I., Bueno E. Production characteristics of the fractured reservoirs of the La Paz field, Maracaibo Basin, Venezuela. // AAPG Bulletin. – 2000. – No. 84. – pp. 1791–1809.
30. Ozkaya S.I. FRACOR-software toolbox for deterministic mapping of fracture corridors in oil fields on AutoCAD platform. // Computers & Geosciences. – 2018. – Vol. 112. – pp. 9–22. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.11.016.
31. Panza E., Agosta F., Rustichelli A., Vinciguerra S.C., Ougier-Simonin A., Dobbs M., Prosser G. Meso-to-microscale fracture porosity in tight limestones, results of an integrated field and laboratory study. // Marine and Petroleum Geology. – 2019. – No. 103 – pp. 581–595.

## References

1. Abdullin R.N., Rakhmatullina A.R. An example of the practical application of information on fractures according to the data of a complex of well logging and high-tech methods. Georesources. 2018. No. 3. pp. 261–266. (In Russ.)



2. Bembel R.M., Megerya V.M., Bembel S.R. Prospecting and exploration of hydrocarbon deposits based on the geosoliton concept of degassing the Earth. *Geology of oil and gas*. 2006. No. 2. pp. 2–7. (In Russ.)
3. Garifullin R. I., De Joussineau Gh., Rouvroy P. Fracturing modeling as an important stage in the design of the development of fractured reservoirs. In: Proceedings of the International geological and geophysical conference “Geoeurasia 2018. Modern methods of studying and developing the subsoil of Eurasia. LLC PoliPRESS. 2018. pp. 267–272. (In Russ.)
4. Golovanov M.P., Drozdov V.V. Experience of lineament analysis in the Ciscaucasia Space information in the search, exploration and operation of gas fields: results and prospects for use. Moscow. Proceedings of VNIIGAZ. 1987. pp. 61–68. (In Russ.)
5. Guliyev I.S., Alizade Ak.A., Ismail-Zadeh A.D., Huseynov D.A. Hydrocarbon systems of the subvertical zones of disintegration of the South Caspian depression. Abstracts of the All-Russian Conference on the deep genesis of oil: 2nd Kudryavtsev Readings. Moscow. CGE. 2013. pp. 72–75. (In Russ.)
6. Zelenkov V.A. Report on detailed seismic studies of the two-row batch I/93 within the East-Manychsky trough, Velichaevsko-Maximokumsky shaft and Arzgirsk trough on the territory of the Neftekumsk and Levokumsk districts of the Stavropol Territory. 1996. 106 p. (In Russ.)
7. Knyazev A.R., Nekrasov A.N. The experience of separation of fractured reservoirs in carbonate rocks according to standard logging and scanners. *The Logger*. 2019. No. 5. Issue 299. pp. 40–54. (In Russ.)
8. Korchuganova N.I., Korsakov A.K. Remote methods of geological mapping. Textbook. Moscow. KDU. 2009. 288 p. (In Russ.)
9. Krivova N.R. Technologies for the development of multilayer deposits faults. Monograph. Tyumen. TSOGU. 2014. 96 p. (In Russ.)
10. Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Investigation of the features of reserves development in fractured-pore reservoirs with the involvement of data from hydrodynamic studies of wells (on the example of the Famenskaya deposit of the Lake deposit). *Oil engineer*. 2016. No. 2. pp. 48–52. (In Russ.)
11. Morozovsky N.A., Kremenetsky M.I., Sirota A.S. Localization of carbonate reservoir zones based on the results of hydrodynamic studies of wells. *Oil industry*. 2014. No. 8. pp. 44–47. (In Russ.)
12. Musin K.M., Singatullina R.R., Khusainov V.M. Experience and prospects of studying fracturing of carbonate reservoirs. Proceedings of TatNIPIneft. Kazan. Center of Innovative Technologies LLC. 2013. No. 81. pp. 75–86. (In Russ.)
13. Nikonov A.I. The use of structural interpretation method for detecting potentially dangerous surface deformations and vertical fluid flows on local platform structures (The case of Sovkhoznoye underground gas storage). *Actual problems of oil and gas*. 2019. No. 3. Issue 26. 16 p. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art16 (In Russ.)
14. Orekhov A.N., Amani Mangua M.M. Possibilities of geophysical methods for predicting reservoir fracturing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2019. No. 6. pp. 198–209. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2140. (In Russ.)
15. Popkov V.I., Popkov I.V. Dislocations of lateral compression in the cover of the Scythian-Turan platform (on the example of the Eastern Mangyshlak). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 34–46. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003. (In Russ.)
16. Popkov V.I., Popkov I.V. On the preservation of pore reservoirs in the lower part of the section of oil and gas deposits of the Triassic Scythian-Turanian platform. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 106–117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009. (In Russ.)
17. Saidova K.M., Lutsenko O.O., Chernenko K.I., Ryzhevskiy T.I. Modeling of network of fractures in the volume of natural reservoirs of Neftekumsk deposits of Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field based on field-lineament method in Petrel software. *Geology and Geophysics*

of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 101–113. DOI: 10.46698/VNC.2022.46.87.008. (In Russ.)

18. Simonenko E.P., Dolgirev S.S., Kirichenko Yu.V. Possibilities of well logging methods for studying fracturing. *Scientific and technical journal Georesources*. 2018. No. 3. pp. 267–273. (In Russ.)

19. Tomashev D.V. The structure of a natural oil reservoir in the Lower Triassic sediments (Neftekumsk formation) Eastern Stavropol Region according to hydrodynamic research data. *Bulletin of the North Caucasus State Technical University*. 2012. No. 3 (32). pp. 96–100. (In Russ.)

20. Ulmasvai F.S., Sidorchuk E.A., Dobrynina S.A. Geodynamic factor in distribution of HC accumulation in sediments formation of Ciscaucasia. *Geology, geography and global energy*. 2013. No. 2 (49). pp. 060–071. (In Russ.)

21. Khasanov M.A., Ezirbaev T.B., Elzhaev A.S. Spatial distribution of Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia and their oil and gas potential. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 113–126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008 (In Russ.)

22. Chernenko K.I., Yeriomina N.V., Tumanova Ye. Yu. Linear zones of increased oil productivity in the carbonate reservoir of the Pushkarskoe area of Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field. *Science. Innovation. Technologies*. 2022. No. 3. pp. 29–46. DOI: 10.37493/2308-4758.2022.3.2 (In Russ.)

23. Ammari A., Abbes Ch., Abida H. Geometric properties and scaling laws of the fracture network of the Ypresian carbonate reservoir in central Tunisia: Examples of Jebels Oussetat and Jebil. *Journal of African Earth Sciences*. 2022. Vol. 196. 104718. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2022.104718.

24. Du X., Lu Zh, Li D., Xu Y., Li P., Lu D. A novel analytical well test model for fractured vuggy carbonate reservoirs considering the coupling between oil flow and wave propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 173. pp. 447–461. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.077.

25. Hennings P., Allwardt P., Paul P., Zahm Ch., Reid R., Alley H., Kirschner R., Lee B., Hough E. Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia. *AAPG Bulletin*. 2012. Vol. 96. No. 4. pp. 753–772. DOI: 10.1306/08161109084.

26. Hu X.-F., Deng H.-Ch., He J.-H., Shen Zh.-M., Peng X.-F. Complex genesis of multi-period fractures in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Pengzhou gas field, western Sichuan Basin, China. *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20. Issue 1. pp. 161–176. DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.001.

27. Miloserdova L.V., Dintsova K.I., Khafizov S.F., Iskaziev K.O., Osipov A.V. Connection of lineaments and nodes of their intersections with the oil and gas content of the Caspian syncline and its framing (Russian). *Oil Industry Journal*. 2021. No. 6. pp. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26.

28. Narr W., Schechter D.S., Thompson L.B. Naturally Fractured Reservoir Characterization. *SPE*. 2006. 121 p.

29. Nelson R.A., Moldovanyi E.P., Matcek C.C., Azpirtxaga I., Bueno E. Production characteristics of the fractured reservoirs of the La Paz field, Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Bulletin*. 2000. No. 84. pp. 1791–1809.

30. Ozkaya S.I. FRACOR-software toolbox for deterministic mapping of fracture corridors in oil fields on AutoCAD platform. *Computers & Geosciences*. 2018. Vol. 112. pp. 9–22. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.11.016.

31. Panza E., Agosta F., Rustichelli A., Vinciguerra S.C., Ougier-Simonin A., Dobbs M., Prosser G. Meso-to-microscale fracture porosity in tight limestones, results of an integrated field and laboratory study. *Marine and Petroleum Geology*. 2019. No. 103. pp. 581–595.

УДК. 502.7

DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009

Оригинальная статья

## Геоэкологический мониторинг и ремедиация территории Моздокского нефтепродуктового загрязнения

И.Д. Алборов <sup>1,2</sup>, О.Г. Бурдзиева <sup>1</sup>, Т.В. Закс <sup>1</sup>, А.С. Кануков <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ),  
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44

Статья поступила: 06.10.2023, доработана: 27.02.2024, принята к публикации: 28.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Функционирование мест базирования авиационного транспорта, как правило, достаточно заметно воздействует на текущее состояние окружающей среды. В первую очередь, это выражается в загрязнении грунтов, являющихся грунтами основания для асфальтобетонного покрытия летной площадки. Нефтепродукты (керосин и др.), смазочные масла и продукты их распада, характеризующиеся высоким уровнем проницаемости, формируют в грунтах основания значительный загрязненный слой. Техногенное загрязнение природной среды северо-западной части г. Моздока нефтепродуктами, которое продолжает активно развиваться, обуславливает актуальность исследования. **Цель работы.** Оценка экологической ситуации и гидрохимического состояния подземных вод, а также изучение динамики нефтепродуктового загрязнения почв и грунтов зоны аэрации Моздокского района. **Методы исследований.** В работе использован комплексный подход, включающий полевые исследования и их анализ, а также разработку путей их проведения. Сопоставление данных по отношению к определенным годам позволяет строить долговременные ряды. **Результаты исследований.** По Моздокскому району складывается очень сложная экологическая ситуация, связанная с загрязнением почв и грунтовых вод нефтепродуктами. Общая площадь ареала НП–загрязнения грунтовых вод составляет около 160–200 км<sup>2</sup> при содержании растворенных углеводородов от 10 до 1800 ед. ПДК (ПДК керосина – 0,01 мг/дм<sup>3</sup>, ГН 2.1.1315-03). В результате исследований установлено, что грунтовые воды на площади Моздокского полигона подвергаются значительному загрязнению растворённым авиационным керосином. Только комплексный и интенсивный подход к решению проблемы Моздокского нефтепродуктового загрязнения позволит выработать регламент ремедиации ареала негативного воздействия утечки нефтепродуктов в почвенный горизонт.

**Ключевые слова:** Моздок, окружающая среда, нефтепродукты, авиационный керосин, линзы загрязнения, катастрофическое загрязнение, ремедиация территории.

**Для цитирования:** Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Геоэкологический мониторинг и ремедиация территории Моздокского нефтепродуктового загрязнения. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 127-140. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009

DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009

Original paper

## Geo-ecological monitoring and remediation of the Mozdok area polluted by oil products

**I.D. Alborov**<sup>1,2</sup>, **O.G. Burdzieva**<sup>1</sup>, **T.V. Zaks**<sup>1</sup>, **A.S. Kanukov**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e mail: datos.ru@yandex.ru;

<sup>2</sup> North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (STU), 44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation

Received: 06.10.2023, revised: 27.02.2024, accepted: 28.02.2024

**Abstract: Relevance.** The operation of aviation transport bases typically has a significant impact on the current state of the environment. Primarily, this is expressed in the contamination of soils, which serve as the bases for the asphalt concrete covering of the airfield. Petroleum products (kerosene, etc.), lubricating oils, and their breakdown products, characterized by a high level of permeability, form a significant contaminated layer in the base soils. Technogenic pollution of the natural environment in the northwest part of the city of Mozdok by oil products, which continues to actively develop, determines the relevance of the study. **The objective of the work.** Assessment of the ecological situation and hydrochemical state of groundwater, as well as study of the dynamics of oil contamination of soils and ground in the aeration zone of the Mozdok district. **The aim.** To assess the ecological situation and hydrochemical condition of groundwater, as well as to study the dynamics of oil product pollution of soils and soils of the aeration zone of Mozdoksky district. **Methods.** The study utilizes a comprehensive approach, including field research and analysis, as well as the development of ways to resolve them. Comparing data for specific years allows for the construction of long-term series. **Results.** A very complex ecological situation related to the pollution of soils and groundwater by oil products is forming in the Mozdok district. The total area of the oil contamination halo in groundwater is about 160-200 km<sup>2</sup> with dissolved hydrocarbon contents ranging from 10 to 1800 units of the MPC (maximum permissible concentration) (the kerosene MPC is 0.01 mg/dm<sup>3</sup> according to GN 2.1.1315-03). Research has shown that groundwater in the Mozdok landfill area is significantly contaminated with dissolved aviation kerosene. Only a comprehensive and intensive approach to solving the problem of oil product pollution in Mozdok will allow for the development of a remediation plan for the area affected by the leakage of oil products into the soil horizon.

**Keywords:** Mozdok, environment, oil products, aviation kerosene, pollution lenses, catastrophic pollution, territory remediation.

**For citation:** Alborov I.D., Burdzieva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Geo-ecological monitoring and remediation of the Mozdok area polluted by oil products. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 127-140. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009

### Введение

В последние годы стремительно растет загрязненность урбанизированных территорий, меняя их экологическую составляющую. На Северном Кавказе традиционно в горных регионах основной причиной этого была активно функционирующая горнодобывающая промышленность. В частности, было установлено влияние загрязненности территории, например, тяжелыми металлами, на онкологическую заболеваемость населения [Бурдзиева и др., 2019]. С начала 90-х годов – време-



ни развала б. СССР – горнодобывающая промышленность весьма быстро, в условиях отсутствия государственной поддержки и малой рентабельности, пришла в полнейший упадок; последствия ее деятельности в виде значительного загрязнения территорий различными продуктами добычи и переработки, заметно разнятся в зависимости от вида загрязнения по регионам. Так, загрязнение территории тяжелыми металлами характерно для Северной Осетии и Кабардино-Балкарии. Для Чечни характерно загрязнение нефтепродуктами и т.д. Тем не менее, необходимо отметить, что за прошедшие тридцать лет, когда имела место практически полная остановка предприятий, воздействие соответствующих источников заметно ослабло. При этом, экологическая напряженность на указанных территориях сохраняется и местами даже увеличивается.

Анализ результатов обследования территорий показал, что на экологическое состояние территорий, в настоящее время, все большее влияние оказывают другие факторы. Было установлено, что большой вклад в загрязнение территории вносит транспорт, как наземный, так и воздушный [Иванов и др., 2020; Кобрин, 2016; Бурдзиева и др., 2019; Calori et al., 2006; Silva et al., 2006]. В этой связи, необходимо отметить, воздействие на интегральную загрязненность территории автотранспорта, количество которого в последние годы удвоилось и продолжает стремительно расти. При этом, в силу различных объективных причин, наблюдается скачкообразное повышение интенсивности его эксплуатации [Заалишвили и др., 2022]. К сожалению, кроме указанных факторов существуют и другие весьма неожиданные. Действительно, если загрязненность нефтепродуктами для Чеченской республики, где нефть активно добывалась, была вполне объяснима, то подобная ситуация для других, свободных от такой добычи, территорий выходила за рамки понимания.

В 1990 году были обнаружены первые признаки серьезного загрязнения на северо-западе города Моздока (Северная Осетия) из-за нефтепродуктов, обнаруженных в бытовых колодцах по улице Полевой. Исследования, проведенные в 1999–2001 годах, показали, что общее количество нефтепродуктов, попавших в подземные водоносные горизонты из-за деятельности объектов, таких как аэродром, подземные нефтепроводы и склады горюче-смазочных материалов (ГСМ), приблизительно было оценено в диапазоне от 1,5 до 4,5 тысяч тонн.

Хорошо известно, что функционирование мест базирования авиационного транспорта, как правило, достаточно заметно воздействует на текущее состояние окружающей среды. В первую очередь, это выражается в загрязнении грунтов, являющихся грунтами основания для асфальтобетонного покрытия летной площадки. Нефтепродукты (керосин и др.), смазочные масла и продукты их распада, характеризующиеся высоким уровнем проникновения, формируют в грунтах основания значительный загрязненный слой. На этом процесс не завершается. Двигаясь по горизонтали и смешиваясь естественным образом с грунтовыми водами, указанные загрязнители обуславливают значительное расширение области загрязнения [Заалишвили и др., 2022; Стогний и др., 2021]. Если рядом расположены сельскохозяйственные угодья, то загрязняющие вещества появляются в скором времени и в соответствующей сельскохозяйственной продукции [Бекузарова и др., 2020]. Необходимо при этом отметить, что современные аэропорты, включая все сооружения и службы, простираются на площади в десятки квадратных километров. Здесь необходимо добавить, что шумовые загрязнения, наряду с химическими загрязнителями, формируют в окружающей среде пространство, негативное для населения и его нормальной жизнедеятельности [Can, 2008; Ohrstrom et al., 2006; Zaks et al.,

2019]. Это приводит к тому, что современные аэропорты как производственные структуры, формируют значительный источник загрязнения окружающей среды. Водные, почвенные, растительные и атмосферные среды сильно пострадали от промышленных и дренажных стоков дождевых, талых и поливочных вод [Normatov et al., 2021], в результате чего поверхностные стоки с территории аэропорта, загрязнены нефтепродуктами, химическими веществами, используемыми для борьбы с обледенением, и различными химическими соединениями, которые образуются в процессе работы двигателей [Черкасова, Веркеев, 2018; Roy et al., 2019], что формирует высокий уровень риска для здоровья населения [Бериев, Заалишвили, 2015; Бурдзиева и др., 2014; Бериев и др., 2013; Burdzieva et al., 2016; McClellan, 1986].

### Методика исследований

В работе использован комплексный подход, включающий полевые исследования и их анализ, а также разработку путей их проведения. Сопоставление данных по отношению к определенным годам позволяет строить долговременные ряды.

Как отмечалось выше, в 1990 году стало известно о катастрофическом загрязнении нефтепродуктами грунтовых вод города Моздока. Необходимо отметить, что предельно допустимая концентрация (ПДК) керосина составляет – 0,01 мг/дм<sup>3</sup>, ГН 2.1.1315-03. Источником загрязнения послужил местный аэродром. Водоснабжение Моздокского района осуществляется, в основном, за счет напорно-субнапорных вод Терско-Кумского артезианского бассейна. Моздокское месторождение используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения, Левобережное – для орошения земель. Учитывая, что Моздокский район является житницей Республики Северная Осетия–Алания, с населением около 120 тыс. человек, вопрос загрязнения земельных ресурсов вызвал серьезную озабоченность и тревогу среди населения и специалистов, особенно экологов и работников здравоохранения.

