

ISSN 2221-3198

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 2 / 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  
№ 2 / 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 – Весна (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 – Spring (K.S. Kharebov)*

## СОДЕРЖАНИЕ

===== ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА =====	
<b>Стогний В.В., Стогний Г.А.</b> Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа.....6	
===== ГЕОФИЗИКА =====	
<b>Аптикаева О.И.</b> Новые данные о структуре поля поглощения S-волн Западного Прикаспия и ее связи с тектоникой и сейсмичностью ..... 21	
<b>Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Уафа С.Б., Лозовой В.В., Евдокимов В.С.</b> О предвестнике землетрясения в сейсмоопасной горной территории ..... 33	
<b>Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В.</b> Геозкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных ..... 45	
<b>Пашаян Р.А., Карапетян Д.К., Геворкян А.А., Карамян Р.А.</b> Оценка гидрогеологических показателей формирования напряженного состояния земной коры территории Армении ..... 61	
<b>Свалова В.Б., Заалишвили В.Б.</b> Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона ..... 77	
<b>Чернов Ю.К.</b> Эмпирические модели для вероятностных оценок спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях ..... 90	
===== ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ =====	
<b>Маркин М.Ю.</b> Выявление перекрытых разрывных нарушений методом электротомографии на примере городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан) ..... 107	
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ =====	
<b>Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А.</b> Позднекарбонатные гипабиссальные граниты и лейкограниты Большого Кавказа: вопросы петрогенезиса ..... 117	
<b>Парада С.Г.</b> Золотоносные и потенциально золотоносные минерализации в черносланцевой толще Арсикомского рудного поля (Северный Кавказ)..... 131	
<b>Январёв Г.С., Бобомуратов Б.Б.</b> Объемная цифровая модель тектонической структуры глубоких горизонтов Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ)..... 143	
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ =====	
<b>Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А.</b> Анализ эффективности эксплуатации газоконденсатных месторождений Северного Кавказа на завершающем этапе разработки..... 154	
<b>Попков В.И., Попков И.В.</b> Нефтегазоносные формационные комплексы триаса юго-запада Туранской плиты..... 166	
<b>Сидорчук Е.А., Добрынина С.А.</b> Геодинамическая природа размещения нефтегазовых месторождений (на примере территории Ставропольского края)..... 179	
<b>Эзирбаев Т.Б., Гацаева С.С.-А., Абдулшахидова Х.А.</b> Анализ зависимости пористости нижнемеловых коллекторов Терско-Сунженской нефтегазоносной области от петрофизических параметров ..... 195	
===== ГЕОЭКОЛОГИЯ =====	
<b>Бадов А.Д., Бадов О.А., Дзахова Л.Х., Бязрова Д.Б.</b> Состояние окружающей среды и ожидаемая продолжительность жизни населения России: тенденции и перспективы ..... 207	
<b>Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р.</b> Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений ..... 219	
<b>Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р.</b> Сравнительная характеристика содержания алюминия и мышьяка в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров ..... 231	

## CONTENTS

## GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

- Stogny V.V., Stogny G.A.**  
Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment ..... 6

## GEOPHYSICS

- Aptikaeva O.I.**  
New data on the structure of the S-wave attenuation field of the Western Caspian Region and its correlation with tectonics and seismicity ..... 21
- Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Uafa S.B., Lozovoy V.V., Evdokimov V.S.**  
About earthquake precursors in an earthquake-prone mountainous area ..... 33
- Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V.**  
Geocological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data ..... 45
- Pashayan R.A., Karapetyan D.K., Gevorkyan A.A., Karamyan R.A.**  
Assessment of hydrogeological indicators of the formation of the stress state of the Earth's crust on the territory of Armenia ..... 61
- Svalova V.B., Zaalishvili V.B.**  
Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region ..... 77
- Chernov Yu.K.**  
Empirical models for probabilistic estimates of the vibration spectra of "soft" and "hard" soils during earthquake ..... 90

## GEOPHYSICAL METHODS

- Markin M.Yu.**  
Identification of overlapped ruptures by electrotomography on the example of urban agglomeration Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan) ..... 107

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

- Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A.**  
Late Carboniferous hypabyssal granites and leucogranites of the Greater Caucasus: issues of petrogenesis ..... 117
- Parada S.G.**  
Gold-bearing and potentially gold-bearing mineralizations in the Black Shale thickness of the Arsikom ore field (North Caucasus) ..... 131
- Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B.**  
A volumetric digital model of the tectonic structure of the deep horizons of the Urup copper-pyrite deposit (North Caucasus) ..... 143

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

- Gasumov E.R., Gasumov R.A.**  
Efficiency analysis of operation for gas condensate fields in the North Caucasus at the final stage of development ..... 154
- Popkov V.I., Popkov I.V.**  
Oil and gas bearing formation complexes of the Triassic of the South-West Turan plate ..... 166
- Sidorchuk E.A., Dobrynina S.A.**  
Geodynamic nature of the location of oil and gas fields (on the example of the Stavropol Territory) ..... 179
- Ezirbaev T.B., Gatsaeva S.S.-A., Abdulshahidova H.A.**  
Analysis of dependence of porosity of Lower Cretaceous reservoirs of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing area on petrophysical parameters ..... 195

## GEOECOLOGY

- Badov A.D., Badov O.A., Dzakhova L.H., Byazrova D.B.**  
Environmental conditions and life expectancy of the Russian population: trends and prospects ..... 207
- Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R.**  
Dynamics of agroclimatic indicators of steppe landscapes of the North Caucasus according to ground observations ..... 219
- Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R.**  
Comparative characteristics of aluminum and arsenic content in the surface waters of the Elbrus and Kazbek volcanic centers ..... 231

УДК 624.121.54:551.24(479)

DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

Оригинальная статья

## Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа

В.В. Стогний , Г.А. Стогний 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362002, ул. Маркова, 93а,  
e-mail: stogny\_vv@mail.ru