Авиационные керосины представляют собой смесь углеводородов, включая парафины, нафтены и ароматические соединения, причем содержание последних может достигать 20–22%. Несмотря на то, что из-за невысокой летучести концентрация паров керосина в воздухе редко бывает достаточно высокой для вызова острого отравления, опасность возрастает при повышенных температурах окружающей среды [Ушаков, 2007].

Вопрос обеспечения населения питьевой водой на левом берегу города Моздока остается актуальным из-за продолжающегося загрязнения подземных вод нефтепродуктами. Воздействие техногенных факторов на окружающую среду в этой области обусловлено промышленными предприятиями Моздока и аэродромом, где потребляются большие объемы авиационного керосина и поставляются по железной дороге на разгрузочные площадки, откуда через продуктопроводы доставляются в хранилища на территории аэродрома. В жилой зоне города продолжительное время наблюдается напряженная санитарно-экологическая обстановка, связанная с крайне неблагоприятной экологической ситуацией. Продолжительное время Республика Северная Осетия–Алания по числу заболевших онкологическими заболеваниями занимала первое место в Северо-Кавказском федеральном округе.

Авиационные керосины вызывают общую интоксикацию и наркотическое действие, их испарения раздражают слизистые оболочки глаз и верхние дыхательные пути [Артюх и др., 1990]. Горюче-смазочные материалы (ГСМ) попадают в почву, в основном, благодаря силе тяжести и поверхностно-активным силам. Распростра-

нение ГСМ зависит от множества параметров: непосредственной структуры почв, гидрологических условий и таких свойств ГСМ, как плотность, вязкость, способность к смачиванию, содержание и типы присадок в них и др. [Хазиев, Фатхиев, 1981]. При этом, почва, как самостоятельное природное тело, в процессе саморазвития накапливает совокупность тех или иных свойств, при различных сочетаниях факторов почвообразования [Andrade et al., 2010]. В Моздокском районе, в соответствии с условиями почвообразования распространены каштановые, тёмно-каштановые, лугово-каштановые, аллювиально-дерновые почвы, черноземы южные и обыкновенные [Бясов и др., 1999]. Для моделирования и изучения уровня загрязнения почв в последнее время широко применяются методы геоинформационного моделирования [Wang et al., 2012; Zhang, 2006].

### Содержание исследования и обсуждение

По результатам полевых исследований, которые охватывали площадь около 20 км<sup>2</sup> были, в частности, выявлены 4 линзы, включающие авиационный керосин. В этой связи необходимо отметить, что расположение линз совпадало с простиранием топливных коммуникаций аэродрома и месторасположением склада ГСМ. Не останавливаясь на деталях, отметим, что мощность линзы №1, находящейся вблизи склада ГСМ, составила 60 см при общей площади линзы 430 тыс. м<sup>2</sup>. В северо-западной части г. Моздока вблизи склада авиационного топлива располагалась линза №2 площадью 130 тыс. м<sup>2</sup>. Мощность слоя керосина составила 26 см. В линзе №3 мощность керосина составила 2 см, а в линзе №4 – мощность слоя керосина составила 63 см (1995 г.).

В процессе дальнейших наблюдений было установлено, что линзы авиатоплива (№№ 1,2) имели устойчивые пространственные параметры, но отмечались резкие колебания мощности слоя, связанные, очевидно, с режимом эксплуатации Терско-Кумского канала. Режимная, наблюдательная сеть на полигоне была окончательно сформирована и включала 45 скважин, 53 колодца и 12 пунктов на естественных водоемах и водотоках.

Общая площадь ареала нефтепродуктового (НП) загрязнения в грунтовых водах составляла около 160–200 км<sup>2</sup> при содержании растворенных углеводородов от 10 до 1800 ед. ПДК.

В результате работ, выполненных в последующие годы, установлено, что нефтепродуктовое загрязнение почв, грунтов зоны аэрации продолжается. В течение 3-х циклов режимных наблюдений содержания нефтепродуктов достигали катастрофических значений (до 2000–5000 ПДК).

Во всех скважинах с высокими содержаниями нефтепродуктов на поверхности грунтовых вод отмечался слой свободного керосина мощностью от 2 до 65 см.

В настоящее время мониторинг подземных вод регионального уровня на территории республики проводится по специальной, весьма ограниченной, государственной опорной наблюдательной сети (ГОНС), состоящей из 13 наблюдательных скважин в пределах Осетинской наклонной равнины (ОНР) и 17 наблюдательных скважин на участке нефтепродуктового загрязнения в районе г. Моздока в пределах Притеречной равнины.

Продолжительное функционирование на территории Моздокского района магистральных продукто- и газопроводов, промышленных предприятий и других объектов в результате нарушения целостности канализационных сооружений с участием

человеческого фактора привело к образованию обширного техногенного ареала нефтепродуктового загрязнения окружающей среды.

В 1990–1992 гг. по заданию Минприроды РСО–Алания в левобережной части Моздокского района была выполнена специальная тематическая работа «Исследовательские работы по изучению загрязнения геологической среды в Моздокском районе СО АССР нефтепродуктами и другими токсичными веществами (1991–1992 гг.)», охватывающая все левобережье района. В результате было установлено, что нефтепродукты (включая авиационный керосин) являются наиболее распространенным и опасным загрязнителем геологической среды. Эти исследования позволили также в общих чертах оценить масштабы нефтепродуктового загрязнения геологической среды.

В соответствии с Федеральной «Программой специализированных исследований нефтепродуктового загрязнения подземных вод на Северном Кавказе», согласно проекту, предприятием «Севосгеозко» с 1993 по 1996 гг. был создан «Моздокский полигон» для изучения параметров нефтепродуктового ареала и мониторинга динамики его развития.

Наблюдательная сеть полигона включала 45 скважин, 53 колодца, 12 точек поверхностных водных объектов (р. Терек, Терско-Кумский канал, котлованы добычи строительных материалов, вскрывшие грунтовые воды).

В процессе производства работ изучался режим подземных вод, динамика загрязнения и миграция нефтепродуктов в пределах зоны аэрации, грунтовых водах и напорном водоносном горизонте, широко используемом для удовлетворения нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Моздока и других населенных пунктов района.

В последующие годы на рассматриваемой территории, площадью около 17 км<sup>2</sup>, была выполнена специальная работа, в результате которой с помощью геофизических исследований было детально изучено литологическое строение отложений верхнего плейстоцена и оценен масштаб загрязнения авиационным керосином.

В целом по Моздокскому району складывается очень сложная экологическая ситуация, связанная с загрязнением почв и грунтовых вод нефтепродуктами, а также с имевшими место фактами утечки нефтепродуктов из транзитных продуктопроводов, проходящих по территории района. Источниками наиболее существенного загрязнения почв Моздокского района являются:

- нефтепровод «Малгобек-Тихорецк»;
- ж\д станция «Моздок» – нефтебаза аэродрома;
- продуктопровод «Грозный-Трудовая»;
- продуктопровод «Грозный-Армавир».

В настоящее время перекачка нефтепродуктов осуществляется не постоянно, а периодически. Тем не менее, эти продуктопроводы в свое время послужили мощными источниками загрязнения.

Так, например, было подсчитано, что в результате частых засверловок продуктопроводов с целью хищения нефтепродуктов, в среднем, только в результате одной засверловки происходил розлив 21,2 тонны нефтепродукта на незащищенную почву.

Гидрохимическое состояние подземных вод на Моздокском участке устойчивого загрязнения нефтепродуктами оценено на основе анализа данных ведения наблюдений за динамикой области загрязнения первого от поверхности горизонта грунтовых вод (верхне-неоплейстоцен-голоценовый водоносный горизонт аQIII-IV) по



14 наблюдательным колодцам ГОНС и результатам анализов, предоставленных МУП «Моздокский водоканал».

При опробовании первого цикла (в апреле 2021 г.) – в наблюдательных колодцах на участке устойчивого загрязнения нефтепродуктами в районе г. Моздока из 10 проб в 4 отмечено превышение ПДК по керосину (от 1,2 до 5 ед. ПДК).

При опробовании второго цикла (в октябре 2021 г.) – в наблюдательных колодцах на участке устойчивого загрязнения нефтепродуктами в районе г. Моздока во всех 10 пробах отмечено превышение ПДК по керосину (от 5,5 до 9,6 ПДК). Результаты анализов (таблица 1, рисунки 1, 2), свидетельствуют об увеличении интенсивности загрязнения в 2021 году по сравнению с 2020 годом и сохранении размера границы ареала загрязнения.

По результатам сокращенного химического анализа по наблюдательному колодцу № 1 отмечено превышение содержания нитратов (50,0 мг/дм<sup>3</sup>, что составляет 1,1 ед. ПДК), жесткости (8,4 мг/дм<sup>3</sup>). Содержание тяжелых металлов (никель, кобальт) не превышает ПДК. При этом надо отметить, что этот водоносный горизонт в районе г. Моздока не предназначен для хозяйственно-питьевого водоснабжения, а в водозаборных скважинах, каптирующих субнапорный ниже-средненеоплейстоценовый аллювиальный водоносный горизонт, используемый для питьевых целей, по нескольким анализам, предоставленным недропользователями, превышения по нитратам и жесткости отсутствуют.

Таблица 1 / Table 1

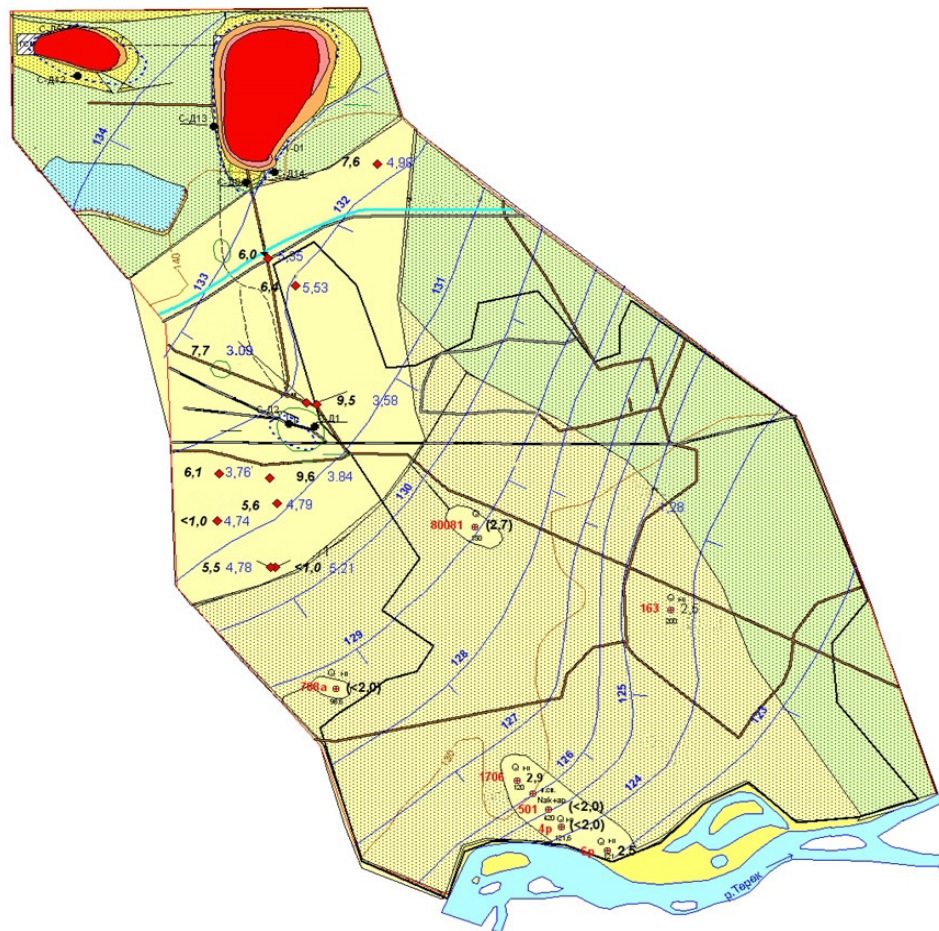
**Данные результатов опробования по Моздокскому участку  
нефтепродуктового загрязнения за 2020-2021 гг. /  
The data of the test results for the Mozdok oil product contamination site  
for the years 2020-2021**

№ набл. кол. / Observation well №	Местоположение / Location	2020 г. / 2020 y.			2021 г. / 2021 y.			Отношение интенсивности загрязнения 2020 г. к 2019 г. / The ratio of pollution intensity in 2020 to 2019
		Дата отбора пробы / Sampling date	Содержание нефтепродуктов / The concentration of oil products		Дата отбора пробы / Sampling date	Содержание нефтепродуктов / The concentration of oil products		
			мг/дм <sup>3</sup> / mg/dm <sup>3</sup>	Ед. ПДК / MPC units		мг/дм <sup>3</sup> / mg/dm <sup>3</sup>	Ед. ПДК / MPC units	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Территория свинокомплекса, в 500 м на ю-в аэродрома / The territory of the pig complex within 500 meters to the southeast of the aerodrome	15.06.	0,009	0,9	27.04	0,011	1,1	0,2
		12.10.	<0,005	<1	25.10.	0,076	7,6	7,6

2	Территория Фермерского хозяйства / Farm territory	15.06.	0,106	10,6	н.о.	-	-	н.с.
		12.10.	0,005	<1	н.о.	-	-	н.с.
3	Ул. Полевая, 87 / Polevaya st., 87	15.06.	0,01	1	27.04.	0,03	3	2
		12.10.	0,011	1,1	25.10.	0,06	6	4,9
4	Ул. Заводская, 160 / Zavodskaya st., 160	15.06.	0,015	1,5	27.04.	0,03	3	1,5
		12.10.	0,019	1,9	25.10.	0,064	6,4	4,5
5	Ул. Заводская, 17 / Zavodskaya st., 17	15.06.	0,12	12	27.04.	0,05	5	-7
		12.10.	0,029	2,9	25.10.	0,095	9,5	6,6
6	Ул. Полевая, 18 / Polevaya st., 18	15.06.	0,031	3,1	27.04.	0,03	3	-0,1
		12.10.	0,02	2	25.10.	0,077	7,7	5,7
7	СОТ «Садовод», участок № 384 / DC «Sadovod», plot № 384	15.06.	0,009	0,9	27.04.	0,008	<1	0
		12.10.	0,01	1	25.10.	0,096	9,6	8,6
8	СОТ «Садовод», участок № 105 / DC «Sadovod», plot № 105	15.06.	0,011	1,1	27.04.	0,006	<1	-1,1
		12.10.	<0,005	<1	25.10.	0,056	5,6	5,6
9	СОТ «Садовод», участок № 155 / DC «Sadovod», plot № 155	н.о.	-	-	27.04.	0,005	<1	н.с.
		н.о.	-	-	25.10.	0,055	5,5	н.с.
10	СОТ «Садовод», участок № 127 / DC «Sadovod», plot № 127	15.06.	0,029	2,9	27.04.	0,006	<1	-2,9
		12.10.	0,027	2,7	25.10.	0,068	6,8	4,1
11	СОТ «Садовод», участок № 6 / DC «Sadovod», plot № 6	15.06.	0,007	0,7	27.04.	0,006	<1	-0,7
		12.10.	0,08	0,8	25.10.	0,061	6,1	5,3

В водозаборных скважинах, эксплуатирующих неоплейстоценовый и совместно эоплейстоцен-неоплейстоценовый водоносный горизонт в 2021 г. по данным анализов недропользователей содержание загрязнения (по авиационному керосину) достигает 2,6 ПДК. По данным режимных наблюдений МУП «Моздокский водоканал» за 2021 г. содержания загрязнения находились в пределах среднегоголетних показателей ПДК, и составляли от 5–6 в северной части участка до 1–1,5 в южной части, где происходит разгрузка загрязненных вод в р. Терек.

Общая площадь линз техногенного нефтепродуктового загрязнения северо-западной части г. Моздок в 1990 году была оценена в диапазоне от 60 до 100 га. О масштабах НП – загрязнения природной среды в этой зоне можно судить по проведенным в/ч 62467 в 1990 г. кратковременным откачкам НП в районе ул. Полевой из бытовых колодцев, траншей и котлованов, из которых всего было добыто около 130 т нефтепродуктов.



Условные обозначения к картам / Conventional symbols on maps

- Пункты наблюдательной сети / Observation network points**

  - СД-8 / 1,0 скважины наблюдательные ГОНС, выведенный из ГОНС в 2016г. / SRMN observation wells removed from SRMN in 2016
  - К-2 / 2,3 Цифры у знака: в числителе - номер пункта наблюдения, в знаменателе - интенсивность загрязнения подземных вод в ПДК; в скобках - толщина слоя керосина, см / Household wells  
Numbers at the sign: in the numerator - the observation point number; in the denominator - the intensity of groundwater pollution in MPC; in brackets - the thickness of the kerosene layer, in cm
  - Быт. кол.1 / 7,6 ♦ 4,98 Цифры у знака: сверху - номер бытового колодца справа - уровень ПВ на момент отбора пробы слева - интенсивность загрязнения ПВ нефтепродуктами (в ед ПДК).  
Numbers at the sign: At the top - number of the household well On the right - level of SW at the time of sampling On the left - intensity of pollution of SW with petroleum products in MPC units
- Скважина водозаборная (данные опробования - II полугодие 2021г.) / Water well (sampling data for the 2nd half of 2021)**

  - № скваж. / 561 Q-2,5 / 420 Цифры у знака: сверху - индекс водоносного горизонта, слева - номер скважины, справа - интенсивность загрязнения ПВ нефтепродуктами (в ед ПДК), в скобках - данные недропользователя, внизу - глубина скважины, м  
Numbers at the sign: At the top - index of the aquifer On the left - well number On the right - intensity of pollution of SW with petroleum products in MPC units In brackets - subsol user data; At the bottom - the depth of the well in m
- Источники загрязнения геологической среды / Sources of pollution of the geological environment**

  - ▨ Склады авиационного топлива / Aviation fuel depots
  - - - - - продуктопровод военного аэродрома / Product pipeline of a military airfield
- Интенсивность загрязнения грунтовых вод в ед. ПДК (ПДК = 0,01 мг/дм<sup>3</sup>) / Groundwater pollution intensity in MPC units (MPC unit = 0.01 mg/dm<sup>3</sup>)**

  - >500 (контур "плавающих" на поверхности грунтовых вод линз керосина) на конец наблюдений (2015г.) (The contour of "floating" kerosene plumes on surface groundwater) at the end of observations (2015).
  - 100 - 500
  - 50 - 100
  - 10 - 50
  - 1 - 10
  - < 1 (1 - установленная, 2 - предполагаемая) (1 - established, 2 - assumed)
- Гидроизогипсы грунтовых вод (аQ), в абсолютных отметках, м / Hydroisohypses of groundwater (aQ), in absolute marks, m**

  - Контур, ограниченный для изучения влияния нефтепродуктового загрязнения на ПВ / The contour limited for studying the impact of oil pollution on surface waters.
- Другие знаки / Other symbols**

  - Горизонтальности поверхности в абсолютных отметках, м / Surface horizontal in absolute elevations, m
  - Железнодорожные пути / Railways
  - Контур жилой и промышленной застройки г.Моздока и ст.Луковской / The outline of the residential and industrial buildings of the town of Mozdok and the village of Lukovskaya
  - Контур "плавающих" линз керосина (по состоянию на 1995 г.) / The contour of floating kerosene lenses (as of 1995).
  - Контур "плавающих" линз керосина (по состоянию на 2004 г.) / The contour of floating lenses (as of 1995)
  - Искусственные водоемы (отработанные карьеры стройматериалов, вскрытые грунтовые воды) / Artificial reservoirs (spent quarries for building materials, exposing groundwater)
  - Терско-Кумский канал / The Terak-Kuma canal
  - Железнодорожная станция / Railway station
  - Линия разреза А-А / Cross section A-A line

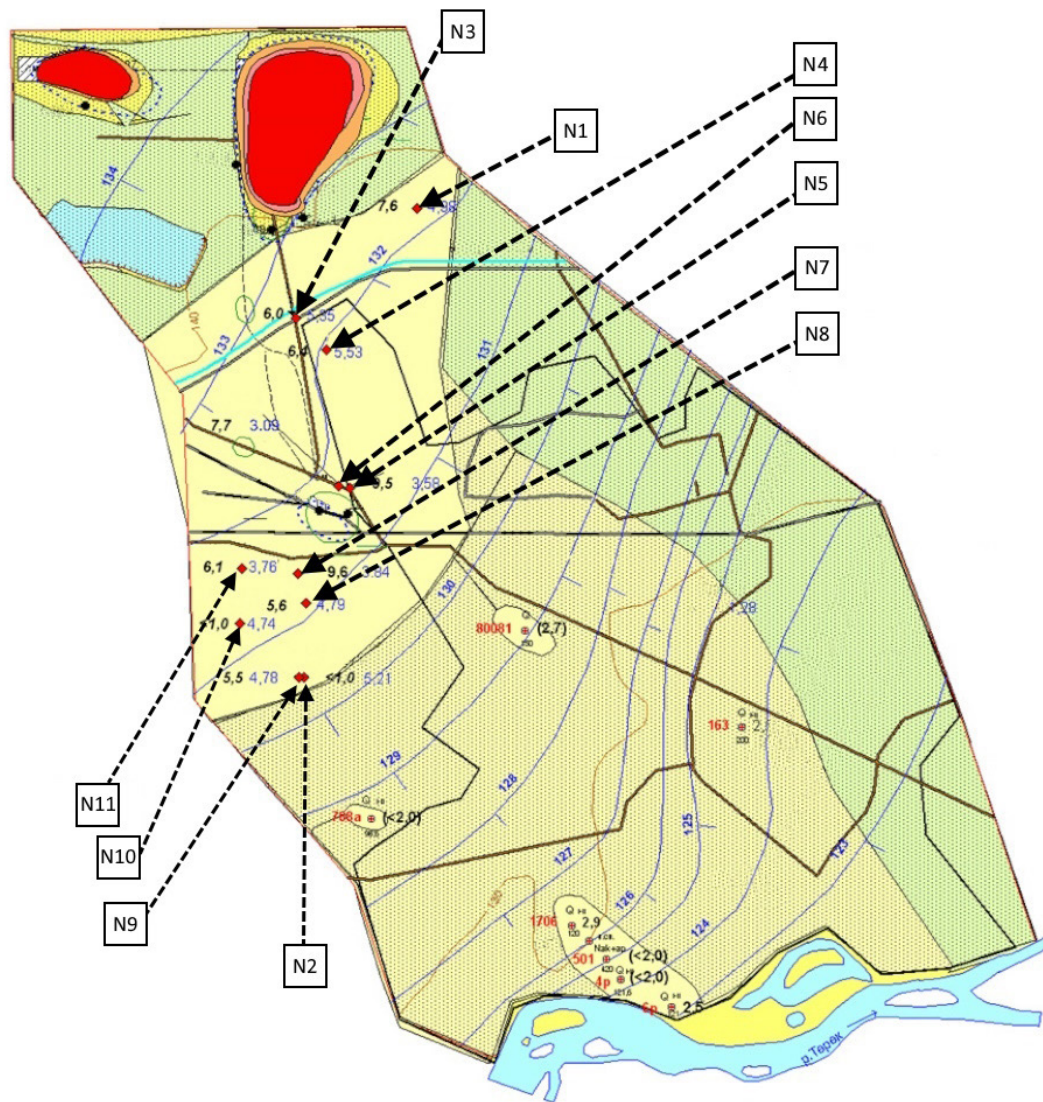
Рис. 1. Карта интенсивности загрязнения грунтовых вод на участке нефтепродуктового загрязнения в районе г. Моздока /

Fig. 1. Map of groundwater pollution intensity at the site of oil product contamination near the city of Mozdok



Общая площадь ареала НП–загрязнения в грунтовых водах составляет около 160–200 км<sup>2</sup> при содержании растворенных углеводородов от 10 до 1800 ед. ПДК (ПДК керосина – 0,01 мг/дм<sup>3</sup>, ГН 2.1.1315-03).

Пробы воды, отобранные в рассматриваемый период, показали, что концентрация керосина долгое время остается все еще высокой. Более того, она увеличивается. Так, в 2013 г. концентрация авиационного керосина изменялась от 3 до 122 ед. ПДК, а в 2015 г. в тех же скважинах она варьировала в пределах от 3 до 240 ед. ПДК.



Условные обозначения к картам / Conventional symbols on maps

N1 - колодец номер 1 / well number 1

Рис. 2. Расположение наблюдательных колодцев (согласно табл. 1) /

Fig. 2. Location of observation wells (according to Table 1)

Таким образом, наблюдается увеличение концентрации загрязнения керосином первого от поверхности грунтового водоносного горизонта, что непременно приведет к увеличению интенсивности загрязнения напорно-субнапорных вод Терско-Кумского артезианского бассейна – основного источника водоснабжения Моздокского района. Основными объектами загрязнения стали почвы и грунтовые воды



района, а также дренажные каналы р. Терек. Водоснабжение Моздокского района республики осуществляется, в основном, за счет напорно-субнапорных вод Терско-Кумского артезианского бассейна. Моздокское месторождение используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения, Левобережное – для орошения земель. Природное качество (естественный фон) эксплуатируемых подземных вод хорошее, минерализация не превышает  $0,6 \text{ г/дм}^3$ .

Только комплексный и интенсивный подход к решению проблемы Моздокского нефтепродуктового загрязнения позволит выработать регламент ремедиации ареала негативного воздействия утечки нефтепродуктов в почвенный горизонт.

### Выводы

В 1990 году были обнаружены первые признаки серьезного техногенного загрязнения на северо-западе города Моздока из-за нефтепродуктов, обнаруженных в бытовых колодцах по улице Полевой. По Моздокскому району складывается очень сложная экологическая ситуация, связанная с загрязнением почв и грунтовых вод нефтепродуктами.

Общая площадь ареала нефтепродуктового загрязнения в грунтовых водах составляет около  $160\text{--}200 \text{ км}^2$  при содержании растворенных углеводородов от 10 до 1800 ед. ПДК, когда ПДК керосина составляет  $0,01 \text{ мг/дм}^3$ , ГН 2.1.1315-03.

Распространение ГСМ в качестве загрязнителей зависит от множества параметров: непосредственной структуры почв, гидрологических условий и таких свойств ГСМ, как плотность, вязкость, способность к смачиванию, содержание и типы присадок и др.

По результатам полевых исследований, которые охватывали площадь около  $20 \text{ км}^2$  были выявлены 4 линзы, включающие авиационный керосин. В этой связи необходимо отметить, что расположение линз совпадало с простираем топливных коммуникаций аэродрома и месторасположением склада ГСМ.

В результате работ, выполненных в последующие годы, установлено, что нефтепродуктовое загрязнение почв, грунтов зоны аэрации продолжается. В течение 3-х циклов режимных наблюдений содержания нефтепродуктов достигали катастрофических значений (до  $2000\text{--}5000$  ПДК).

Только комплексный и интенсивный подход к решению проблемы Моздокского нефтепродуктового загрязнения позволит выработать регламент ремедиации ареала негативного воздействия утечки нефтепродуктов в почвенный горизонт.

### Литература

1. Артюх Е.А., Мазур А.С., Украинцева Т.В., Костюк Л.В. Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти. // Известия СПб ГТИ (ТУ). – 2014. – № 26. – С. 58–66.
2. Бекузарова С.А., Тебиева Д.И., Бекмурзов А.Д., Кебалова Л.А., Корбесова К.В. Фиторемедиация токсичности воздуха автомобильных дорог. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. – С. 127–136. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009.
3. Бериев О.Г., Заалишвили В.Б. Состояние загрязнения атмосферы и заболеваемость населения города Владикавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 4. – С. 47–56.
4. Бериев О.Г., Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Онкозаболеваемость населения г. Владикавказа и его взаимосвязь с различными факторами. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 3. – С. 29–38.

5. Бурдзиева О.Г., Бериев О.Г., Закс Т.В. Влияние факторов внешней среды на экологическое благополучие и здоровье населения города Владикавказа. Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, – 2019. 247 с.
6. 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.
7. Бясов К.Х., Олисаев В.В., Вагин В.С. Агроэкологическое районирование территории Республики Северная Осетия – Алания. Владикавказ, – 1999. 20 с.
8. Заалишвили В. Б., Корбесова К. В., Архиреева И. Г., Ганапати Г. П. Воздействие мобильных и стационарных источников загрязнений на геоэкологическое состояние урбанизированных территорий в горном регионе. // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14. № 4(54). – С. 564–575. DOI 10.21177/1998-4502-2022-14-4-564-575.
9. Иванов А.В., Стриженок А.В., Супрун И.К. Вопросы оценки эффективности внедряемых пылезащитных экранов на этапе проектирования. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. № 3. – С. 139–152. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.81.009.
10. Кобрина Н.В. Системы мониторинга загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом. // *Экология и промышленность*. – 2016. – № 2(47). – С. 97–102.
11. Стогний В.В., Стогний Г.А., Любимова Т.В. Геоэкологические риски территории Краснодарского края: проблема интегральной оценки степени геологических опасностей. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 121–133.
12. Ушаков И.Б. Основы авиационной и космической медицины: / под ред. И.Б. Ушакова. Москва: Слово, – 2007. 344 с.
13. Хазиев Ф.Х., Фатхиев Ф.Ф. Изменение биохимических процессов в почвах при нефтяном загрязнении и активации разложения нефти. // *Агрохимия*. – 1981. – Т. 1. № 10. С. – 102–111.
14. Черкасова Н. Г., Веркеев А.В. Проблема загрязнения окружающей среды при разливе авиационного топлива на территории аэродрома. // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2018. – Т. 2. № 4(14). – С. 494–496.
15. Andrade J.A., Augusto F., Jardim I.C.S.F. Bioremediation of soils contaminated by petroleum and its derivatives. // *Eclética Química*. – 2010. – Vol. 35. No. 3. – pp. 17–43.
16. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. // *International Journal of Geomate*. – 2016. – Vol. 10. No. 1. – pp. 1693–1697.
17. Calori G., Clemente M., De Maria R., Finardi S., Lollobrigida F., Tinarelli G. Air quality integrated modelling in Turin urban area. // *Environmental Modelling & Software*. – 2006. – Vol. 21. No. 4. – pp. 468–476.
18. Can A., Leclercq L., Lelong J., Dynamic estimation of urban traffic noise: influence of traffic and noise source representations. // *Applied Acoustics*. – 2008. – Vol. 69. – pp. 858–867.
19. McClellan R.O. Health effects of diesel exhaust: a case study in risk assessment. // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1986. – Vol. 47. – pp. 1–13.
20. Normatov I.Sh., Anderson R., Karimzoda A., Normatov A. Conservation and protection of the Central Asia region highlands water resources is the key to the future development of agriculture and food security. // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2021. – Vol. 13. – 469–475. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-469-475.
21. Ohrstrom E., Skanberg A., Svensson H., Gidlof-Gunnarsson A. Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. // *J Sound Vibrat*. – 2006. – Vol. 295. – pp. 40–59.
22. Roy S., Gupta S. K., Prakash J., Habib G., Baudh K., Nasr M. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in road dust in the national capital territory (nct) of Delhi, India. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – Vol. 26. Issue 29. – pp. 30413–30425.

23. Silva C.M., Farias T.L., Frey H.C., Roupail N.M. Evaluation of numerical models for simulation of real-world hot-stabilized fuel consumption and emissions of gasoline light-duty vehicles. // *Transport. Res.* – 2006. – Vol. 11. – pp. 377–385.

24. Wang M.E., Bai Y.Y., Chen W.P., Markert B., Peng C., Ouyang Z.Y. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China. // *Environmental Pollution.* – 2012. – Vol. 161. – pp. 235–242.

25. Zaks T.V., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Impact of noise, gamma radiation and other geophysical factors on population health. // *Akustika.* – 2019. – Vol. 32. – pp. 206–210.

26. Zhang C.S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. // *Environmental Pollution.* – 2006. – Vol. 142. No. 3. – pp. 501–511.

## References

1. Artyukh E.A., Mazur A.S., Ukrainitseva T.V., Kostyuk L.V. Looking forward to biosorbents future application for ponds' cleaning after emergency oil spills. In: *Proceedings of Saint Petersburg state technological institute (Technical University).* 2014. No. 26. pp. 58–66. (In Russ.)

2. Bekuzarova S.A., Tebieva D., Bekmurzov A.D., Kebalova L.A., Korbesova K.V. Phytoremediation of air toxicity of roads. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 127–136. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009. (In Russ.)

3. Beriev O.G., Zaalishvili V.B. State of atmospheric pollution and morbidity of the population of Vladikavkaz city. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2015. No. 4. pp. 47–56. (In Russ.)

4. Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Burdzieva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Oncology disease rate of Vladikavkaz city population and its interrelation with various factors. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2013. No. 3. pp. 29–38. (In Russ.)

5. Burdzieva O.G., Beriev O.G., Zaks T.V. The influence of environmental factors on the ecological well-being and health of the population of Vladikavkaz. *Vladikavkaz: GPI VSC RAS.* 2019. 247 p. (In Russ.)

6. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining activity influence on environment pollution. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2014. No. 4-2. pp. 8–13. (In Russ.)

7. Byasov K.H., Olisaev V.V., Vagin V.S. Agroecological zoning of the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Vladikavkaz.* 1999. 20 p. (In Russ.)

8. Zaalishvili V.B., Korbesova K.V., Arkhireeva I.G., Ganapathy G.P. Impact of mobile and stationary pollution sources on the geocological state of urbanized territories in the mountain region. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2022. Vol. 14. No. 4. Issue 54. pp. 564–575. DOI 10.21177/1998-4502-2022-14-4-564-575. (In Russ.)

9. Ivanov A.V., Strizhenok A.V., Suprun I.K. Issues of evaluating the effectiveness of the introduced dust screens at the design stage. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 139–152. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.81.009. (In Russ.)

10. Kobrina N.V. Monitoring system of environmental pollution by highway transport. *Environment and industry.* 2016. No. 2. Issue 47. pp. 97–102. (In Russ.)

11. Stogny V.V., Stogny G.A., Lyubimova T.V. Geocological risks of the Krasnodar region: the problem of integrated assessment of the geological hazards degree. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 121–133. (In Russ.)

12. Ushakov I.B. *Fundamentals of aviation and space medicine:* edited by I.B. Ushakov. Moscow. Slovo. 2007. 344 p. (In Russ.)

13. Khaziev F.H., Fatkhiev F.F. Change of biochemical processes in soils under oil pollution and activation of oil decomposition. *Agrochemistry.* 1981. Vol. 1. No. 10. pp. 102–111. (In Russ.)

14. Cherkasova N.G., Verkeev A.V. THE Problem of environmental pollution in the spill of aviation fuel at the airport. *Actual problems of aviation and cosmonautics.* 2018. Vol. 2. No. 4. Issue. 14. pp. 494–496. (In Russ.)

15. Andrade J.A., Augusto F., Jardim I.C.S.F. Bioremediation of soils contaminated by petroleum and its derivatives. *Eclética Química*. 2010. Vol. 35. No. 3. pp. 17–43.
16. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of Geomate*. 2016. Vol. 10. No. 1. pp. 1693–1697.
17. Calori G., Clemente M., De Maria R., Finardi S., Lollobrigida F., Tinarelli G. Air quality integrated modelling in Turin urban area. *Environmental Modelling & Software*. 2006. Vol. 21. No. 4. pp. 468–476.
18. Can A., Leclercq L., Lelong J., Dynamic estimation of urban traffic noise: influence of traffic and noise source representations. *Applied Acoustics*. 2008. Vol. 69. pp. 858–867.
19. McClellan RO Health effects of diesel exhaust: a case study in risk assessment. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1986. Vol. 47. pp. 1–13.
20. Normatov I.Sh., Anderson R., Karimzoda A., Normatov A. Conservation and protection of the Central Asia region highlands water resources is the key to the future development of agriculture and food security. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021. Vol. 13. 469–475. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-469-475.
21. Ohrstrom E., Skanberg A., Svensson H., Gidlof-Gunnarsson A. Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 295. pp. 40–59.
22. Roy S., Gupta S. K., Prakash J., Habib G., Baudh K., Nasr M. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in road dust in the national capital territory (nct) of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. Issue 29. pp. 30413–30425.
23. Silva C.M., Farias T.L., Frey H.C., Roupail N.M. Evaluation of numerical models for simulation of real-world hot-stabilized fuel consumption and emissions of gasoline light-duty vehicles. *Transport. Res.* 2006. Vol. 11. pp. 377–385.
24. Wang M.E., Bai Y.Y., Chen W.P., Markert B., Peng C., Ouyang Z.Y. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China. *Environmental Pollution*. 2012. Vol. 161. pp. 235–242.
25. Zaks T.V., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Impact of noise, gamma radiation and other geophysical factors on population health. *Akustika*. 2019. Vol. 32. pp. 206–210.
26. Zhang C.S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental Pollution*. 2006. Vol. 142. No. 3. pp. 501–511.