Статья поступила: 05.04.2024, доработана: 24.05.2024, принята к публикации: 26.05.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Глубинное строение Большого Кавказа изучалось различными геофизическими методами. Однако анализ реологического состояния земной коры при обосновании геолого-геофизических моделей Центрального сегмента не выполнялся, поэтому поиск связей особенностей его глубинного строения с реологической стратификацией литосферы данного региона является актуальной проблемой. **Цель работы.** На основе имеющихся материалов глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа разработать модель реологической стратификации литосферы по одному из региональных профилей и выполнить ее анализ. **Методы и методология исследования.** Методика изучения реологической стратификации литосферы нашла применение при разработке геодинамических моделей земной коры, а методология реологических исследований является теоретической основой парадигмы тектонической расслоенности литосферы. В основу модели реологической стратификации литосферы Центрального сегмента взят глубинный разрез по региональному профилю ГСЗ Степное-Бакуриани, по которому рассчитаны профили обобщенной прочности литосферы для Закавказской плиты, южного крыла и Осевой мегазоны Большого Кавказа и Скифской плиты. **Результаты работы.** Впервые обоснована двухмерная (D2) модель реологической стратификации Центрального сегмента Большого Кавказа. Показано, что переход из хрупкого в пластичное (крип) состояние в разрезе Закавказской плиты происходит в низах верхнего (18–20 км) и нижнего (35–40 км) слоев консолидированной коры, в разрезе южного крыла мегантиклинория Большого Кавказа – только в нижнем слое (42–50 км), в Осевой мегазоне Большого Кавказа – в низах верхнего (12–15 км), среднего (29–33 км) и нижнего (40–48 км) слоев, а в разрезе Скифской плиты – в низах верхнего (15–18 км) и нижнего (33–37 км) слоев. Формирование нижней части земной коры Центрального сегмента происходило за счет реологически подвижных горизонтов нижней части земной коры Закавказской плиты, а его Осевой мегазоны – за счет реологически подвижных горизонтов верхней части Скифской плиты.

**Ключевые слова:** Большой Кавказ, Скифская плита, Закавказская плита, консолидированная кора, реологическая стратификация.

**Благодарности:** Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, код: FMSM-2022-0013.

**Для цитирования:** Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

Original paper

# Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment

V.V. Stogny<sup>ID</sup>, G.A. Stogny<sup>ID</sup>

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

Received: 05.04.2024, revised: 24.05.2024, accepted: 26.05.2024

**Abstract: Relevance.** The deep structure of the Greater Caucasus has been studied using various geophysical methods. However, an analysis of the Earth's crust rheological state when substantiating geological and geophysical models of the Greater Caucasus Central segment was not carried out, therefore the search for connections between the features of its deep structure and the rheological stratification of lithosphere is an actual problem. **Aim.** Based on the available materials of the deep structure of the Greater Caucasus Central segment, develop a model of the rheological stratification of the lithosphere along one of the regional profiles and perform its analysis. **Research methods and methodology.** The methodology for studying the rheological stratification of the lithosphere has found application in the development of geodynamic models of the Earth's crust, and the methodology of rheological research is the theoretical basis for the paradigm of the lithosphere tectonic stratification. The model of the lithosphere rheological stratification of Central segment is based on a depth section along the Stepnoe-Bakuriani DSS profile, from which profiles of the generalized strength of the lithosphere were calculated for the Transcaucasian plate, Greater Caucasus southern wing, Axial megazone and Scythian plate. **Results.** For the first time, a two-dimensional (D2) model of rheological stratification of the Greater Caucasus Central segment has been substantiated and it has been shown that the transition from a brittle to a plastic (creep) state in the section of the Transcaucasian plate occurs in the bottoms of the upper (18–20 km) and lower (35–40 km) layers of the consolidated crust, in the section of the southern wing of the Greater Caucasus meganticlinorium – only in the lower layer (42–50 km), in the Axial megazone of the Greater Caucasus – in the lower horizons of the upper (12–15 km), middle (29–33 km) and lower (40–48 km) layers, and in the section of the Scythian plate – at the bottom of the upper (15–18 km) and lower (33–37 km) layers. The formation of the Earth's crust lower part of the Central segment occurred due to the rheologically mobile horizons of the lower part of the Transcaucasian plate Earth's crust, and its Axial megazone – due to the rheologically mobile horizons of the Scythian plate upper part.

**Keywords:** Greater Caucasus, Scythian plate, Transcaucasian plate, consolidated crust, rheological stratification.

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

**For citation:** Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(2): 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001

## Введение

Глубинное строение Большого Кавказа и его Центрального сегмента изучалось различными методами. Так, по данным гравirazведки на основе метода математического моделирования была обоснована общая модель строения земной коры [Шенгелая, 1984]. Для Центрального сегмента строение земной коры охарактеризовано в материалах регионального геофизического профиля глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012] и Осетинского профиля микросейсмического зондирования (ММЗ), пересекающих структуры Большого Кавказа [Gorbatikov et al., 2015]. Структура Осевой мегазоны и северного крыла мегантиклинория рассмотрены в материалах профилей Приэльбрусский, Чегемский и Геналдонский [Шемпелев, 2008; Шемпелев и др., 2017, 2020], отработанных методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) и глубинных магнитотеллурических зондирований (ГМТЗ) (рис. 1). При изучении глубинного строения Большого Кавказа применялся и комплексный подход к интерпретации материалов гравirazведки, магниторазведки, различных модификаций сейморазведки и электроразведки [Гонгадзе, 2016; Гонгадзе и др., 2016; Рогожин и др., 2015]. К настоящему времени накоплен представительный материал по изучению глубинного строения Большого Кавказа и его Центрального сегмента различными методами и при различных подходах.

Методика изучения реологической стратификации литосферы, разработанная Г. Раналли [Ranalli, 1987; Ranalli, Murphy, 1987], нашла широкое применение в геодинамических исследованиях и опробована в различных регионах [Глазнев, 2003; Стогний, Стогний, 2017; Cloetingh et al., 2003; Orug et al., 2019]. Методология реологических исследований является теоретической основой парадигмы тектонической расслоенности литосферы, разработанной в ГИН РАН [Белов и др., 1990]. Опробование данной методики на имеющихся материалах глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа является актуальной задачей, что определило цель работы.

Цель проведенных исследований заключалась в разработке, на основе имеющихся материалов изучения глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа, модели реологической стратификации литосферы по одному из региональных профилей и оценке ее влияния на геодинамические процессы формирования тектоники данного региона.

## Материалы и методика исследований

Для реализации поставленной цели создания модели реологической стратификации литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа в качестве основы был выбран интервал регионального профиля ГСЗ Степное-Бакуриани (рис. 1). В пределах данного интервала точки расчета (1–4) профилей обобщенной прочности литосферы характеризуют основные рассматриваемые структуры: профиль 1 – Закавказская плита, профиль 2 – южный склон мегантиклинория, профиль 3 – Осевая мегазона Большого Кавказа, а профиль 4 – Скифская плита.