УДК 911.9:528.8

DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

Оригинальная статья

## Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России)

**К.В. Мячина**<sup>1,2</sup>, **И.А. Керимов**<sup>2</sup>, **Р.В. Ряхов**<sup>1</sup>, **С.А. Дубровская**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН, Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11, e-mail: mavicsen@gmail.com;

<sup>2</sup> ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100

Статья поступила: 24.11.2023, доработана: 27.02.2024, принята к публикации: 28.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Проблема оценки поглотительного потенциала ландшафтов в отношении диоксида углерода приобретает все большую актуальность в связи с глобальными изменениями климата. Разворачиваются исследования, использующие возможности спутниковых снимков для оценки поглотительной способности ландшафтов и запасов углерода. **Цель работы** – выявить особенности пространственно-временной динамики поглотительной способности российских горнолесных, лесостепных и степных ландшафтов в отношении атмосферного диоксида углерода. **Объекты.** В качестве регионов исследования выбраны Чеченская Республика и центральная часть Оренбургской области, где выделены в общей сложности семь ключевых участков, шесть из которых входят в состав карбонового полигона «Way Carbon». Требовалось, чтобы ключевые участки отличались разнообразием геоэкологических характеристик, охватывая горнолесную, лесостепную и степную природные зоны. **Методы.** Выполнена тематическая обработка продуктов спутникового спектрорадиометра MODIS, что позволило рассчитать ежегодный показатель поглощения углерода (ППУ) за период с 2000 по 2020 гг. Произведено пространственное зонирование территории изучаемых регионов по ППУ, проанализированы временные тренды значений ППУ. Определены характеристики растительного покрова с помощью нормализованного вегетационного индекса NDVI, выполнена корреляция временных рядов значений ППУ со значениями NDVI. **Результаты.** Поглотительная способность ландшафтов Чеченской Республики увеличивается по направлению с севера на юг, отражая зональную смену природно-климатических условий: от степей и полупустынь в северных районах до предгорных луговых степей и горных лесов на юге, через лесостепные ландшафты в центре. В зонах с преобладанием лесов многолетний прирост значений ППУ минимален. Поглотительная способность ландшафтов центральной части Оренбургской области возрастает по направлению с юга на север: от сухой типчаково-ковыльной степи на юге до разнотравно-ковыльной и разнотравно-злаковой степи на севере. Пространственно-временные тренды ППУ в центральной части Оренбургской области не демонстрируют значимых колебаний. Анализ зависимостей между ежегодными средними значениями ППУ и NDVI для ключевых участков не выявил тесной положительной корреляционной связи, однако для лесного участка №5 прослеживается средняя отрицательная корреляция, что укладывается в рамки теории стабилизации и постепенного снижения показателя поглотительной способности в возрастных лесах.

**Ключевые слова:** степные, лесостепные и горнолесные ландшафты, потенциал поглощения углерода, пространственно-временная динамика, данные дистанционного зондирования, Чеченская Республика, Оренбургская область.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках гос. задания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова ФЗНУ-2021-0012 (в части исследования ключевых участков №№ 1-6) и гос. задания Института степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН № ГР АААА-А21-121011190016-1 (в части исследования ключевого участка № 7).

**Для цитирования:** Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Дубровская С.А. Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1):141-151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

---

---

GEOECOLOGY

---

---

DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

Original paper

## Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data (steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples)

K.V. Myachina <sup>1,2</sup>, I.A. Kerimov <sup>2</sup>, R.V. Rakhov <sup>1</sup>, S.A. Dubrovskaya <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 11 Pionerskaya Str., Orenburg 460000, Russian Federation, e-mail: mavicsen@gmail.com;

<sup>2</sup> Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, 100 Ave. H.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation

*Received: 24.11.2023, revised: 27.02.2024, accepted: 28.02.2024*

**Abstract: Relevance.** The problem of assessing the absorption capacity of landscapes for environmental dioxide seems relevant in connection with global climate change. Study is being launched, using the capabilities of satellite images to assess the absorption capacity of landscapes and carbon reserves. **The aim** of the paper is to identify the features of the spatio-temporal dynamics of the absorption capacities of Russian mountain forest, forest-steppe and steppe landscapes in relation to atmospheric dioxide. **Objects.** The Chechen Republic and the central part of the Orenburg region were chosen as the study regions, where a total of seven key plots were identified, six of which are part of the North Caucasus carbon test site "Way Carbon". It was required that the key plots are distinguished by a variety of geocological characteristics, covering mountain forest, forest-steppe and steppe natural zones. **Methods.** Thematic processing of MODIS products was carried out, which made it possible to calculate the annual carbon absorption rate (CAR) of landscapes for the period from 2000 to 2020. Spatial zoning of the studied regions according to CAR was carried out, and time trends of CAR values were analyzed. The characteristics of the vegetation cover were determined using the normalized vegetation index NDVI, and the time series of CAR values were correlated with NDVI. **Results.** The absorption capacity of the Chechen Republic landscapes increases from north to south, reflecting the zonal change in natural and climatic conditions: from steppes and semi-deserts in the northern regions to foothill meadow steppes and mountain forests in the south, through forest-steppe landscapes in the center. In areas with a predominance of forests, the long-term increase in CAR values is minimal. The absorptive capacity of the landscapes of the Orenburg region central part increases from south to north: from the dry fescue-feather grass steppe in the south to the forb-feather grass and forb-grass steppe in the north. The spatiotemporal trends of CAR in the central part of the Orenburg region do not show significant fluctuations. An analysis of the relationships between the annual average values of CAR and NDVI for key plots did not reveal a close positive correlation. However, for forest plot No. 5 an average negative correlation is traced, which fits within the framework of theories of stabilization and a gradual decrease in the absorptive capacity index in aged forests.

**Keywords:** steppe, forest-steppe and mountain forest landscapes, carbon sequestration potential, spatio-temporal dynamics, remote sensing data, Chechen Republic, Orenburg region.

**Acknowledgements:** The work was supported by the state assignment of the Grozny State Oil Technical University FZNU-2021-0012 (regarding the study of key sites No.1-6) and the state assignment of the Steppe Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences of the UB RAS AAAAA-A21-121011190016-1 (regarding the study of key site No.7).

**For citation:** Myachina K.V., Kerimov I.A., Rakhov R.V., Dubrovskaya S.A. Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data (steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 141-151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

## Введение

Глобальная проблема оценки поглотительного потенциала ландшафтов в отношении диоксида углерода приобретает все большую актуальность. Изучение цикла углеродсодержащих газов в различных природных и антропогенных условиях, анализ факторов варибельности объемов диоксида углерода в атмосфере, определение депонирующей способности типов почвенно-растительного покрова являются первоочередными эколого-экономическими задачами [Lewis, Maslin, 2015; Gleckler et al., 2016; Guo et al., 2017]. Доказано, что показатели поглощения и эмиссии CO<sub>2</sub> обусловлены, в основном, такими факторами, как природно-климатические условия местности, в первую очередь – особенностями почвенно-растительного покрова [Raich, Schlesinger, 1992; Lal, 2007; Махныкина и др., 2020]. Фотосинтез наземной фитомассой считается на данный момент наиболее рентабельным способом улавливания диоксида углерода [Chen et al., 2020; Lv et al., 2020].

В настоящее время разворачиваются исследования, использующие возможности спутниковых снимков для оценки поглотительной способности ландшафтов и запасов углерода. Установлено, что спектральные индексы, отражающие биофизические параметры растительной биомассы, положительно коррелируют с депонированием углерода [Yusandi et al., 2018; Wani et al., 2021] и отрицательно – с содержанием углерода в атмосфере [Lv et al., 2020; Marelign, Mekonen, 2022]. Существующие режимы и циклы космической съемки позволяют обеспечить точные регулярные замеры прироста наземной фитомассы и расчеты значений фотосинтеза. Полученная информация используется для вычисления показателей поглощения углерода в различных природно-климатических условиях [Schubert et al., 2010; Gelybó et al., 2013; Kross et al., 2013].

Цель работы – выявить особенности пространственных изменений и временной динамики поглотительной способности российских горнолесных, лесостепных и степных ландшафтов в отношении атмосферного диоксида углерода. Результаты будут обладать научной новизной и потенциалом в аспекте расширения и детализации направления исследований связи зональных характеристик ландшафтов с их возможностями поглощать углерод из атмосферы.

## Методы исследования

В качестве регионов исследования выбраны Чеченская Республика и центральная часть Оренбургской области. Территория Чеченской Республики находится в пределах двух крупных физико-географических стран – Восточно-Европейской равнины и Крымско-Кавказской горной страны и характеризуется большим разнообразием природных ландшафтов: от полупустынных – на севере до нивально-гляциальных – на юге [Гуния и др., 2022]. Центральная часть Оренбургской области

расположена в степной зоне, где сменяют друг друга классические подзоны, включая типичную степь и южную сухую степь. Эти особенности также предполагают новизну и практическую значимость результатов исследования.

Для объективности и детализации выводов в регионах исследования выделены ключевые участки: шесть участков на территории Чеченской Республики, входящих в состав карбонового полигона «Way Carbon» [Гуния и др., 2022; Гуния и др., 2023; Керимов, Эльжаев, 2023], и один участок в Оренбургской области. Требовалось, чтобы выделенные ключевые участки отличались разнообразием геоэкологических характеристик, охватывая горнолесную, лесостепную и степную зоны (табл.1).

*Таблица 1 / Table 1*

**Краткая характеристика ключевых участков исследования /  
Brief description of the key study plots**

№ участка, название, местоположение / Plot number, name, location	Площадь, га / Area, ha	Преобладающие типы ландшафтов / The prevailing types of landscapes
1. «Ханкала» (Кампус), Чеченская Республика / «Khankala» (Campus), Chechen Republic	18	Низкогорные лесостепные ландшафты / Low-altitude forest-steppe landscapes
2.«Карбоновая ферма», Чеченская Республика / «Carbon Farm», Chechen Republic	23	Горные степи Алханчуртской долины, разнотравно-злаковые степи / Mountain steppes of the Alkhanchurt valley, grass-grass steppes
3.«Толстой-Юрт», Чеченская Республика / «Tolstoy-Yurt», Chechen Republic	94	Низкогорные лесостепные ландшафты на северном склоне Терского хребта / Low-mountain forest-steppe landscapes on the northern slope of the Tersk ridge
4.«Старопромысловский», Чеченская Республика / «Staropromyslovskiy», Chechen Republic	41	Естественные и залежные степи межгорной котловины Терско-Сунженской возвышенности / Natural and fallow steppes of the intermountain basin of the Tersko-Sunzhenskaya upland
5.«Рошни-Чу», Чеченская Республика / «Roshni-Chu», Chechen Republic	243	Горно-лесная зона низкогорных ландшафтов на северном макросклоне Лесистого (Чёрногорского) хребта / Mountain-forest zone of low-mountain landscapes on the northern macroslope of the Forested (Chernogorsky) ridge
6.«Галанчожд», Чеченская Республика / «Galanchozh», Chechen Republic	51	Горно-луговолесные и горно-луговостепные ландшафты между отрогами Скалистого и Бокового хребтов / Mountain-meadow forest and mountain-meadow steppe landscapes between the spurs of the Rocky and Lateral ridges
7 Никольская степь, Оренбургская область / Nikolskaya steppe, Orenburg region	190	Сухостепные ландшафты с полыньково-тырсово-типчаково-ковыльной растительностью / Dry steppe with polynkovotyrsovo-tipchakovo-kovyl vegetation



В первую очередь, с учетом имеющихся рекомендаций [Heinsch et al., 2015], была выполнена тематическая обработка доступных данных дистанционного зондирования Земли – продуктов спутникового спектрорадиометра *MODIS*, что позволило рассчитать ежегодный показатель поглощения углерода (ППУ) растительным покровом в регионах исследования за период с 2000 по 2020 гг. На основе полученных значений произведено пространственное зонирование территории изучаемых регионов по ППУ, а также проанализированы временные тренды значений ППУ для семи ключевых участков. Для регионов исследования и участков определены характеристики растительного покрова с помощью нормализованного вегетационного индекса *NDVI* [Rouse et al., 1974], рассчитанного по снимкам спутников *Land-sat*, выполнена корреляция временных рядов значений ППУ со значениями рядов *NDVI*.

### Результаты и обсуждение

Пространственное распределение средних за исследуемый период значений показателя поглощения углерода растительным покровом в регионах исследования представлено на рисунках 1, 2.

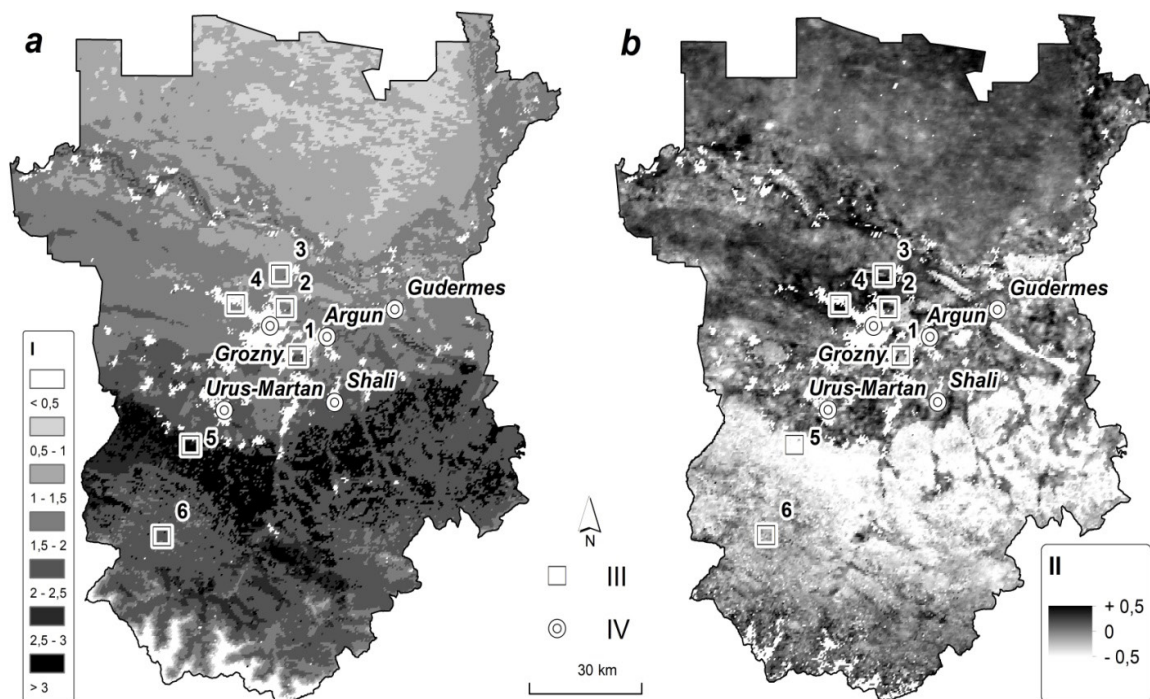
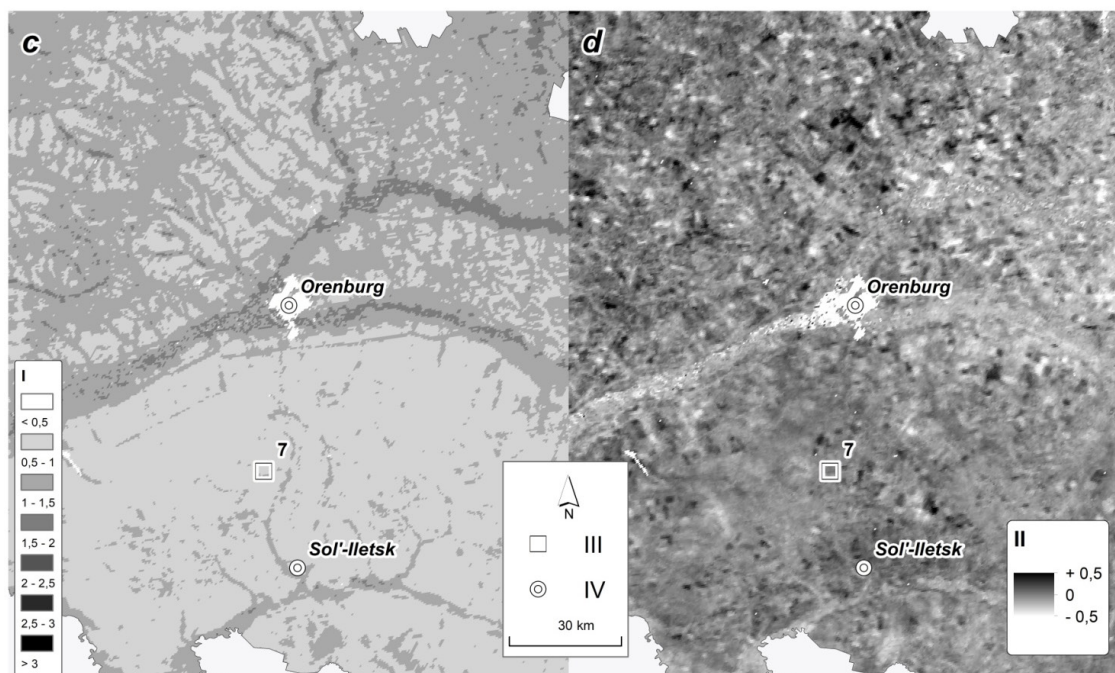


Рис. 1. Пространственное распределение на территории Чеченской Республики:  
 а) средних значений показателя поглощения углерода ( $\text{kgC}/\text{m}^2/\text{год}$ ),  
 б) трендов значений показателя поглощения углерода за период с 2000 по 2020 гг.;  
 I – диапазоны значений ППУ; II – черно-белый градиент тренда ППУ; III – ключевые участки исследования №№ 1-6; IV – населенные пункты /

Fig. 1. Spatial distribution on the territory of the Chechen Republic:  
 а) average values of the carbon absorption index ( $\text{kgC}/\text{m}^2/\text{year}$ ),  
 б) trends in the values of the carbon absorption index for the period from 2000 to 2020;  
 I – ranges of values of the carbon absorption index; II – black-and-white gradient of the carbon absorption index trend; III – key study plots No. 1-6; IV – settlements



*Рис. 2. Пространственное распределение в центральной части Оренбургской области: c) средних значений показателя поглощения углерода ( $\text{кгС}/\text{м}^2/\text{год}$ ), d) трендов значений показателя поглощения углерода за период с 2000 по 2020 гг.; I – диапазоны значений ППУ; II – цветовой градиент тренда ППУ; III – ключевой участок исследования №7; IV – населенные пункты /*

*Fig. 2. Spatial distribution on the territory of the Orenburg region: a) average values of the carbon absorption index ( $\text{kgC}/\text{m}^2/\text{year}$ ), b) trends in the values of the carbon absorption index for the period from 2000 to 2020; I – ranges of values of the carbon absorption index; II – black-and-white gradient of the carbon absorption index trend; III – key study plot No. 7; IV – settlements*

Рисунок 1 в части *a* демонстрирует, что в масштабе региона поглотительная способность наземной фитомассы ландшафтов Чеченской Республики увеличивается по направлению с севера на юг, отражая зональную смену природно-климатических условий: от степей и полупустынь в северных районах, где значения ППУ представлены в диапазоне от 0,5 до 1  $\text{кгС}/\text{м}^2/\text{год}$ , до предгорных луговых степей и горных лесов на юге, где значения ППУ превышают 3  $\text{кгС}/\text{м}^2/\text{год}$ . В то же время, в части *b* рисунка 1, визуализирующей пространственно-временные тренды ППУ, видно, что в зонах с преобладанием лесов многолетний прирост значений ППУ минимален и не превышает 0,5  $\text{кгС}/\text{м}^2/\text{год}$ . Существующие гипотезы объясняют это как снижением поглотительной способности в возрастных лесах за счет стабилизации валовой первичной продуктивности и непрерывного повышения автотрофного дыхания [Kira, Shidei, 1967], так и тем, что снижение поглотительной способности в многолетних лесах в первую очередь обусловлено снижением валовой первичной продуктивности, которая с возрастом уменьшается быстрее, чем автотрофное дыхание, но соотношение поглотительной способности и валовой первичной продуктивности остается примерно постоянным в пределах экосистемы [Tang et al., 2014]. Так или иначе, особенности поглотительной способности лесов – ее снижение у возрастного леса на фоне повышения или очень слабое снижение автотрофного дыхания – нельзя не принимать во внимание при построении прогнозных моделей и сценариев улавливания углерода в лесных, степных и смешанных экосистемах.

Рисунок 2 в части *c* показывает, что поглотительная способность ландшафтов центральной части Оренбургской области возрастает по направлению с юга на север, отражая зональную смену природно-климатических условий: от сухой типчково-ковыльной степи на юге с ППУ от 0,5 до 1 кгС/м<sup>2</sup>/год до разнотравно-ковыльной и разнотравно-злаковой степи на севере, где максимум ППУ достигает 1,5 кгС/м<sup>2</sup>/год. Пространственно-временные тренды ППУ в центральной части Оренбургской области не демонстрируют каких-либо значимых колебаний (рис. 2 в части *d*). Такая однородность (за исключением локальных пиков, привязанных к зонам антропогенного воздействия), связана, прежде всего, с условным однообразием растительного покрова, сохраняющимся, несмотря на смену подзональных вариантов.

Особый интерес представляют временные тренды ППУ на ключевых участках исследования (рисунок 3).

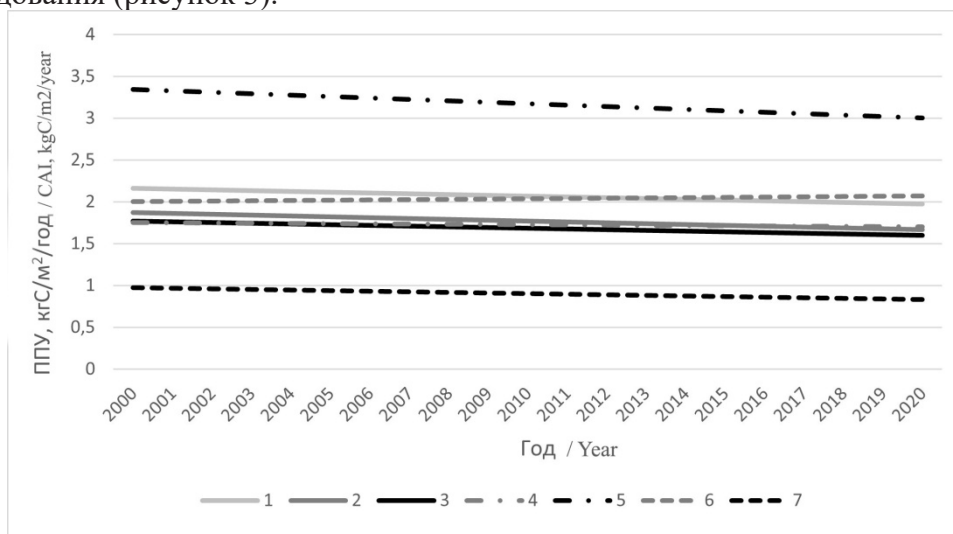


Рис. 3. Временные тренды значений показателя поглощения углерода растительностью на ключевых участках исследования №№ 1-7 /

Fig. 3. Time trends in the values of the carbon absorption index by vegetation in key plots of the study No. 1-7

Наблюдается явная тенденция к снижению объемов поглощаемого углерода на облесенном участке №5. Это согласуется с вышеприведенными теориями стабилизации и снижения показателя поглотительной способности в возрастных лесах за одно и более десятилетий. На фоне максимальной поглотительной способности лесов актуализируется вопрос о том, каков нижний порог, до которого могут опуститься значения ППУ на лесном участке №5 при неизменном состоянии лесных массивов в следующие десятилетия.

Не менее интересна нисходящая линия тренда ППУ на сухостепном участке №7. Судя по всему, на участках залежных или естественных многолетних степей действует аналогичный механизм стабилизации и постепенного снижения поглотительной способности.

На остальных участках исследования №№1-4 и №6 линии трендов либо стабильны, либо слабоотрицательны. Можно объяснить это разнородностью растительного покрова и систематическо-периодическим антропогенным воздействием, способствующим обновлению растительного покрова.

Динамика показателей *NDVI* по ключевым участкам за период наблюдений отображена на рис. 4.

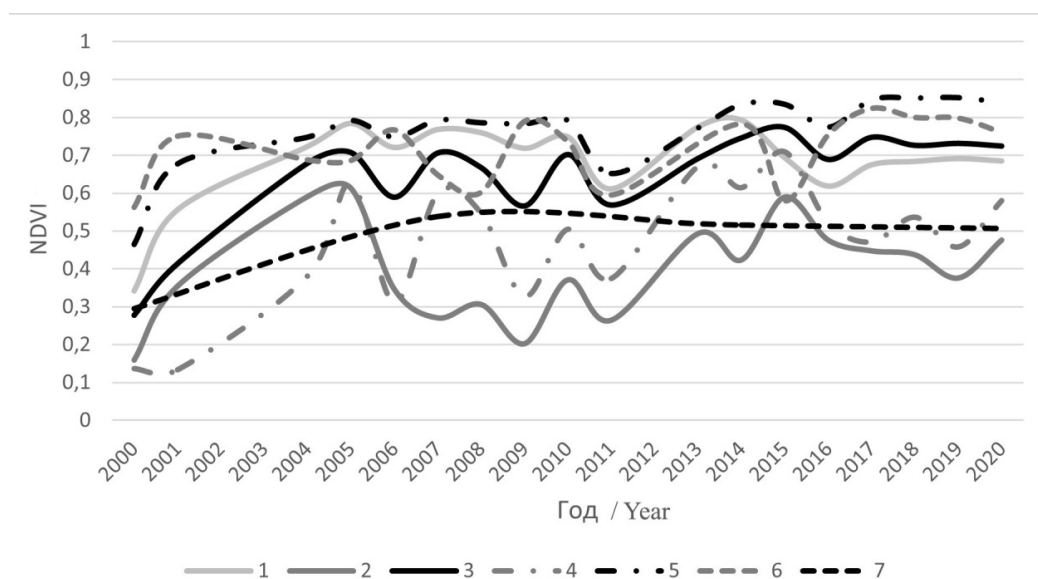


Рис. 4. Динамика показателей *NDVI* на ключевых участках исследования /

Fig. 4. Dynamics of *NDVI* indicators in key plots of the study

Можно выделить следующие особенности изменения вегетационного индекса на ключевых участках:

- на лесостепных участках №1, №3 и луговом участке №6 наблюдается устойчивая амплитуда показателей ( $\pm 0,4$ ) и стремление к их стабилизации в последние 3–4 года изучаемого периода;

- степные, схожие по условиям увлажнения и расположенные недалеко друг от друга участки №2 и №4, отличаются схожей динамикой показателей *NDVI* и высокими амплитудами колебаний их значений;

- низкогорный лесной участок №5 характеризуется максимальным относительно других участков средним значением *NDVI* со стабильным трендом на повышение и наиболее низкой в Чеченской Республике амплитудой колебаний показателей ( $\pm 0,3$ );

- сухостепной участок №7 в Оренбургской области имеет наименьшее среднее многолетнее значение вегетационного индекса при низкой амплитуде колебаний его значений – в последние 14 лет изучаемого периода они почти стабильны.

Анализ зависимости между средними ежегодными значениями ППУ и *NDVI* для каждого участка не выявил тесной положительной корреляционной связи (значения коэффициента корреляции Пирсона находятся в диапазоне от 0,23 до 0,41), однако для лесного участка №5 прослеживается средняя отрицательная корреляция (-0,52). Таким образом, представляется, что неоправданно делать выводы об изменениях способности растительного покрова поглощать углерод, основываясь лишь на колебаниях значений индекса *NDVI*. Этот вегетационный индекс, характеризуя общее состояние наземной фитомассы, не учитывает индивидуальную поглотительную способность растительных фитоценозов. Тем не менее, в случае однородного лесного участка №5, где не происходит систематических антропогенных нарушений и изменений режимов природопользования, небольшая отрицательная корреляция показателей *NDVI* со значениями ППУ укладывается в рамки вышеприведенных теорий стабилизации и постепенного снижения показателя поглотительной способности в возрастных лесах.



## Выводы

В масштабах регионов поглотительная способность ландшафтов изменяется, отражая зональную смену природно-климатических условий: минимальная поглотительная способность отмечается в зонах степей и полупустынь, максимальная – в зонах низкогорных смешанных лесов. Однако способность поглощать углерод на лесном участке будет со временем снижаться, и это необходимо принимать во внимание при построении прогнозных моделей и сценариев улавливания углерода в лесных, степных и смешанных экосистемах. Для определения функциональной зависимости такого снижения от возраста леса требуются дополнительные исследования.

Полученные авторами линии временного тренда позволяют предположить, что на степных участках поглотительная способность также будет со временем снижаться аналогично ситуации с возрастным лесом.

Результаты исследования призваны помочь в разработке решений по оптимизации природопользования в степных, лесостепных и горных ландшафтах.

## Литература

1. Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш., Гагаева З.Ш. Динамика соотношения фракций фитомассы и мортмассы на ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 135–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011.
2. Гуня А. Н., Петрушина М. Н., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Современное состояние ландшафтов эталонных участков карбонового полигона Чеченской Республики. // Рациональное природопользование: традиции и инновации: Материалы III Международной конференции. М.: МГУ, 2022. – С. 170–174.
3. Керимов И.А., Эльжаев А.С., 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.
4. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меньяло О.В., Верховец С.В., Тычков И.И., Урбан А.В., Рубцов А.В., Кошурникова Н.Н., Ваганов Е.А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO<sub>2</sub> из почв в среднетаежных лесах центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы. // Экология. – 2020. – № 1. – С. 51–61. DOI: 10.31857/S0367059720010060.
5. Chen J., Fan W., Li D. et al. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration. // Applied Energy. – 2020. – Vol. 267. – pp. 114914. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114914.
6. Heinsch F., Reeves M., Votava P., Kang S., Milesi C., Nemani R. User's guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm. Version 2.0. – 2003. – pp. 1–57.
7. Gelybó Gy., Barcza Z., Kern A., Kljun N. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. // Agricultural and Forest Meteorology. – 2013. – Vol. 174–175. – pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003.
8. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. // Nature Climate Change. – 2016. – Vol. 6. – No. 4. – pp. 394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
9. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China. // Soil and Tillage Research. – 2017. – Vol. 174. – pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
10. Kira T., Shidei T. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. // Journal of Tropical Ecology. – 1967. – No. 17. – pp. 70–87. DOI: 10.18960/seitai.17.2\_70.
11. Kross A., Seaquist J.W., Roulet N.T. et al. Estimating carbon dioxide exchange rates at

contrasting northern peatlands using MODIS satellite data. // *Remote Sensing of Environment*. – 2013. – Vol. 137. – pp. 234–243. DOI: 10.1016/j.rse.2013.06.014.

12. Lal R. Carbon sequestration. // *Philosophical transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*. – 2007. – Vol. 363. – pp. 815–830. DOI: 10.1098/rstb.2007.2185.

13. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. // *Nature*. – 2015. – Vol. 519. – No. 7542. – pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.

14. Lv Z, Shi Y, Zang S, Sun L. Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration in China and Its Influencing Factors. // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11. – No. 3. – pp. 231. DOI: 10.3390/atmos11030231.

15. Marehgn M.A., Mekonen D.T. Estimating and mapping woodland biomass and carbon using Landsat 8 vegetation index: A case study in Dirmaga Watershed, Ethiopia. // *Computational Ecology and Software*. – 2022. – Vol. 12. – No. 2. – pp. 67–79.

16. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration to vegetation and climate. // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. – 1992. – Vol. 44. – No. 2. – pp. 81–99. DOI: 10.3402/tellusb.v44i2.15428.

17. Rouse J.W, Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. // *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*. – 1974. – No. 1. – pp. 48–62.

18. Schubert P., Eklundh L., Lund M., Nilsson M. Estimating northern peatland CO<sub>2</sub> exchange from MODIS time series data // *Remote Sensing Environment*. – 2010. – Vol. 114. – No. 6. – pp. 1178–1189. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.005.

19. Tang J., Luysaert S., Richardson A. D., Kutsch W., Janssens I. A. Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2014. – Vol. 111. – No. 24. – pp. 8856–8860. DOI: 10.1073/pnas.1320761111.

20. Wani A.A., Bhat A.F., Gatoo A.A., Zahoor S., Mehraj B., Najam N., Wani Q.S., Islam M.A., Murtaza S., Dervash M.A., Joshi P.K. Assessing relationship of forest biophysical factors with NDVI for carbon management in key coniferous strata of temperate Himalayas. // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. – 2021. – Vol. 26. – No. 1. – pp. 1–22. DOI: 10.1007/s11027-021-09937-6.

21. Yusandi S., Jaya I.N.S., Mulia F. Biomass estimation model for mangrove forest using medium-resolution imageries in BSN Co Ltd concession area, West Kalimantan. // *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 15. – No. 1. – pp. 37–50. DOI: 10.30536/j.ijreses.2018.v15.a2683.

## References

1. Gunya A.N., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh., Gagaeva Z.Sh. Dynamics of the ratio of phytomass and mortmass fractions in key areas of the carbon polygon in the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 135–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011. (In Russ.)

2. Gunya A. N., Petrushina M. N., Gayrabekov U. T., Makhmudova L. S. The current state of landscapes of reference sites of the carbon landfill of the Chechen Republic. Rational nature management: traditions and innovations: Materials of the III International Conference. Moscow, MSU. 2022. pp. 170–174. (In Russ.)

3. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Geophysical research at the carbon site of 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.)

4. Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Menyailo O.V., Verkhovets S.V., Tychkov I.I., Urban A.V., Rubtsov A.V., Koshurnikova N.N., Vaganov E.A. The influence of climatic factors on the emission of CO<sub>2</sub> from soils in the middle taiga forests of central Siberia: emission as a function of temperature and soil moisture. *Ecology*. 2020. No. 1. pp. 51–61. DOI: 10.31857/S0367059720010060. (In Russ.)

5. Chen J., Fan W., Li D. et al. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration. *Applied Energy*. 2020. Vol. 267. pp. 114914. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114914.
6. Heinsch F., Reeves M., Votava P., Kang S., Milesi C., Nemani R. User's guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm. Version 2.0. 2003. pp. 1–57.
7. Gelybó Gy., Barcza Z., Kern A., Kljun N. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013. Vol. 174–175. pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003.
8. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6. No. 4. pp. 394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
9. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*. 2017. Vol. 174. pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
10. Kira T., Shidei T. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Journal of Tropical Ecology*. 1967. No. 17. pp. 70–87. DOI: 10.18960/seitai.17.2\_70.
11. Kross A., Seaquist J.W., Roulet N.T. et al. Estimating carbon dioxide exchange rates at contrasting northern peatlands using MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 137. pp. 234–243. DOI: 10.1016/j.rse.2013.06.014.
12. Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*. 2007. Vol. 363. pp. 815–830. DOI: 10.1098/rstb.2007.2185.
13. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. *Nature*. 2015. Vol. 519. No. 7542. pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.
14. Lv Z, Shi Y, Zang S, Sun L. Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration in China and Its Influencing Factors. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. No. 3. pp. 231. DOI: 10.3390/atmos11030231.
15. Marelign M.A., Mekonen D.T. Estimating and mapping woodland biomass and carbon using Landsat 8 vegetation index: A case study in Dirmaga Watershed, Ethiopia. *Computational Ecology and Software*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 67–79.
16. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration to vegetation and climate. *Tellus B: Biometeorological and Physical Meteorology*. 1992. Vol. 44. No. 2. pp. 81–99. DOI: 10.3402/tellusb.v44i2.15428
17. Rouse J.W, Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*. 1974. No. 1. pp. 48–62.
18. Schubert P., Eklundh L., Lund M., Nilsson M. Estimating northern peatland CO<sub>2</sub> exchange from MODIS time series data. *Remote Sensing Environment*. 2010. Vol. 114. No. 6. pp. 1178–1189. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.005.
19. Tang J., Luysaert S., Richardson A. D., Kutsch W., Janssens I. A. Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. No. 24. pp. 8856–8860. DOI: 10.1073/pnas.1320761111.
20. Wani A.A., Bhat A.F., Gatoo A.A., Zahoor S., Mehraj B., Najam N., Wani Q.S., Islam M.A., Murtaza S., Dervash M.A., Joshi P.K. Assessing relationship of forest biophysical factors with NDVI for carbon management in key coniferous strata of temperate Himalayas. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2021. Vol. 26. No. 1. pp. 1–22. DOI: 10.1007/s11027-021-09937-6.
21. Yusandi S., Jaya I.N.S., Mulia F. Biomass estimation model for mangrove forest using medium-resolution imageries in BSN Co Ltd concession area, West Kalimantan. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*. 2018. Vol. 15. No. 1. pp. 37–50. DOI: 10.30536/ijreses.2018.v15.a2683.