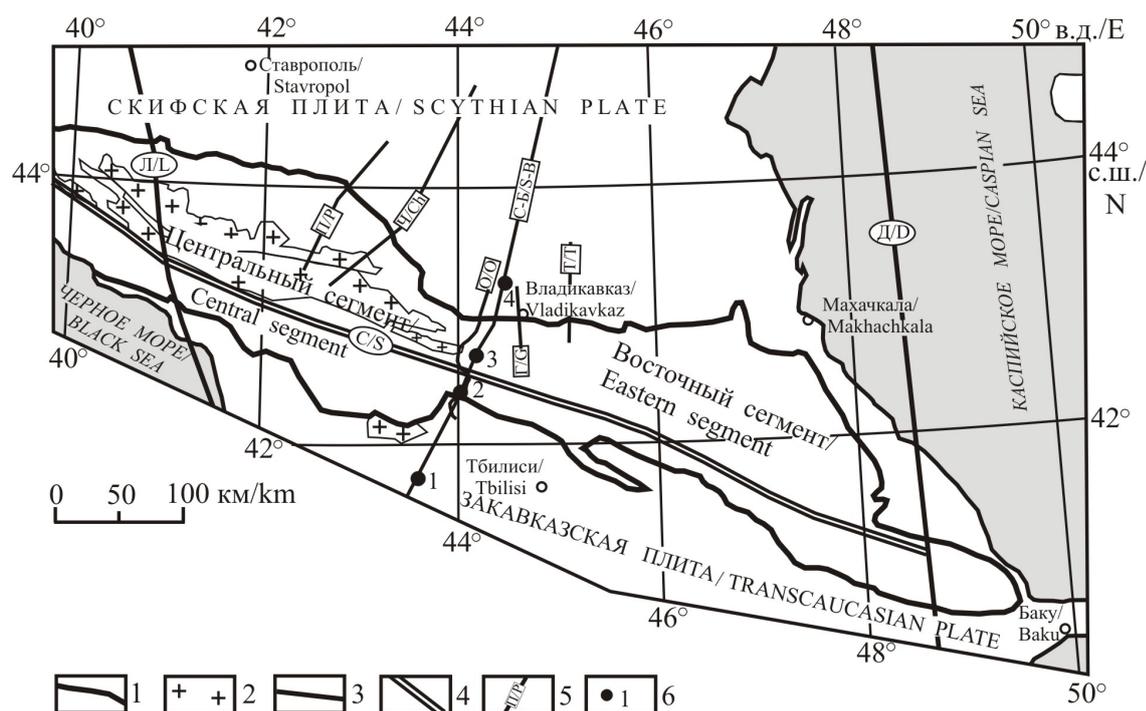


Рис. 1. Схема глубинных геофизических профилей и расположения расчетных реологических профилей обобщенной прочности литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа. 1 – границы мегантиклинория; 2 – выходы кристаллических пород Центрального сегмента и Дзирульского массива; 3 – межгеоблоковые разломы: Л – Лаба-Батумский, Д – Дербент-Ленкоранский; 4 – Сването-Алазанский (С) межплитный разлом консолидированной коры [Стогний, Стогний, 2023]; 5 – глубинные геофизические профили: С-Б – Степное-Бакуриани, П – Приэльбрусский, Ч – Чегемский, Г – Геналдонский, Т – Терский, О – Осетинский; 6 – профиль обобщенной прочности литосферы и его номер /

Fig. 1. Scheme of deep geophysical profiles and the location of calculated rheological profiles of the generalized strength of the lithosphere of the Greater Caucasus Central segment. 1 – boundaries of the meganticlinorium; 2 – outcrops of crystalline rocks of the Central segment and the Dzirul massif; 3 – intergeoblock faults: L – Laba-Batumi, D – Derbent-Lenkoran; 4 – Svaneti-Alazani (S) interplate fault of the consolidated crust [Stogny, Stogny, 2023]; 5 – deep geophysical profiles: S-B – Stepnoe-Bakuriani, P – Prielbrussky, Ch – Chegemsky, G – Genaldonsky, T – Tersky, O – Ossetian; 6 – profiles and its numbers of the lithosphere generalized strength.

Методология составления профилей обобщенной прочности литосферы (одномерный вариант  $D_1$ ) базируется на сопоставлении значений разности максимальных и минимальных сжимающих напряжений, рассчитанных при хрупком разрушении согласно закону Кулона-Биерли и криповой прочности, и обоснования типа разрушения и подвижки на соответствующих интервалах профиля, что приводилось во многих опубликованных работах, в том числе учебных пособиях [Стогний, Стогний, 2000]. Вместе с тем, методика таких расчетов в различных регионах и при различных подходах может меняться, что требует дополнительных пояснений.