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011

Оригинальная статья

## Извлечение металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд с активацией процессов путем комбинирования химической и механической энергии

**В.И. Голик**<sup>1,2</sup>, **О.Г. Бурдзиева**<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Россия, 107023,  
г. Москва, Б. Семеновская, 38

Статья поступила: 29.11.2023, доработана: 28.02.2024, принята к публикации: 01.03.2024

**Резюме:** Актуальность темы исследования объясняется необходимостью поиска инновационных способов извлечения металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд, в том числе, с активацией процессов извлечения металлов путем комбинирования химической и механической энергии. **Методика** достижения поставленной цели позволяет оценить возможности глубокой переработки в условиях горных предприятий различных отраслей и определить эколого-экономический эффект реализации новых технологий. **Результаты.** Сформулирована концепция глубокой переработки некондиционного минерального сырья, решающая одновременно и экологические и экономические проблемы разработки месторождений. Предложена математическая модель процесса выщелачивания металлов из некондиционных руд и хвостов их обогащения с повышением их технологических свойств активацией в дезинтеграторе. Предложена интегральная экономико-математическая модель процесса и расчет экономического эффекта вариантов вовлечения некондиционного минерального сырья в производство. Экспериментально подтверждено, что интенсификация процессов выщелачивания металлов достигается использованием возможностей дезинтегратора. Показано, что уменьшение содержания металлов с увеличением глубины работ будет удорожать стоимость товарных продуктов. Определено, что перспективным направлением извлечения металлов из некондиционного сырья является комбинированное химическое обогащение и механическая активация в рабочем органе дезинтегратора. Выщелачивание в дезинтеграторе существенно увеличивает извлечение металлов в раствор и открывает возможность безотходного производства металлов при не-однократной переработке сырья. Методы извлечения металлов выщелачиванием некондиционного сырья получают развитие на ряде горных предприятий. Концепция глубокой переработки некондиционного минерального сырья реализуется путем применения математических моделей и пакета программного обеспечения.

**Ключевые слова:** металл, извлечение, активация, математическая модель, дезинтегратор, интенсификация, эффективность.

**Для цитирования:** Голик В.И., Бурдзиева О.Г. Извлечение металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд с активацией процессов путем комбинирования химической и механической энергии. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 152-161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011



DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011

Original paper

# Extraction of metals from low-grade raw materials and ore processing tailings with process activation by combining chemical and mechanical energy

V.I. Golik<sup>1,2</sup>, O.G. Burdzieva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e mail: v.i.golik@mail.ru;

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation;

Received: 29.11.2023, revised: 28.02.2024, accepted: 01.03.2024

**Abstract:** The relevance of the research is explained by the need to find innovative ways to extract metals from low-grade raw materials and tailings of ore processing tailings, including activation of metal extraction processes by combining chemical and mechanical energy. **Methods.** The methodology for achieving this aim makes it possible to assess the possibilities of deep processing in the conditions of mining enterprises of various industries and determine the ecological and economic effect of the implementation of new technologies. **Results.** The concept of deep processing of substandard mineral raw materials has been formulated, which simultaneously solves both environmental and economic problems of field development. A mathematical model of the process of extracting metals from substandard ores and enrichment tailings with an increase in their technological properties by activation in a disintegrator is proposed. An integrated economic and mathematical model of the process and calculation of the economic effect of options for involving substandard mineral raw materials in production are proposed. It has been experimentally confirmed that the intensification of metal leaching processes is achieved by using the capabilities of the disintegrator. It is shown that a decrease in the content of metals with an increase in the depth of work will increase the cost of commodity products. It is determined that a promising direction for the extraction of metals from substandard raw materials is combined chemical enrichment and mechanical activation in the operating device of the disintegrator. Leaching in the disintegrator significantly increases the recovery of metals into solution and opens up the possibility of waste-free metal production with repeated processing of raw materials. Methods for extracting metals by leaching substandard raw materials are being developed at a number of mining enterprises. The concept of deep processing of substandard mineral raw materials is realized through the use of mathematical models and a software package.

**Keywords:** metal, extraction, activation, mathematical model, disintegrator, intensification, efficiency.

**For citation:** Golik V.I., Burdzieva O.G. Extraction of metals from low-grade raw materials and ore processing tailings with process activation by combining chemical and mechanical energy. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 152-161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011

## Введение

Добыча полезных ископаемых отличается масштабностью и применением высокопроизводительной техники. Добыча стратегически важных и ценных руд характеризуется динамичностью, обусловленной конъюнктурой сырья на рынке. Эффективность разработки рудных месторождений связана с размещением предприятий на малоосвоенных территориях [Дмитрак и др., 2019; Валиев и др., 2020; Галачиева и др., 2018].

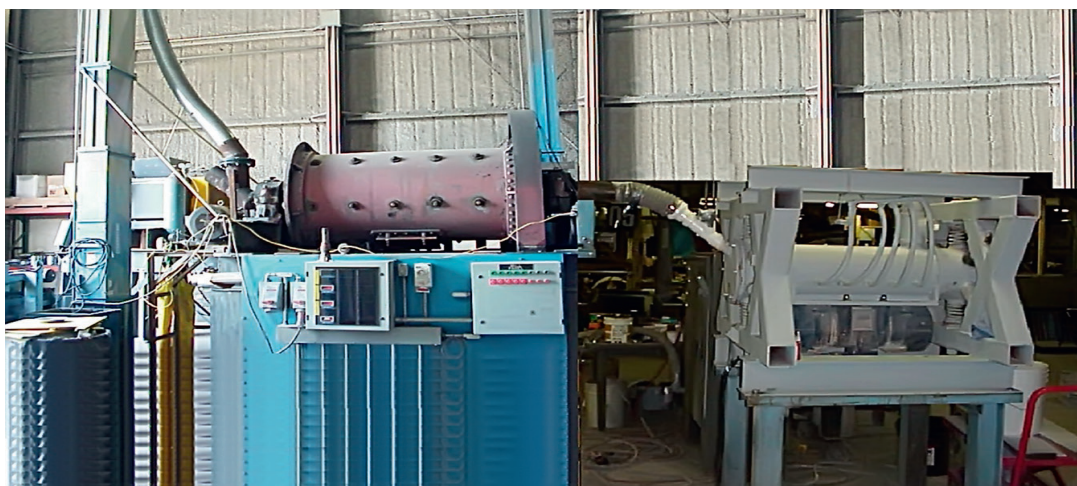
Извлеченное из недр некондиционное минеральное сырье подвержено дезинтеграции, продукты которой формируют концентрации тяжелых металлов и токсичных элементов с негативными последствиями для флоры, фауны и социума [Игнатьева и др., 2021; Ляшенко и др., 2020; Заалишвили и др., 2021; Нуреев и др., 2022; Бурдзиева и др., 2023; Doifode, Matani, 2015].

Хранение извлеченного из недр некондиционного сырья приносит окружающей среде пока еще недостаточно оцениваемый ущерб, поэтому радикальной мерой снижения опасности является его безотходная утилизация. Традиционные обогащательные процессы позволяют выделять из хвостов товарные продукты, но оставляют после себя вторичные хвосты [Hulelidze et al., 2016; Бывальцев и др., 2019; Валиев и др., 2019].

Увеличение объемов хвостов в хранилищах является следствием концепции валовой выемки руд в расчете на прогресс технологий их обогащения на земной поверхности, которая себя не оправдала.

Эффективность предложенной концепции требует экспериментального доказательства, предлагаемых к применению, технологий.

Приоритетным направлением становится оптимизация параметров активации для максимального извлечения металлов при минимальных затратах энергии [Бунин и др., 2017; Рыбак и др., 2021; Чантурия, 2017]. Это осуществляется путем использования активаторов процесса, нередко комбинируемых. Так, в промышленной установке (Пенсильвания, США) комбинировали барабанную мельницу фирмы «Fuller» и вибрационную мельницу фирмы «Micro Grinding Systems, Inc.», США (рис. 1).



*Рис.1. Промышленная установка с комбинированием активаторов /*

*Fig. 1. Industrial plant with activator combinations*

Способом решения проблем безотходного извлечения металлов из некондиционного по содержанию металлов сырья является механохимическая технология, основу которой составляет концепция выщелачивания в быстроходной мельнице – дезинтеграторе [Хинт, 1981; Golik et al., 2020; Golik et al., 2023].

Эта концепция нуждается в практическом и теоретическом обосновании, чему и посвящена статья, содержащая результаты первого в практике горного дела при-

менения реагентного выщелачивания металлосодержащих минералов в дезинтеграторе, осуществленного в Геофизическом институте Владикавказского научного центра РАН (Отдел геологии, гидрогеологии и геоэкологии).

### Методика исследования

Для обоснования целесообразности применения новой технологии использована выпускаемая промышленностью дезинтеграторная установка ДЕЗ-11 (рис. 2).

В основу методики исследований положены программа СКТБ «Дезинтегратор» и практика промышленного использования дезинтеграторной установки на месторождении «Шокпак» (Северный Казахстан).

Этапы комплексных исследований способов реагентного выщелачивания:

- в агитаторах (базовый способ);
- в дезинтеграторе (новый способ).

Свойства руд и параметры их переработки исследованы в ходе переработки хвостов обогащения Мизурской фабрики (РСО–Алания).

Хвосты просеивали и подавали в рабочий орган дезинтегратора. Туда же дозировано подавали реагенты.



1.

*Рис. 2. Лабораторный дезинтегратор Дез-11 /*

*Fig. 2. Laboratory disintegrator Des-11*

По величине изменения содержания в хвостах судили об эффективности выщелачивания свинца и цинка. Принципиальное устройство дезинтегратора для выщелачивания металлов поясняется рис. 3.

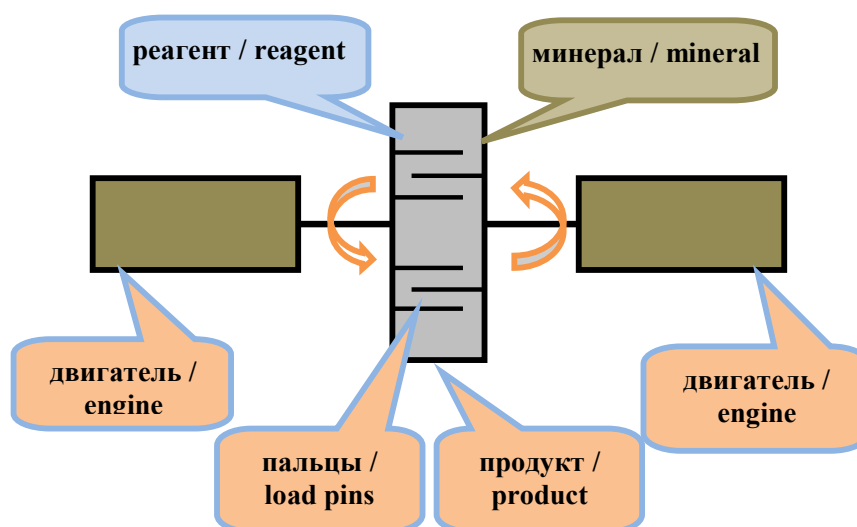


Рис. 3. Принцип выщелачивания металлов в дезинтеграторе /  
Fig.3. Principle of metal leaching in the disintegrator

Эффективность извлечения металлов исследовали сравнением показателей выщелачивания в агитаторе и в дезинтеграторе в течение 60 минут. Результаты опытов интерпретировали графически, а параметры выщелачивания описывали математически.

Порядок проведения экспериментов:

1. Отбор 50 г высушенного материала для единичного эксперимента.
2. Приготовление выщелачивающего раствора заданного состава для единичного эксперимента при данном соотношении Ж:Т.
3. Приготовление пульпы смешением раствора с рудным материалом.
4. Пропуск пульпы через дезинтегратор, роторы которого вращаются с заданной скоростью.
5. Фильтрация продукционного раствора.
6. Анализ содержания металлов в растворе.
7. Фиксирование результатов анализа.
8. Выполнение регрессионного анализа с определением рациональных значений независимых параметров процесса выщелачивания.

Энергетические показатели определяли прибором Н 339 и амперными клещами на электродвигателях дезинтегратора на холостом ходу и во время работы дезинтегратора.

### Результаты исследования

Исследованные варианты выщелачивания различаются тем, что продолжительность агитационного выщелачивания для извлечения одинакового количества металлов на два порядка превышает продолжительность выщелачивания в дезинтеграторе. Из этого можно сделать вывод о том, что выщелачивание в дезинтеграторе эффективнее, чем в агитаторе. При этом необходимо отметить, что во всех вариантах цинк выщелачивается легче, чем свинец.

Прибыль от извлечения металлов из некондиционного сырья может быть определена применением экономико-математической модели:



$$\Pi = \frac{\sum_{i=1}^n (C - Z) Q}{t} + Ш,$$

где  $\Pi$  – прибыль, руб./т;

$C$  – реализация продуктов переработки хвостов, руб./т;

$Z$  – затраты на переработку хвостов, руб./т;

$n$  – номенклатура компонентов хвостов;

$Q$  – масса хвостов, т;

$t$  – продолжительность переработки;

$Ш$  – штрафы за хранение хвостов, руб./год.

Показатели конкурирующих технологий выщелачивания металлов определены для условий Садонских месторождений (Северный Кавказ) путем сопоставления показателей извлечения металлов из богатых руд на фабрике (1), выщелачивания бедных руд в подземных блоках (2) и хвостов флотационного обогащения (3). Моделирование результатов применения технологий разработки осуществлено при условии производства одинакового количества металлов в единицу времени (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Сравнительные показатели вариантов производства металлов /  
Comparative indicators of metal production options**

Показатели / indicators	Единицы / Units	Этапы / Stages		
		1	2	3
Добыто руды / Ore mined	т. т/год / tons t/year	130	240	-
Переработано хвостов обогащения / Tailings processed	т. т/год / tons t/year	-	-	1000
Содержание металлов в сырье / Metal content in raw materials	г/т / g/t	5	3	1
Количество металлов в сырье / Metal volume in raw materials	кг / kg	623	718	1010
Извлечение в концентрат / Extraction into concentrate	%	80	70	50
Добыто металлов в концентрате / Metals extracted in concentrate	кг / kg	510	500	500
Цена концентрата / Concentrate price	руб./кг / rub./kg	300	300	300
Стоимость концентратов / Concentrate cost	т. руб. / t. rub.	150000	150000	150000
Объем горной массы / Volume of rock mass	т. м <sup>3</sup> /год / t. m <sup>3</sup> /year	51	42	-
Образовано хвостов / Tailings produced	т. т/год / tons t/year	96	164	-
Стоимость попутных товаров / Cost of by-products	т. руб. / t. rub.	-	-	30000
Всего стоимость продуктов / Total cost of products	т. руб./год / t. rub./year	150000	150000	180000
Эксплуатационные расходы / Operating costs	руб./т / rub./t	1000	500	170
Расходы на добычу и обогащение / Mining and milling costs	т. руб. / t. rub.	125000	142000	170000
Прибыль на объем производства / Profit per volume of production	т. руб./год / t. rub./year	25000	8000	10000
Прибыль на 1 г товарной продукции / Profit per 1g of marketable product	руб./ г / rub./g	40	18	20
Эффективность производства / Production efficiency	%	145	100	109

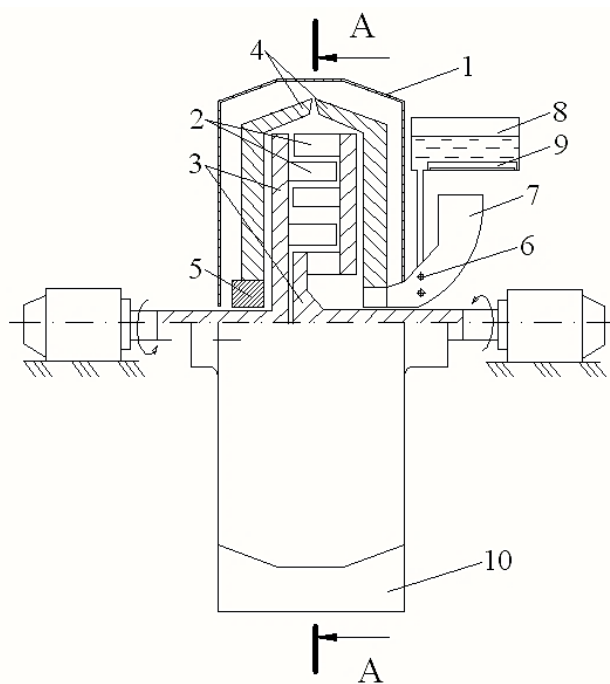
1. Эффективность предлагаемой технологии определяется учетом совокупности технологических, экономических и экологических факторов.

2. Эколого-экономическая модель для определения эффективности утилизации некондиционного сырья объединяет экологический и экономический компоненты в рамках единой системы.

Эффективность переработки в дезинтеграторе повышают совмещением механической активации с увеличением температуры процесса (рис. 4).

В рабочей камере дезинтегратора сырье смешивается с жидкостью, подогретой до температуры 90...95 °С, под действием центробежных сил проникает сквозь ряды пальцев и отбрасывается на внешний диск, где частицы нужной крупности удаляются. Частицы же большего размера измельчаются дисками и вновь поступающими частицами.

Эффективность механохимической активации процессов выщелачивания доказана экспериментально при извлечении металлов из хвостов обогащения полиметаллических руд Садона, углей Российского Донбасса и железистых кварцитов Курской магнитной аномалии, где извлечение металлов в раствор достигало 70% от исходного содержания. Важно, что снижение содержания металлов до фонового уровня возможно при увеличении циклов переработки.



*Рис. 4. Усовершенствованная конструкция дезинтегратора: 1 – корпус; 2 – пальцы; 3 – внутренний диск; 4 – внешний диск; 5 – механизм управления; 6 – форсунки; 7 – патрубок; 8 – емкость с жидкостью; 9 – нагревательный элемент; 10 – выпускное отверстие / Fig. 4. Improved design of the disintegrator: 1 – body; 2 – load pins; 3 – inner disk; 4 – outer disk; 5 – control mechanism; 6 – nozzles; 7 – pipe; 8 – reservoir with liquid; 9 – heating element; 10 – outlet opening.*

Основополагающие принципы рационализации техногенного цикла горно-металлургического предприятия изложены в ряде работ специалистов России [Петров и др., 2020; Бригида и др., 2020; Хайрутдинов и др., 2020] и Зарубежья [Lagneau et al., 2019; Löw et al., 2019].

## Выводы

Возможность выщелачивания металлов из некондиционного сырья впервые в горной практике доказана экспериментами в дезинтеграторной установке ДЕЗ-11 в Отделе геологии, гидрогеологии и геоэкологии Геофизического института ВНЦ РАН.

Показатели механохимического выщелачивания могут быть улучшены за счет увеличения времени переработки.

Параметры безотходной переработки сырья в дезинтеграторе с использованием комбинированной механохимической активации описываются экономико-математической моделью.