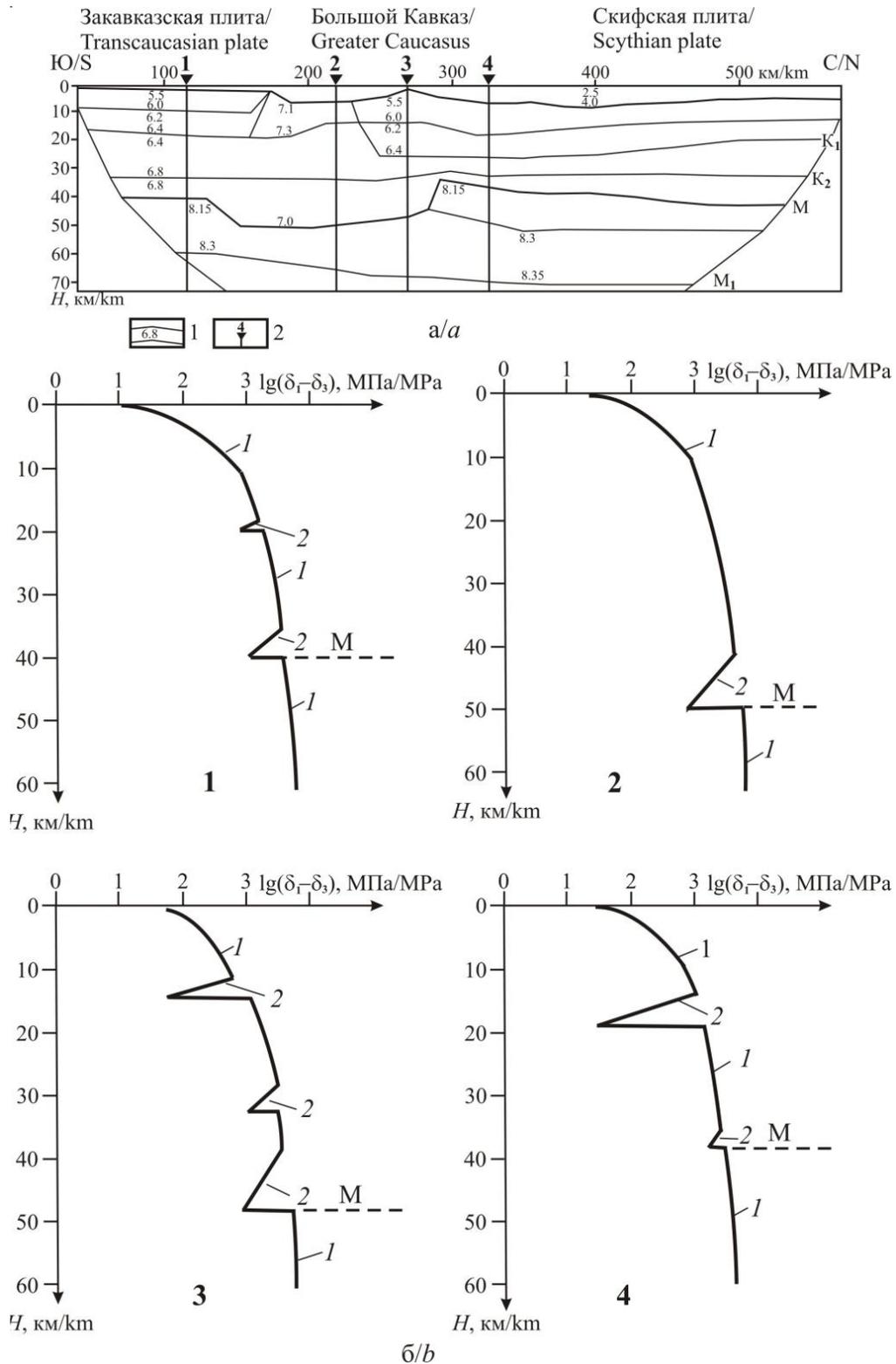


Рис. 2. Строение земной коры Центрального сегмента по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012] (а) и расчетные реологические профили обобщенной прочности литосферы (б). (а): 1 – границы слоев с разными сейсмическими скоростями, цифры – скорости продольных волн, км/с; 2 – профили обобщенной прочности литосферы и их номера (1–4). Границы:  $K_1$ ,  $K_2$  – кристаллической коры, М – Мохоровичича,  $M_1$  – верхней мантии. (б): кривые обобщенной прочности литосферы (1–4): 1 – при хрупком разрушении, 2 – “криповая” прочность. М – граница Мохоровичича /

Fig. 2. Structure of the earth's crust of the Central segment according to the Stepnoe-Bakuriani DSS profile [Pavlenkova, 2012] (a) and calculated rheological profiles of the lithosphere generalized strength (b). (a): 1 – boundaries of layers with different seismic velocities, numbers – longitudinal wave velocities, km/s; 2 – profiles of the generalized strength of the lithosphere and their numbers (1–4). Boundaries:  $K_1, K_2$  – crystalline crust,  $M$  – Mohorovicic,  $M_1$  – upper mantle. (b): lithosphere generalized strength curves (1–4): 1 – during brittle fracture, 2 – “crip” strength.  $M$  is the Mohorovičić boundary

Прочностные свойства структурно-вещественных комплексов различных уровней литосферы согласно закону сухого трения Кулона-Биерли определяются уравнением:

$$\delta_1 - \delta_3 \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^z \rho_i \cdot \Delta z_i \cdot g, \quad (1)$$

где  $\delta_1 - \delta_3$  – разность максимального и минимального сжимающих напряжений;  $\beta$  – параметр, зависящий от типа разрушения и подвижки (при расчетах принят равным 1,2);  $z$  – текущий параметр глубины (предельное значение принято равным 70 км);  $\rho_i$  и  $\Delta z_i$  – соответственно плотность (в кг/м<sup>3</sup>) и мощность  $i$ -го интервала;  $g$  – среднее значение силы тяжести (при расчётах принято равным 9,8 м/с<sup>2</sup>).

Значения  $\rho_i$  структурно-вещественных комплексов земной коры и верхней мантии рассчитывались по корреляционной зависимости плотности  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>) от скорости продольных волн  $V_p$  (км/с) для Центрального Кавказа [Шенгелая, 1984] (границные и пластовые скорости продольных волн каждого  $i$ -го слоя на рис. 2а):

$$\rho_i = 0,3096V_{pi} + 0,792. \quad (2)$$

Разность максимального и минимального сжимающих напряжений ( $\delta_1 - \delta_3$ ) при пластическом режиме деформирования в литосфере в режиме установившейся ползучести (дислокационного крипа) определяется уравнением:

$$\delta_1 - \delta_3 = \left( \frac{U}{A_i} \right)^{1/n_i} \cdot \exp\left( \frac{E_i}{n_i RT(z)} \right), \quad (3)$$

где  $U$  – скорость деформации;  $R$  – газовая постоянная;  $A_i, E_i, n_i$  – реологические параметры каждого отдельного  $i$ -го слоя разреза;  $T(z)$  – температура Кельвина ( $z$  – текущий параметр глубины).

Скорость деформации  $U$  (1/с) обычно принимается в пределах  $10^{-14}$ – $10^{-16}$  (при проведении расчетов было принято значение  $U = 10^{-15}$  1/с). Для газовой постоянной принято ее справочное значение ( $R = 8.31441$  Дж/моль·К). Реологические параметры  $A$  (ГПа·с <sup>$n$</sup> ), энергии активации  $E$  (КДж·моль<sup>-1</sup>) и безразмерного коэффициента  $n$  экспериментально определены для ограниченного числа геоматериалов, в их числе гранит, кварцит, альбитит, анортозит, кварцевый диорит, диабаз, оливинит [Стогний, Стогний, 2000]. Их значения для каждого  $i$ -го слоя разреза ( $A_i, E_i, n_i$ ) вычислялись путем корреляции между отдельными видами геоматериалов согласно плотности каждого  $i$ -го слоя (для  $A_i$  и  $E_i$  в логарифмическом масштабе). Температура текущей глубины  $z$  вычислялась при постоянном ее градиенте из условия, что температура на поверхности Мохоровичича везде постоянна и соответствует 600°C.

Принятые методология и методика исследований позволили рассчитать профили обобщенной реологической прочности литосферы (рис. 2б, 1–4), адаптированные к условиям глубинного разреза (рис. 2а), которые составили основу разработки модели реологической стратификации литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа.

### Реологическая стратификация литосферы Центрального сегмента по профилю Степное–Бакуриани

Глубинное строение земной коры Большого Кавказа по профилю ГСЗ Степное–Бакуриани (рис. 2а) в интерпретации Г.А. Павленковой [2012] имеет следующие особенности. Скорости продольных волн  $V_p$  пород осадочного комплекса изменяются в пределах 2.5–4.0 км/с, увеличиваясь на кровле кристаллического фундамента до 5.5–5.6 км/с. Пределы изменений скорости продольных волн в верхней части консолидированной коры (до границы  $K_1$ ) от 5.5 до 6.4 км/с, в средней коре (между границами  $K_1$  и  $K_2$ ) 6.4–6.8 км/с, увеличиваясь в нижнем слое земной коры до 7.0 км/с. На поверхности Мохоровичича (М) скорости продольных волн  $V_p$  увеличиваются до 8.15 км/с, а в верхней мантии (на глубине 60–70 км) отчетливо прослеживается граница  $M_1$  со скоростью  $V_p = 8.30–8.35$  км/с.

Мощность пород осадочного комплекса Закавказской плиты достигает 2 км (в пределах исследуемого интервала профиля), а южного крыла Большого Кавказа – 7 км. В пределах Осевой мегазоны мегантиклинория породы консолидированной коры выходят на поверхность. Мощность мезозой–кайнозойского комплекса северного крыла Большого Кавказа и Скифской плиты до 9 км. Глубина границы Мохоровичича в пределах Закавказской плиты около 40 км, а Большого Кавказа – до 45–50 км, резко уменьшаясь (от 45 до 35 км) в интервале 280–290 км профиля, и далее к северу увеличиваясь до 40–45 км. Мощность верхней части консолидированной коры Осевой мегазоны существенно (до 25 км) увеличена.

В верхней части консолидированной коры южного крыла мегантиклинория (интервал профиля 160–230 км) расположен высокоскоростной ( $V_p = 7.1–7.3$  км/с) блок, по своим свойствам соответствующий нижней коре.

Анализ кривых обобщенной прочности литосферы по рассчитанным профилям (рис. 2б) позволяет отметить следующее. Переход из хрупкого в пластичное состояние в разрезе Закавказской плиты (профиль 1) происходит в низах верхнего (18–20 км) и нижнего (35–40 км) слоев консолидированной коры, в разрезе южного крыла мегантиклинория Большого Кавказа (профиль 2) – только в нижнем слое консолидированной коры (интервал 42–50 км), в Осевой мегазоне Большого Кавказа (профиль 3) – в низах верхнего (12–15 км), среднего (29–33 км) и нижнего (40–48 км) слоев консолидированной коры, а в разрезе Скифской плиты (профиль 4) – в низах верхнего (15–18 км) и нижнего (33–37 км) слоев консолидированной коры. Градиент увеличения обобщенной прочности по закону Кулона–Биерли во всех интервалах разреза возрастает с глубиной.

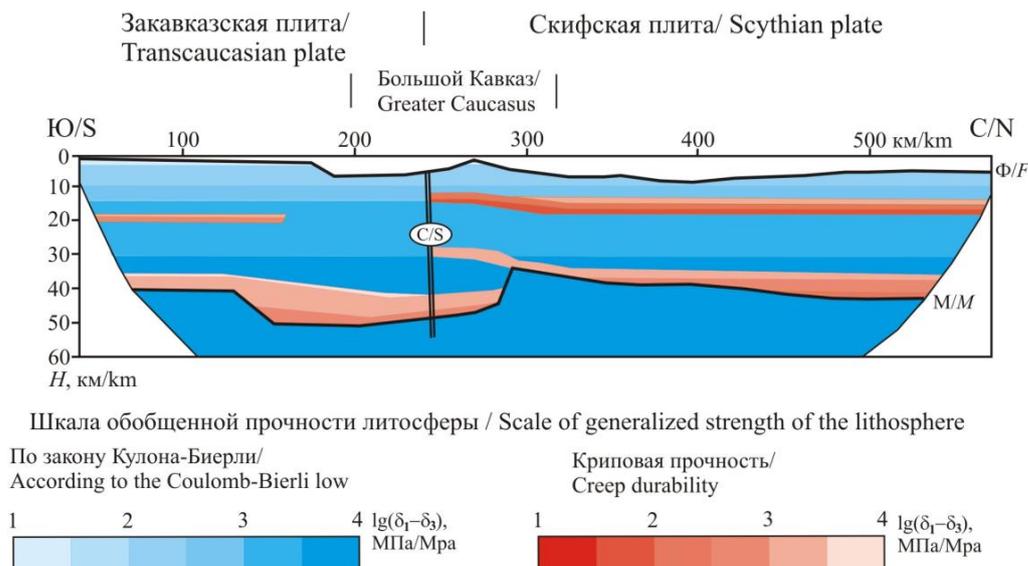


Рис. 3. Разрез реологической стратификации литосферы Центрального сегмента по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани. С – Сването-Алазанский межплитный разлом [Стогний, Стогний, 2023]. Границы: Ф – комплексов осадочных пород и консолидированной коры, М – Мохоровичича /  
Fig. 3. Section of the lithosphere rheological stratification of the Central segment along the DSS profile Stepnoe-Bakuriani. S – Svaneti-Alazani interplate fault [Stogny, Stogny, 2023]. Boundaries: F – of sedimentary rocks and consolidated crust complexes, M – Mohorovičić.

По результатам полученных реологических профилей обобщенной прочности литосферы (рис. 2) и с учетом строения земной коры и верхней мантии по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани построен разрез (рис. 3) его реологической стратификации (модель D2). Исходя из предложенной модели, в процессе формирования чашеобразной структуры нижней части консолидированной коры (до глубины более 50 км) Центрального сегмента Большого Кавказа приток вещества/энергии происходил, вероятно, с юга, со стороны Закавказской плиты, а в пределах среднего и верхнего слоев консолидированной коры – с севера, со стороны Скифской плиты, для которых основным «упором» мог служить Сването-Алазанский межплитный разлом, разграничивающий блоки с различными реологическими свойствами (по их обобщенной прочности). Для верхнего подвижного слоя (криповое состояние) северной части Закавказской плиты таким «упором» мог служить высокоплотный ( $V_p = 7.1-7.3$  км/с) блок в ее верхних горизонтах.

Верхний осадочный слой земной коры (на рис. 3 не раскрашен) реологически наиболее подвижен (при соответствующих полях тектонических напряжений), именно в его пределах формируются складчато-надвиговые структуры. Однако его изучение на реологической основе и согласование со скоростью и направлениями движения отдельных пунктов GPS [Лукк, Шевченко, 2019; Reilinger et al., 2006] возможно только при проведении крупномасштабных специализированных работ на отдельных участках.

Предложенная модель реологической стратификации литосферы по профилю Степное-Бакуриани позволяет с новых позиций подойти к рассмотрению глубинного строения Центрального сегмента Большого Кавказа.

## Основные черты строения земной коры Центрального сегмента

Рассмотренный в предыдущем разделе сейсмический разрез земной коры по профилю Степное–Бакуриани (рис. 2а) характеризует глубинное строение восточной части Центрального сегмента. Основные черты строения земной коры Осевой мегазоны и северного крыла Центрального сегмента мегантиклинория анализируются по опубликованным материалам МОВЗ и ГМТЗ, отработанным по профилям Приэльбрусский, Чегемский и Геналдонский (рис. 1).