## Литература

1. Бригида В.С., Кожиев Х.Х., Сарян А.А., Джиева А.К. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 4. С. 20–32.
2. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л., Хабарова И.А. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии. // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 134–139.
3. Бурдзиева О.Г., Козырев Е.Н., Кортиев А.Л., Ревазов М.О. Особенности формирования геоэкологических рисков горной территории на основе анализа причинно-следственных связей геодинамических эндогенных и экзогенных процессов. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010.
4. Бывальцев А.В., Шарипов Р.Х., Васильев Е.А., Рудой Г.Н. Разработка рациональной технологии извлечения золота из хвостов Учалинской обогатительной фабрики. // Обогащение руд. – 2019. № 5. – С. 46–51.
5. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 8. – С. 130–143.
6. Валиев Х.Х., Бугубаева А.У., Амандыкова А.Б., Булаев А.Г. Выщелачивание урана и молибдена из руды месторождения «Восток». // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – №. 4. – С. 92–99.
7. Галачиева С.В., Соколов А.А., Соколова О.А., Махошева С.А. Система оценки устойчивого развития региональных народнохозяйственных комплексов горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. № 3. – С. 329–335.
8. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. // Вектор ГеоНаук. – 2019. – Т. 2. № 1. – С. 9–18.
9. 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.
10. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к экономике замкнутого цикла. // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6. № 2. – С. 73–89.
11. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. // Горные науки и технологии. – 2020. Т. 5. № 2. – С. 104–118.
12. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.
13. Петров Ю.С., Хадзарагова Е.А., Соколов А.А., Шарипзянова Г.Х., Таскин А.В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенно-

го цикла горно-металлургического предприятия. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 178–188.

14. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. № 3. – С. 406–415.

15. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсо-возобновляемых технологий. // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 57–62.

16. Хинт И.А. УДА–технология: проблемы и перспективы. – Таллин: Валгус. 1981. 36 с.

17. Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья. // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 67–84.

18. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. // International Journal of Chemical and Physical Sciences. – 2015. – Vol. 4. Special Issue. NCSC. – pp. 536–540.

19. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020. – No. 5. – pp. 47–54.

20. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant. // Metallurgist. – 2023. – Vol. 66. Nos. 11-12. – pp. 1476–1480.

21. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2016. – Vol. 8. No. 1. – pp. 46–51.

22. Lagneau V., Regnault O., Descostes M. Industrial Deployment of Reactive Transport Simulation: An Application to Uranium In situ Recovery. // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2019. – Vol. 85. Issue 1. – pp. 499–528.

23. Lööw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – Vol. 36. Issue 4. – pp. 701–707.

## References

1. Brigida V.S., Kozhiev Kh.Kh., Saryan A.A., Dzhoieva A.K. Time-space problems in geoecology: An inter-disciplinary approach. Mining informational and Analytical Bulletin. 2020. No 4. pp. 20–32. (In Russ.)

2. Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Samusev A.L., Khabarova I.A. Composite physicochemical and energy action on geomaterials and aqueous slurries: theory and practice. Mining Journal. 2017. No. 11. pp. 134–139. (In Russ.)

3. Burdzieva O.G., Kozyrev E.N., Kortiev A.L., Revazov M.O. Features of formation of geoecological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13 No. 4. pp. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010. (in Russ.)

4. Byvaltsev A.V., Sharipov R.Kh., Vasilyev E.A., Rudoy G.N. Development of a sustainable technology for the recovery of gold from the tailings of the Uchalinsky concentrating plant. Mineral processing Journal. 2019. No. 5. pp. 46–51. (In Russ.)

5. Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshev A.M. The 100th anniversary of the department of mining engineering of URSMU. Minerals and mining engineering. 2020. No. 8. pp. 130–143. (In Russ.)

6. Valiyev Kh.Kh., Bugubayeva A.U., Amandykova A.B., Bulaev A.G. Uranium and molybdenum leaching from the ore of “Vostok” deposit. Izvestiya Tula State University. 2019. No. 4. pp. 92–99. (In Russ.)



7. Galachieva S.V., Sokolov A.A., Sokolova O.A., Makhosheva S.A. Estimation system of sustainable development of regional national-economic complexes of mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018. Vol. 10. No. 3. pp. 329–335. (In Russ.)
8. Dmitrak Y.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Z. Mineral and raw materials base of nonferrous metallurgy of Russia. *Vector of geosciences*. 2019. Vol. 2. No. 1. pp. 9–18. (In Russ.)
9. Zaalishvili V.B., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Dzobelova L.V. Development of cancerogenic risk index maps for the territory of 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.)
10. Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining science and technology*. 202. Vol. 5. No. 2. pp. 73–89. (In Russ.)
11. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environment-friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining science and technology*. 2020. Vol. 5. No. 2. pp. 104–118. (In Russ.)
12. Nureev R.R., Pashkevich M.A., Kharko P.A. Assessment of the impact of Copper Ore Enrichment Waste on Surface and Groundwater. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (No. 4. pp. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013. (in Russ.)
13. Petrov Yu.S., Khadzaragova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.Kh., Taskin A.V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy: Outlines. *Mining informational and Analytical Bulletin*. 2020. Nos. 11-1. pp. 178–188. (In Russ.)
14. Rybak YA., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021. Vol. 13. No. 3. pp. 406–415. (In Russ.)
15. Khayrutdinov M.M., Kaung P.A., Chzho Z.Ya., Tyulyaeva Yu.S. Ensuring environmental safety in the implementation of the resource-renewable technologies. *Occupational Safety in Industry*. No. 5. pp. 57–62. (In Russ.)
16. Hint I.A. UDA-technology: problems and prospects. Tallinn, Valgus. 1981. 36 p. (In Russ.)
17. Chanturia V.A. Scientific substantiation and development of innovative approaches to integrated mineral processing. *Mining Journal*. 2017. No. 11. pp. 67–84. (In Russ.)
18. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015. Vol. 4. Special Issue. NCSC. pp. 536–540.
19. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 5. pp. 47–54.
20. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for non-waste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. Nos. 11-12. pp. 1476–1480.
21. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8. No. 1. pp. 46–51.
22. Lagneau V., Regnault O., Descostes M. Industrial Deployment of Reactive Transport Simulation: An Application to Uranium In situ Recovery. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2019. Vol. 85. Issue 1. pp. 499–528.
23. Lööw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019. Vol. 36. Issue 4. pp. 701–707.

DOI: 10.46698/VNC.2024.56.13.012

Original paper

## Investigating the geothermal energy potential of Absheron region for electricity generation using binary cycle technology

P.Y. Mammadov 

Institute of Geology and Geophysics,  
Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,  
29a Guseyn Javid Str., Baku AZ1143, Azerbaijan,  
e-mail: pervizmmmdv@gmail.com

Received: 25.08.2023, revised: 15.02.2024, accepted: 16.02.2024

**Abstract: Relevance.** Geothermal energy offers a clean and sustainable alternative to fossil fuels for electricity and heat generation. This study explores the potential for utilizing geothermal energy alongside existing oil production in the Bibiheybat field, Azerbaijan. **The aim of this work** is to assess the geothermal energy potential of the Bibiheybat field and evaluate its feasibility for electricity generation. **Methods.** The study analyzes well flow rates, temperatures, and pressure distributions within the X stratum of the field. Temperature and pressure distribution models are developed using Surfer software. Geothermal energy potential is calculated based on well data and formula application. Binary cycle technology is proposed for electricity conversion. **Results.** The X stratum exhibits an anticlinal fold structure with varying well depths and temperatures (46-24°C). The geothermal energy potential of the field is estimated at 307,578.56 kWh, with 25,090.15 kWh carried by oil and 282,488.41 kWh by water. Utilizing a binary cycle power plant, approximately 107,652.49 kWh of electrical energy could be generated.

**Keywords:** geothermal energy, temperature distribution, pressure distribution, geothermal energy potential, binary cycle power plant, electricity generation.

**For citation:** Mammadov P.Y. Investigating the geothermal energy potential of Absheron region for electricity generation using binary cycle technology. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 162-171. DOI: 10.46698/VNC.2024.56.13.012

УДК 550.367

DOI: 10.46698/VNC.2024.56.13.012

Оригинальная статья

# Исследование геотермального энергетического потенциала Апшеронского района для производства электроэнергии с использованием технологии бинарного цикла

П.Я. Мамедов 

Институт геологии и геофизики, Министерство науки и образования Республики Азербайджана, Республика Азербайджан, AZ1143, г. Баку, ул. Гусейна Джавида, 29а,  
e-mail: pervizmmmdv@gmail.com

Статья поступила: 25.08.2023, доработана: 15.02.2024, принята к публикации: 16.02.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Геотермальная энергия представляет собой экологически чистую и устойчивую альтернативу ископаемому топливу для производства электричества и тепла. В данном исследовании рассматривается потенциал использования геотермальной энергии наряду с существующей добычей нефти на месторождении Бибихейбат, Азербайджан. **Целью данной работы** является оценка геотермального энергетического потенциала месторождения Бибихейбат и его целесообразности для производства электроэнергии. **Методы.** В исследовании анализируются дебиты скважин, температура и распределение давления в пласте X месторождения. Модели распределения температуры и давления разработаны с помощью программы Surfer. Потенциал геотермальной энергии рассчитан с применением формул на основе данных скважин. Для преобразования электроэнергии предложена технология бинарного цикла. **Результаты.** Пласт X демонстрирует антиклинальную складчатую структуру с различной глубиной скважин и температурой (24–46°C). Геотермальный энергетический потенциал месторождения оценивается в 307578,56 кВт ч, из которых 25090,15 кВт ч приходится на нефть, а 282488,41 кВт ч – на воду. При использовании электростанции бинарного цикла может быть выработано около 107652,49 кВт ч электроэнергии.

**Ключевые слова:** геотермальная энергия, распределение температуры, распределение давления, потенциал геотермальной энергии, электростанция бинарного цикла, производство электроэнергии.

**Для цитирования:** Мамедов П.Я. Исследование геотермального энергетического потенциала Апшеронского района для производства электроэнергии с использованием технологии бинарного цикла. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 162-171. DOI: 10.46698/VNC.2024.56.13.012

## Introduction

**Geothermal power plants.** Geothermal energy is a renewable source of electricity and heat that can meet base load demand. As a result, they can help reduce greenhouse gas emissions by replacing fossil fuel energy sources in heat and electricity generation [Ugochukwu, 2013; European Commission, 2012; Quick et al., 2010; Lundin et al., 2014]. The potential for geothermal energy is enormous, as 99% of the Earth's surface is hotter than 1,000°C and 99% of the remaining 1% has temperatures above 100 °C [Quick et al., 2010]. Thermal energy stored beneath the Earth's crust has the potential to supply all of humanity's energy needs today [Koroneos et al., 2013]. The most appealing aspect of geothermal power plants is their high dependability and ability to run at high load

and capacity factors, with system reliability averaging 95% and an average load factor of more than 95% [Kabeyi et al., 2021a; Kabeyi, 2019]. However, geothermal power plants account for less than 1% of worldwide electrical capacity and have a much slower rate of capacity expansion than other renewable energy sources [Kabeyi et al., 2020a; Kabeyi et al., 2020c]. For example, between 2005 and 2020, average annual capacity growth was only 4.01% [Kabeyi et al., 2021a; Kabeyi, 2019]. High temperature and enthalpy geothermal resources can be utilized to generate energy, but they require the extraction of geothermal fluid from depths typically greater than 3 kilometers beneath the Earth's crust. The conversion technology varies from steam field to steam field, and in the case of wellhead power generation, it may differ from well to well, depending on well characteristics and use.

Following the successful drilling and testing of an exploratory well, a decision must be taken regarding the number of production wells to be dug in a specific geothermal steam field to completely exploit the available resource. In a vapor-dominated geothermal system, producing wells are drilled, tested, and connected to a common power plant via a network of insulated steam pipes to supply steam to the power plant. According to output well capacity, tens of geothermal wells may be linked to a line for a 50-55 MW unit, with one or two more wells kept on standby [Windrem et al., 1982]. Drilling wells is costly and time-consuming because wells are frequently drilled one or more at a time, depending on the number of drilling rigs [Ahmadi et al., 2020]. This frequently results in successfully dug and tested geothermal wells sitting idle while other wells required to maintain central power plant operations are completed [Kabeyi et al., 2020a; Kabeyi et al., 2020b]. This provides an opportunity to establish a temporary wellhead power plant.

## Material and methods

**Geothermal conversion technologies.** There are three types of geothermal power plants based on thermodynamic cycles and conversion technology. These include dry steam power plants, flash power plants, and binary, hybrid, or combination cycle power plants. The geothermal fluid parameters dictate the conversion method used [Cao et al., 2021]. The conversion technologies used are common to both central and wellhead power plants [Kabeyi et al., 2020a; Kabeyi, 2019; Cao et al., 2021]. Geothermal resources are classified into three categories: high temperature ( $>150^{\circ}\text{C}$ ), medium temperature ( $90^{\circ}\text{C}$  to  $150^{\circ}\text{C}$ ), and low temperature ( $<90^{\circ}\text{C}$ ) [Cao et al., 2021]. Over 70% of global geothermal resources are in the form of low-enthalpy geothermal fluid. Organic Rankine cycles (ORC) technologies are widely used to convert low-temperature geothermal energy to electricity [Bruhn et al., 1999; Liu et al., 2016; Islamzade, Mammadov, 2023].

The thermodynamic parameters of the steam or geothermal fluid are used to determine technology selection [DiPippo et al., 2007]. The thermodynamic parameters of the resource, particularly temperature, determine its application and energy conversion technique. Non-electrical applications can employ geothermal resources at temperatures ranging from  $40^{\circ}\text{C}$  to  $180^{\circ}\text{C}$  ( $100$ - $350^{\circ}\text{F}$ ) depending on the application [Windrem et al., 1982; Kabeyi et al., 2021b]. Conventional Rankine cycle steam turbines typically operate above  $180^{\circ}\text{C}$  ( $350^{\circ}\text{F}$ ). The operational design of geothermal power plants is similar to that of fossil fuel and nuclear power plants, both of which use the Rankine cycle, with



the exception of the heat source, which is geothermal fluid from the earth transported by production wells and a system of pipes [Dincer et al., 2020].

**Binary power plants.** Binary and Kalina cycles are mostly employed to convert medium-low temperature geothermal resources to electricity [Meng et al., 2020]. In a closed loop cycle, binary cycles use two fluids: geothermal resource fluid and organic fluid [Kabeyi, 2019]. The geothermal fluid passes via a heat exchanger, which transfers heat to a low-temperature boiling fluid that serves as a working fluid [Kabeyi et al., 2020a]. The working fluid vaporizes and expands through a turbine, which rotates and turns a generator to produce electricity. The working fluid is then condensed and circulated through the heat exchanger multiple times. The geothermal fluid that exits the heat exchanger in a single pass is frequently reinjected back into the reservoir [Windrem et al., 1982]. The organic Rankine cycle has been recognized as the optimal cycle for low-temperature thermal energy sources [Herath et al., 2020; Kabeyi, 2020].

Geothermal power plants use various binary cycles depending on the working fluid. They are divided into Organic Rankine cycles, which employ refrigerants or organic fluids, and Kalina and Goswami cycles, which use ammonia mixes [DiPippo et al., 2007]. In organic Rankine power plants, the geothermal fluid heats and pressurizes a secondary fluid with a low boiling temperature and pressure, such as penta-fluoropropane and isobutane, which is typically in a closed cycle with no mixing.

Binary plants are designed to run on two thermodynamic cycles, a geothermal fluid loop and a power cycle loop, and are categorized as organic Rankine Cycle plants or Kalina plants depending on the working fluid [Bonalumi et al., 2017]. Kalina cycles, which use a working fluid of 70% ammonia and 30% water, have a better efficiency and exergy potential than Organic Rankine cycles [Koroneos et al., 2013]. The Kalina cycle is a modified Rankine cycle that incorporates a distillation separator and an absorption recuperator. Alex Kalina invented the cycle back in the 1980s. These power plants are more secure, have fewer capital costs, and are simpler, with applications ranging from 50 to 100 megawatts [Marugun et al., 2008; Shehata, 2019].

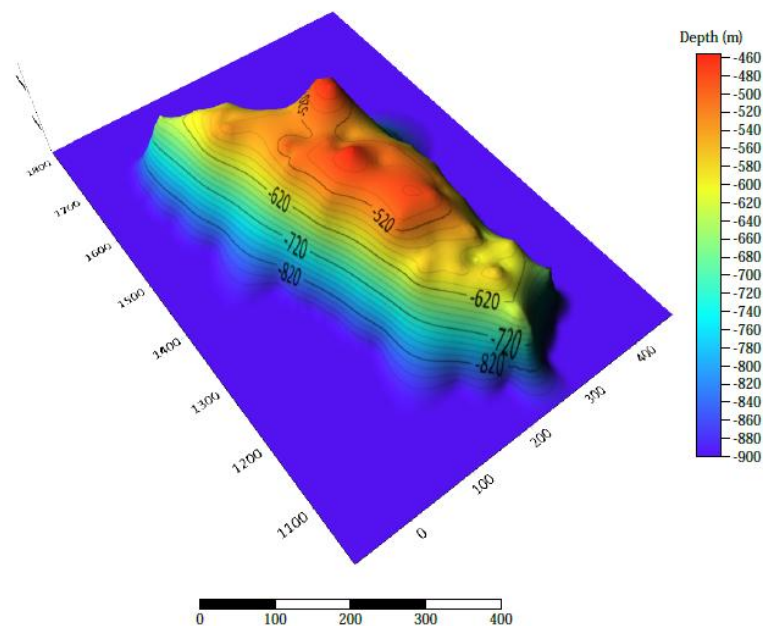
Advanced types of organic Rankine cycles include the organic flash, regenerative, and supercritical cycles.

### Geothermal energy potential of Absheron oil and gas region

Geothermal energy utilization is critical, as is the exploitation of oil resources near the border. To evaluate geothermal energy potential, it's important to measure the flow rate and temperature of fluids (oil, water, gas) exiting wells in the area.

Determining the distribution of pressure and temperature relative to the X stratum is also a critical challenge in the field. To accomplish this, it would be appropriate to first investigate the depth structure of the Bibiheybat deposit in relation to the X stratum.

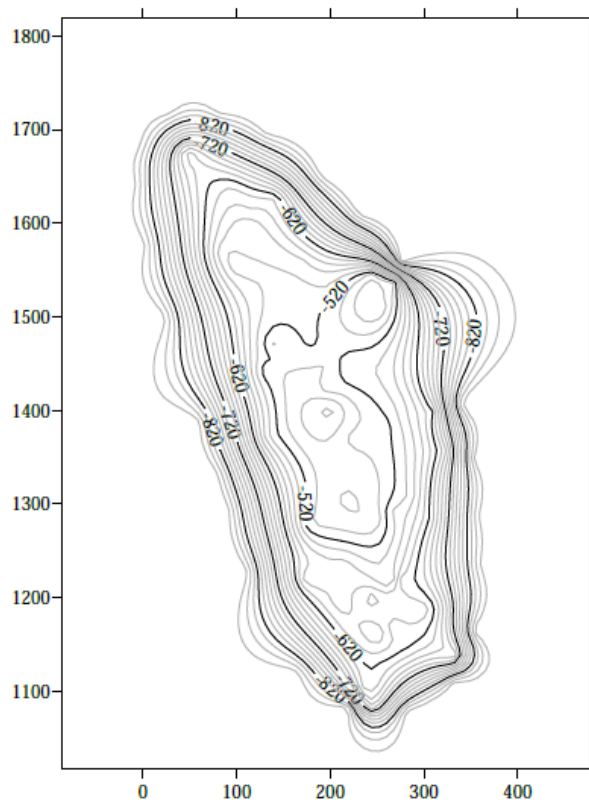
A two-dimensional and three-dimensional model of the area was created to visually observe the depth structure of the Bibiheybat field X layer and obtain more detailed information about it. These models were created using the Surfer application after examining the wells' coordinates and depth (in m).