Согласно геолого-геофизическому разрезу по линии Приэльбрусского профиля (вулкан Эльбрус – Минеральные воды), приведенному в [Шемпелев и др., 2020], мощность земной коры Осевой мегазоны достигает 63 км, а северного крыла мегантиклинория – 50 км. На данном разрезе показан фрагмент Главного Кавказского надвига северного падения, разделяющего Скифскую и Закавказскую плиты. Мощность верхнего гранито-гнейсового слоя консолидированной коры, как и нижнего базитового, не превышает 25 км. В материалах ГМТЗ Осевая мегазона проявляется высокоомным блоком.

Линия Чегемского профиля пересекает выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов Осевой мегазоны (на отрезке 0–30 км), мезозой-кайнозойских осадочных пород северного крыла (30–65 км) мегантиклинория Большого Кавказа и севернее – четвертичных отложений Скифской плиты (рис. 4а). Северный отрезок профиля проходит в 30–50 км восточнее Ставропольского поднятия.

На разрез МОВЗ [Шемпелев и др., 2017] вынесены элементы корреляции амплитуд положительных фаз обменных PS-волн (рис. 4б). Материалы МОВЗ отражают тектоническую расслоенность разреза, где наиболее ярко выраженные границы проявляются коррелируемыми фрагментами больших амплитуд положительных фаз обменных PS-волн. По этому признаку в разрезе выделены три блока: с высокой, средней и нормальной расслоенностью.

Для блока 1, соответствующего Осевой мегазоне Центрального сегмента (рис. 4б), характерна высокая насыщенность больших амплитуд положительных фаз обменных PS-волн станций МОВЗ и субпараллельная коррелируемость их фрагментов, которые до глубины 40 км имеют отчетливо выраженное южное падение, на глубине около 40 км – субгоризонтальное, а с этой глубины и до 60 км – северное. Такой вид расслоенности консолидированной коры отвечает модели формирования Осевой мегазоны, предложенной Л.М. Расцветаевым [Большой Кавказ..., 2007].

Блок 2 разреза проявляется высокой насыщенностью площадок малых амплитуд положительных фаз обменных PS-волн станций МОВЗ с их слабо коррелируемыми фрагментами (рис. 4б), что по нашему мнению отражает разную подвижность слоев консолидированной коры при формировании северного крыла мегантиклинория в коллизионную стадию.

Блок 3 разреза земной коры Скифской плиты имеет следующие особенности: в верхней части разреза хорошо коррелируемые границы больших амплитуд положительных фаз обменных PS-волн станций МОВЗ, идентифицируемые как граница осадочного чехла, граница  $K_1$  подошвы верхней части консолидированной коры, а также идентифицированные границы подошвы средней коры  $K_2$ , Мохоровичича  $M$  и верхней мантии  $M_1$ .

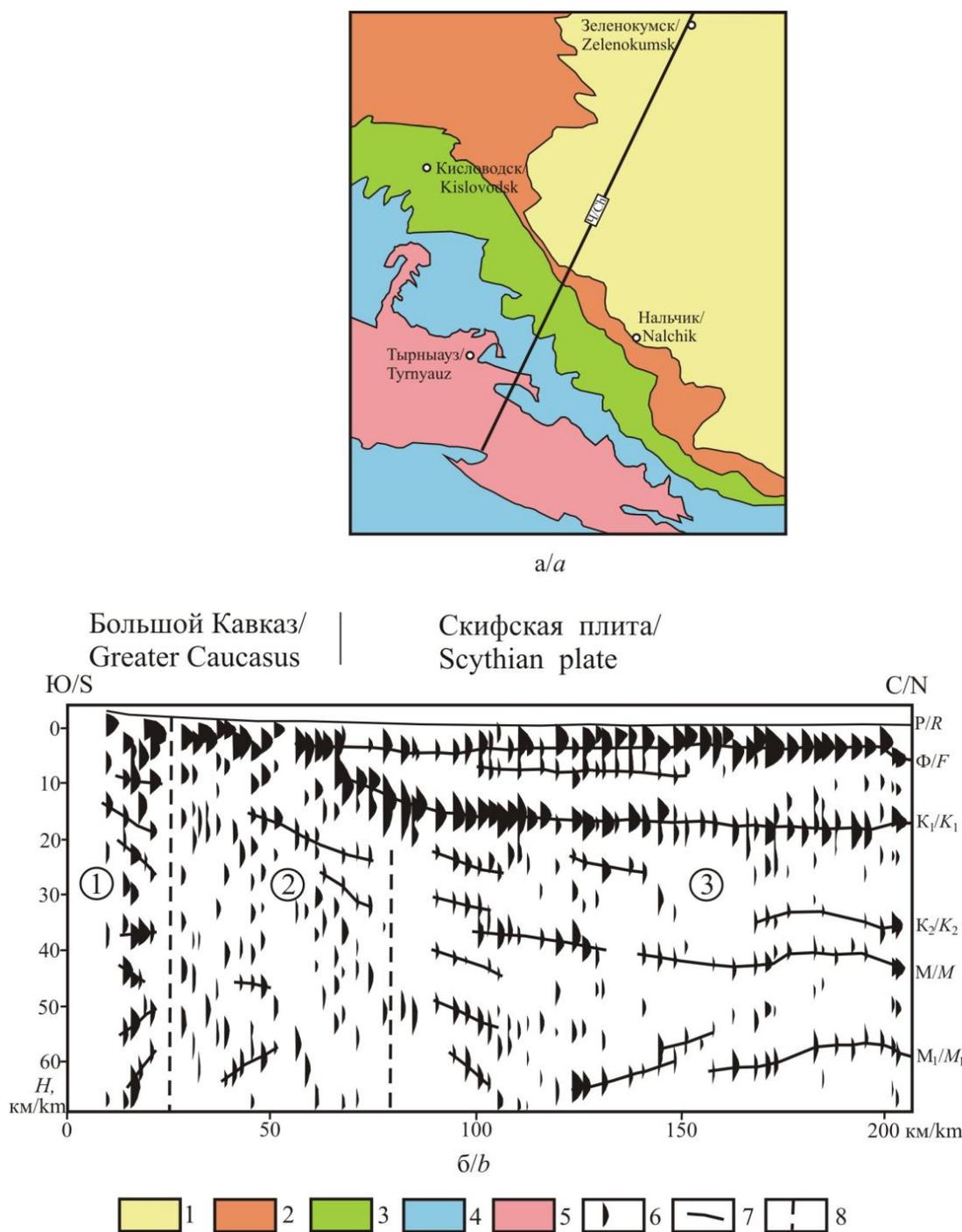


Рис. 4. Схема геологического строения района исследования (а) (по «Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000 / Гл. редактор Д.В. Наливкин. М.: Аэрогеология, – 1978» с упрощением) и модель раслоенности земной коры по материалам МОВЗ (б).

1 – четвертичные отложения; 2–4 – осадочные породы: 2 – палеоген-неогеновые, 3 – меловые, 4 – юрские; 5 – раннедокембрийские метаморфические породы и палеозойские граниты; 6 – амплитуды положительных фаз обменных PS-волн [Шемпелев и др., 2017]; 7 – оси корреляции положительных фаз обменных PS-волн (идентифицированные границы: Ф – кристаллического фундамента, К<sub>1</sub> и К<sub>2</sub> – соответственно верхней и нижней границы средней консолидированной коры, М – Мохоровичича, М<sub>1</sub> – сейсмическая граница верхней мантии); 8 – блоки (1–3 в кружочках) консолидированной коры с различной степенью тектонической раслоенности: 1 – высокой, 2 – средней, 3 – нормальной; Р – линия рельефа /

*Fig. 4. Scheme of the geological structure of the study area (a) (according to «Geological map of the Caucasus. Scale 1:500 000. Ch. ed. D.V. Nalivkin. Moscow. Aerogeology. 1978» with simplification) and model of the earth's crust layering based on the materials of the Earthquake Converted-Wave Method (ECWM) (b). 1 – Quaternary sediments; 2–4 – sedimentary rocks: 2 – Paleogene-Neogene, 3 – Cretaceous, 4 – Jurassic; 5 – Early Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic granites; 6 – amplitudes of positive phases of converted PS-waves [Shempelev et al., 2017]; 7 – correlation axes of positive phases of converted PS-waves (identified boundaries: F - crystalline basement, K<sub>1</sub> and K<sub>2</sub> - upper and lower boundaries of the middle consolidated crust, respectively, M - Mohorovičić, M<sub>1</sub> - seismic boundary of the upper mantle); 8 – blocks (1–3 in circles) of consolidated crust with varying degrees of tectonic layering: 1 – high, 2 – medium, 3 – normal; R – relief line.*

Аналогичные особенности разреза прослеживаются в материалах профиля МОВЗ Ейск-Ставрополь-Каспийское море [Егоркин и др., 2007], пересекающего Чегемский профиль в районе г. Буденновск. Мощность земной коры Скифской плиты по данному профилю не превышает 43 км, граница М<sub>1</sub> прослежена на глубине 46–48 км, а границы К<sub>1</sub> и К<sub>2</sub> соответственно на глубинах 15–22 км и 30–32 км.

Осевая мегазона в разрезе Чегемского профиля по данным ГМТЗ выделяется высокоомным блоком с кажущимися сопротивлениями в пределах до  $n \cdot 10^2$ – $n \cdot 10^3$  Ом·м с подошвой на глубине 50 км.

Максимальная мощность земной коры Осевой мегазоны по Геналдонскому профилю (северный склон г. Казбек–Осетинская впадина Терско-Каспийского прогиба) оценивается в 49 км за счет предполагаемого удвоения толщины базитового слоя [Шемпелев, 2008]. В разрезе Геналдонского профиля по данным ГМТЗ Осевой мегазоне на глубине 7–40 км соответствует высокоомный блок.

Линия Терского профиля пересекает в северном направлении Агвали-Хивскую зону и зону Известнякового хребта Большого Кавказа. Мощность земной коры данных зон находится на уровне 45–50 км [Энна и др., 2021].

По материалам метода микросейсмического зондирования Осетинского профиля (Аргылах–Цхинвал) выделено два блока (глубинных объема) консолидированной коры: субвертикальный низкоскоростной, расположенный под северным крылом и осевой частью мегантиклинория Большого Кавказа, и высокоскоростной – под его южным крылом [Gorbatikov et al., 2015].

Таким образом, мощность земной коры Осевой мегазоны Центрального сегмента в юго-восточном направлении изменяется по материалам МОВЗ от 65 км (Приэльбрусский профиль) до 49 км (Чегемский профиль). Осевая мегазона в материалах ГМТЗ проявляется высокоомным коровым блоком. Это может быть как блок раннедокембрийской консолидированной коры, неизменный в процессе тектонической эволюции Большого Кавказа, так и испытывавший высокоградный метаморфизм в раннеальпийскую (киммерийскую) эпоху, что привело к уменьшению электропроводности пород.

### Обсуждение результатов

Согласно принятым методологии и методике исследований рассчитаны профили обобщенной реологической прочности литосферы по профилю ГСЗ Степное–Бакуриани, на основе которых разработана модель реологической стратификации литосферы Центрального сегмента Большого Кавказа. Показано, что переход из хрупкого в пластичное состояние в разрезе Закавказской плиты происходит в низах верхнего (18–20 км) и нижнего (35–40 км) слоев консолидированной коры, в раз-

резу южного крыла мегантиклинория Большого Кавказа – только в нижнем слое земной коры (42–50 км), в Осевой мегазоне Большого Кавказа – в низах верхнего (12–15 км), среднего (29–33 км) и нижнего (40–48 км) слоев консолидированной коры, а в разрезе Скифской плиты – в низах верхнего (15–18 км) и нижнего (33–37 км) слоев.

В соответствии с представленной моделью реологической стратификации литосферы Центрального сегмента мегантиклинория процесс его формирования на коллизионной стадии проходил нелинейно. В пределах слоев пластического течения (крипа) формировались реологические ячейки с подтоком вещества/энергии в нижних, наиболее подвижных их горизонтах и движением в противоположном направлении после реологического «упора». В результате этого процесса на этапах наибольшей активности в пределах Осевой мегазоны были сформированы слои интенсивной расслоенности, отчетливо проявляющиеся максимальными коррелируемыми амплитудами фаз обменных PS-волн станций МОВЗ, перемежающиеся со слоями без ярко выраженной расслоенности, формировавшиеся в более длительные этапы нормальной и пониженной активности.

Данный механизм формирования земной коры ядра мегантиклинория Большого Кавказа, который реализовывался за счет высокой подвижности (крипового состояния) в низах верхнего и нижнего слоев консолидированной коры, являлся главным фактором увеличения его мощности (на 10–20 км) по сравнению с мощностью земной коры Закавказской и Скифской плит.

### Выводы

Разработана двухмерная (D2) модель реологической стратификации Центрального сегмента Большого Кавказа, базирующаяся на материалах профиля ГСЗ Степное–Бакуриани. В слоях консолидированной коры Закавказской плиты, Большого Кавказа и Скифской плиты выделены интервалы перехода из хрупкого в пластичное состояние.

Показано, что процесс формирования Центрального сегмента на коллизионной стадии проходил нелинейно. На этапах наибольшей активности в Осевой мегазоне возникли слои интенсивной расслоенности, отчетливо проявляющиеся максимальными коррелируемыми амплитудами фаз обменных PS-волн. В слоях пластического течения (крипа) формировались реологические ячейки с подтоком вещества/энергии в нижних, наиболее подвижных их горизонтах и движением в противоположном направлении после реологического «упора».