*Fig. 1. Three-dimensional model of the depth structure of the Bibiheybat deposit*

If we examine the three-dimensional model, we can see that the X layer is geologically an anticlinal fold. Wells here range in depth from 450 to 670 meters.

Looking at the two-dimensional model, we recognize that the X strata is an anticlinal fold.



*Fig. 2. Two-dimensional model of the depth structure of the Bibiheybat deposit*

In general, in order to evaluate the potential of geothermal energy available throughout the field, the flow rate and temperature of the fluid (oil, water, gas) retrieved from the wells must be determined.

In this process, we will need to determine the temperature and pressure measurements for each well, which are calculated and recorded in the Bibiheybat Scientific-Research and Production Department's monthly reports. The production department conducts field measurements using a device known as a manometer, which also includes a thermometer. This enables us to measure both pressure and temperature in the borehole simultaneously.

In addition to the previously described measurements, we used specific devices to determine the temperature of the fluid that enters and departs the wells and pipes. It is known that as the fluid passes along the wellbore and is impacted by the surroundings, it loses some of its temperature. The goal of taking these measurements was to determine the temperature differential between various points.

Special algorithms are utilized to generate a temperature and pressure distribution model for the Bibiheybat field's X layer based on the measurement results. This model enables us to visually monitor the temperature distribution over the area.

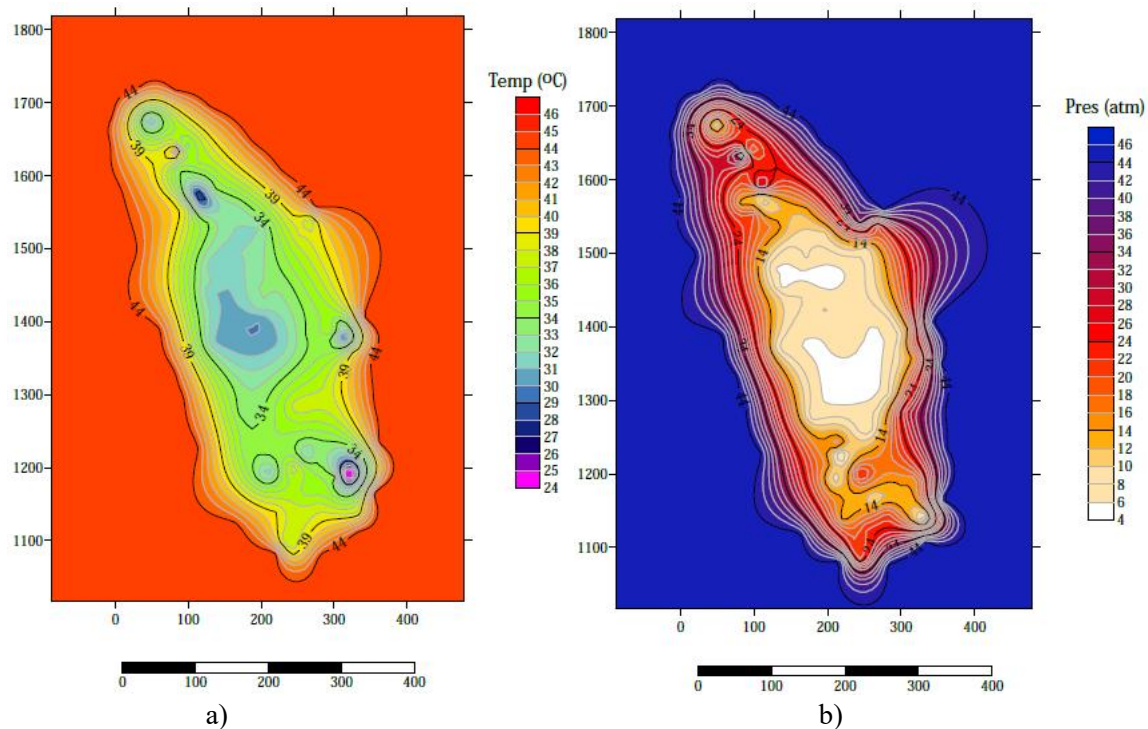


Fig. 3. Temperature and pressure distribution models of the Bibiheybat field

In the first model (a), the temperature distribution map in the X stratum is shown. The temperature in the producing wells across the field ranges from 46 to 24 degrees Celsius. If we look attentively at the image, we can notice that the temperature falls in the center and increases in the wings. Observing at the subsequent model (b), we are able to see that both pressure and temperature decrease as we move from the wings to the center. The pressure across the X layer fluctuates between 46 and 4 atm.

The Bibiheybat deposit has geothermal energy potential that is worth exploring. The goal is to evaluate the geothermal energy potential of the Bibiheybat deposit and identify the energy distribution law across the field.

To accomplish this, we must first determine the flow rate and temperature of the wells in that area. The heat energy delivered from the subsurface to the surface by the wells is calculated using their production flow rate. If we describe the flow rate as  $q = \text{m}^3/\text{day}$ , the mass of the fluid,  $m$ , provides energy up to  $q$  times. The heat quantity,  $Q = mc\Delta T$ , can also be represented as  $Q = qtc\Delta T$ . From here, we may calculate the amount of heat (heat power) produced by the oil wells over a given time period.

$$W=Q/t=qc\Delta T \quad (1)$$

After determining the flow rate and temperature of each well, the geothermal energy (for oil and water) is estimated in a laboratory setting using the formula 1. After the calculations were finished, models were created with the Surfer application to visualize the distribution of geothermal energy across the field.

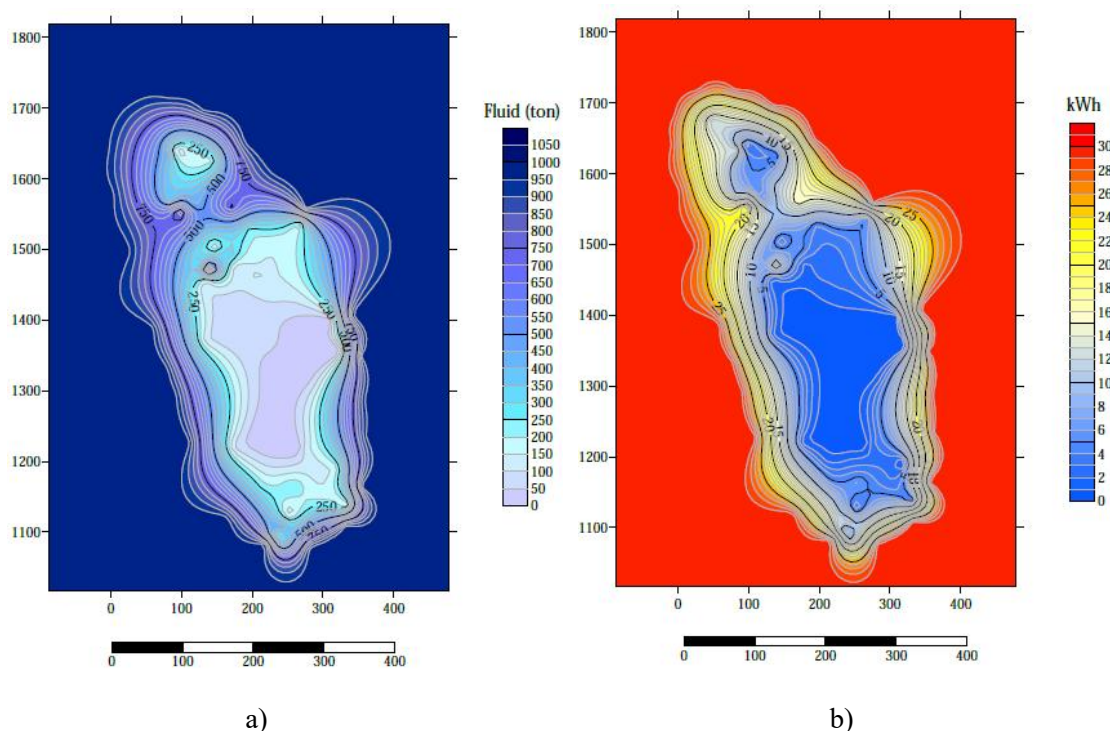


Fig. 4. Distribution model of flow (a) and geothermal energy potential (b) of Bibiheybat field

Figure 4 shows the flow rate of oil wells drilled in the Bibiheybat field and distribution models of geothermal energy potential on the field. If we look at the first model (a), we can see that the discharge of the wells located in the north and south wings is higher than the wells located in the center. Flow rate of fluid varies from 5 to 862 tons/month. In the second model (b), mainly the regularity of distribution of geothermal energy is visually described. This model is based on the results obtained during laboratory calculations. The geothermal energy potential of the deposit varies from 0.129 to 24.789 kWh.

In conclusion, the total geothermal energy capacity of the 70 wells was calculated as 307,578.5578 kWh. Of this energy, 25,090.14518 kWh is the geothermal energy carried by oil, and 282,488.4126 kWh is the geothermal energy carried by water.

Following evaluating the geothermal energy for the X stratum of the Bibiheybat deposit, one of the most significant aspects to address is the computation of the electrical energy that can be extracted from it.



## Results

As we know, in order to convert geothermal energy into electricity, it is necessary to build circuits consisting of special devices. It is advisable to use the binary cycle geothermal power plant technology to convert the calculated geothermal energy into electricity. The recommended scheme is as follows:

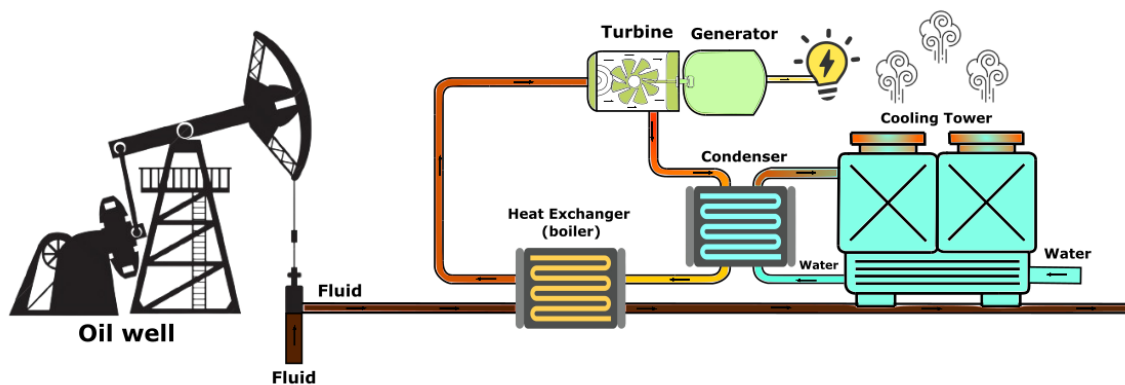


Fig. 5. Scheme of binary cycle geothermal power plant technology for converting geothermal energy into electrical energy

As seen in this diagram, there are two circuits. The first circuit is the fluid transport circuit, and the second is the working fluid circuit. The first circuit cannot be considered a circuit in the traditional sense. This is because the fluid extracted from the oil well will be used for oil production.

The fluid from the oil wells enters the heat exchanger and transfers its heat to the working fluid. This causes the working fluid to vaporize, resulting in high pressure and temperature steam. The hot steam transports through pipes at high pressure and enters the gas turbine. As the steam turns the turbine's rotor, a generator connected to the turbine converts the mechanical energy into electrical energy. Afterward, the working fluid enters the condenser, where it condenses back into a liquid. The liquefied working fluid then re-enters the heat exchanger, completing its cycle.

In general, the overall efficiency of this scheme can be up to 35%. In other words, it is possible to convert 35% of the calculated geothermal energy into electrical energy. For the calculated geothermal energy of 307,578.5578 kWh (~308 kWh) for the 70 wells, we can obtain approximately 107,6524952 kWh (~108 kWh) of electrical energy using this scheme.

With the proposed scheme, it has the potential to supply 2 operating wells (power 40-50 kWh), all offices and equipment in the production area, as well as 388 residential apartments with a consumption of 200 kWh/month located near the Bibiheybat field, with full uninterrupted electricity.

## Conclusion

This study investigated the potential of utilizing geothermal energy alongside existing oil production in the Bibiheybat field, Azerbaijan. The X stratum was identified as a promising target and its temperature, pressure, and flow rate distribution were analyzed. Key findings include:

1. The X stratum exhibits an anticlinal fold structure with well depths ranging from 450 to 670 meters.
2. Temperature within the producing wells varies from 46 to 24°C, decreasing towards the center and increasing in the wings.
3. Pressure also decreases from the wings towards the center, ranging from 46 to 4 atm.
4. The total geothermal energy potential of the 70 studied wells was estimated at 307,578.5578 kWh, with 25,090.14518 kWh attributed to oil and 282,488.4126 kWh to water.
5. Utilizing a binary cycle geothermal power plant, approximately 107,652.4952 kWh of electrical energy could be generated from this potential.
6. This generated electricity could power two operating wells, all field offices and equipment, and even supply nearby residential areas.

In conclusion, the Bibiheybat field possesses significant geothermal energy potential that can be harnessed for electricity generation alongside oil production. Implementing the proposed binary cycle power plant scheme would contribute to a more sustainable and diversified energy mix for the region. Further studies are recommended to refine the estimations and assess the economic and technical feasibility of large-scale geothermal development in the field.

## References

1. Ahmadi A., El Haj Assad M., Jamali D.H., Kumar R., Li Z.X., Salameh, T., et al. Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 274. 122950. pp. 1–20.
2. Bonalumi D., Bombarda P.A., Invernizzi C.M. Zero emission geothermal flash power plant. Italy. 2017. Vol. 126. pp. 698–705.
3. Bruhn M., Erbas K., Huenges E. Efficient geothermal-fossil hybrid electricity generation: geothermal feedwater preheating in conventional power plants. *Bulletin d'Hydrogologie*. 1999. Vol. 17. pp. 403–413.
4. Cao Y., Ehyaei M.A. Energy, exergy, exergoenvironmental, and economic assessments of the multigeneration system powered by geothermal energy. *J. Clean. Prod.* 2021. Vol. 313. 127823. pp. 1–13.
5. Dincer I., Abu-Rayash A. *Energy Sustainability*. 2020. p. 260.
6. DiPippo R. *Geothermal Power Plants. Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, 2 ed., Elsevier, Kidlington, United Kingdom. 2007. p. 493.
7. European Commission. "Blue book on geothermal resources". Belgium. 2012. p. 578.
8. Herath H.M.D.P., Wijewardane M.A., Ranasinghe R.A.C.P., Jayasekera J.G.A.S. Working fluid selection of organic rankine cycles. Japan. 2020. Vol. 6. pp. 680–686.
9. Islamzade A.V., Mammadov P.Y. Assessment of thermal water resources of Precaspian-Guba district and methodology of its use. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 136–149. DOI: 10.46698/VNC.2023.40.99.010.
10. Kabeyi M.J.B. Geothermal electricity generation, challenges, opportunities and recommendations. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2019. Vol. 5. No. 8. pp. 53–95.
11. Kabeyi M.J.B. Investigating the challenges of bagasse cogeneration in the kenyan Sugar Industry. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2020. Vol. 9 No. 5. pp. 7–64.
12. Kabeyi M.J.B. Feasibility of wellhead technology power plants for electricity generation. *International Journal of Computer Engineering in Research Trends*. 2020a. Vol. 7. No. 2. pp. 1–16.

13. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Characteristics and applications of geothermal wellhead power plants in electricity generation. South Africa. 2020b. pp. 4422–(1-14).
14. Kabeyi M.J.B., Oludolapo A.O. Viability of wellhead power plants as substitutes of permanent power plants in grid electricity generation. Zimbabwe. 2020c. pp. 108–118.
15. Kabeyi M.J.B., Oludolapo A.O. Central versus wellhead power plants in geothermal grid electricity generation. *Energy, Sustainability and Society*. 2021a. Vol. 11. No. 7. pp. 1–23.
16. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Performance analysis OF a sugarcane bagasse cogeneration power plant IN grid electricity generation. Singapore. 2021b. pp. 1048–1061.
17. Koroneos C., Rovas D. Exergy analysis of geothermal electricity using kalina cycle. *Int. J. Exergy*. 2013. Vol. 12. No. 1. pp. 54–69.
18. Quick H., Mechael J., Huber H., Arslan U. History of international geothermal power plants and geothermal projects in Germany. Indonesia. 2010. pp. 1–5.
19. Liu Q., Shang L., Duan Y. Performance analyses of a hybrid geothermal–fossil power generation system using low-enthalpy geothermal resources. *Appl. Energy*. 2016. Vol. 162. pp. 149–162.
20. Lundin U., Lundin J., Leijon M. Geothermal Power Production. EUSUSTEL-WP3 report. 2014. pp. 1–18.
21. Marugun R.S., Subbarao P.M. Thermodynamic analysis of Rankine-Kalina combined cycle. *Int. J. Therm.* 2008. Vol. 11. No. 3. pp. 133–141.
22. Meng D., Liu Q., Ji Z. Performance analyses of regenerative organic flash cycles for geothermal power generation. *Energy Convers. Manag.* 2020. Vol. 224. 113396. pp. 1–13.
23. Shehata J.M. Power generation system with low enthalpy geothermal source: Kalina cycle. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 2019. Vol. 4. No. 3. pp. 208–216.
24. Ugochukwu A.A. Geothermal Energy Resources. 2013. pp. 1–35.
25. Windrem P.F., Marr G.L. Environmental problems and geothermal permitting. *Nat. Resour. Lawyer*. 1982. Vol. 14. No. 4. pp. 675–685.

## 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 <http://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 помогли 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  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$  и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и единицах измерений ( $\text{МВт/см}^2$ ) – 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 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Все надписи на русском языке на рисунках и в таблицах дублируются на английский. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем - на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

#### Адрес редакции:

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

The journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” 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 the South of Russia” 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 the South of Russia».

#### Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <http://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 the South of Russia».

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  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$ , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H<sub>2</sub>O) and measurement units (MW/cm<sup>2</sup>) 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  
(№ 1. 2024 г. Том 14)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 22.03.2024 г. Дата фактического выхода 29.03.2024 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 20,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 19.

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