Согласно предложенной модели, формирование нижней части земной коры Центрального сегмента происходило за счет реологически более подвижных горизонтов Закавказской плиты, а его Осевой мегазоны – за счет более подвижных горизонтов верхней части Скифской плиты, для которых реологически более «жесткие» структуры Закавказской плиты являлись упором.

### Литература

1. Белов А.А., Буртман В.С., Зенкевич В.П. и др. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования / Отв. ред. Ю.М. Пушаровский, В.Г. Трифонов. М.: Наука, – 1990. 293 с.
2. Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова. – М.: ГЕОС, – 2007. 368 с.

3. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. – Апатиты: ЗАО «КазМ», – 2003. 252 с.
4. Гонгадзе С.А. Глубинное строение Большого Кавказа на основе геофизических данных по новым технологиям. Ч. 1. Гравиметрия, магнитометрия, локальная сейсмотомография и микросейсмозондирование. // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 3. – С. 145–154.
5. Гонгадзе С.А., Челидзе Т.Л., Миндели П.Ш., Глонти Н.Я., Кирия Д.К., Яволовская О.В. Основные сечения земной коры и верхней мантии Большого Кавказа по новым технологиям. 2. Сейсмотомография по профилям глубинного сейсмического зондирования. // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. № 4. – С. 100–112.
6. Егоркин А.В., Золотов Е.Е., Недядько В.В., Ракитов В.А. Региональные особенности глубинного строения Предкавказья по данным профиля МОВЗ Ейск-Ставрополь-Каспийское море. // Геофизика. – 2007. – № 5. – С. 22–25.
7. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99–123.
8. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных). // Физика Земли. – 2012. – № 5. – С. 16–23.
9. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегаантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36–49.
10. Стогний В.В., Стогний Г.А. Реологические модели в сейсмологических исследованиях Северо-Западного Кавказа. // Коллективная монография: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. – 2017. Т. VII. Ч. 2. – М.: ИИЕТ РАН. – С. 173–180.
11. Стогний В.В., Стогний Г.А. Физика Земли: Учеб. пособие. – Якутск: Изд-во ЯГУ, – 2000. 190 с.
12. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83/001.
13. Шемпелев А.Г., Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О., Шамановская С.П., Рогожин Е.А. Тектоническая раздробленность и геодинамический режим вулканов Эльбрус и Казбек (Центральный Кавказ, Россия): результаты глубинных геофизических исследований. // Геотектоника. – 2020. – № 5. – С. 55–69. DOI: 10.31857/S0016853X20050082.
14. Шемпелев А.Г., Чотчаев Х.О., Кухмазов С.У. Данные глубинных геофизических исследований вдоль Чегемского профиля (Центральный блок, Большой Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 129–134. DOI: 10.23671/VNC.2017.2.9497.
15. Шемпелев А.Г. Результаты глубинных геофизических исследований вдоль Геналдонского профиля. // Коллективная монография: Опасные природные и техногенные процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, – 2008. – С. 457–463.
16. Шенгелая Г.Ш. Гравитационная модель земной коры Кавказа. М.: Наука, – 1984. 128 с.
17. Энна Н.Л., Лаврищев В.А., Шишов В.С., Письменская Г.А. Основные результаты геологосъемочных работ в пределах листа К-38-Х (Грозный). // Коллективная монография: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XI. М.: ИИЕТ РАН, – 2021. – С. 162–171.
18. Cloetingh S., Spadini G., Van Wees J.D., Beekman F. Thermo-mechanical modelling of Black Sea Basin (de)formation. // *Sedimentary Geology*. – 2003. – Vol. 156. – pp. 169–184.
19. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The

pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2015. – Vol. 51. No. 1. – pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073.

20. Orug B., Ulutaf E., Pamukgu O., Haluk Selim H., Sonmez T. Rheological stratification and spatial variations in the effective elastic thickness of the lithosphere underneath the central Anatolian region, Turkey. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 176. – pp. 1–7.

21. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London. Allen and Unwin, – 1987. 336 p.

22. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere. // *Tectonophysics*. – 1987. – Vol. 132. – pp. 281–295.

23. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2006. – Vol. 111. No. 5. Issue B05411.

## References

1. Belov A.A., Burtman V.S., Zenkevich V.P. et al. Tectonic layering of the lithosphere and regional geological studies. Rep. eds. Yu.M. Pushcharovsky, V.G. Trifonov. Moscow. Nauka. 1990. 293 p. (in Russ.)

2. *Alpine History of the Great Caucasus*. Ed. Yu.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2007. 368 p. (in Russ.)

3. Glaznev V.N. Complex geophysical models of the Fennoscandia lithosphere. Apatity. ZAO KaeM. 2003. 252 p. (in Russ.)

4. Ghonghadze S.A. The deep structure of the Greater Caucasus on the basis of geophysical data according to new technologies. 1. Gravimetry, magnetometry, local seismic tomography and micro seismic sounding. *Geophysical journal*. 2016. Vol. 38. No. 3. pp. 145–154. (in Russ.)

5. Ghonghadze S.A., Chelidze T.L., Mindeli P.Sh., Ghlonti N.I., Kiria J.K., Yavolovskaya O.N. Main sections of the Earth crust and upper mantle of the Greater Caucasus by new technologies. 2. Deep seismic sounding, micro seismic sounding. *Geophysical journal*. 2016. Vol. 38. No. 4. pp. 100–112. (in Russ.)

6. Egorkin A.V., Zolotov E.E., Nedyadko V.V., Rakitov V.A. Regional features of the Ciscaucasia deep structure according to the profile data MOVZ Eysk-Stavropol-Caspian Sea. *Geophysics*. 2007. No. 5 pp. 22–25. (in Russ.)

7. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. No. 4. pp. 99–123. (in Russ.)

8. Pavlenkova G.A. Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2012. No. 5. pp. 16–23. (in Russ.)

9. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. Structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (in Russ.)

10. Stogny V.V., Stogny G.A. *Physics of the Earth: Textbook*. Yakutsk. YSU Publishing House. 2000. 190 p. (in Russ.)

11. Stogny V.V., Stogny G.A. Rheological models in seismological studies of the North-West Caucasus. Collective monograph: Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Vol. VII. Part 2. Moscow. IIET RAS. 2017. pp. 173–180. (in Russ.)

12. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83/001. (in Russ.)

13. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Chotchaev K.O., Shamanovskaya S.P., Rogozhin E.A. Tectonic fragmentation and geodynamic regime of Elbrus and Kazbek volcanoes (Central

Caucasus, Russia): results of the deep geophysical research. *Geotectonics*. 2020. No. 5. pp. 652–664. DOI: 10.31857/S0016853X20050082. (in Russ.)

14. Shempelev A.G., Chotchaev H.O., Khuhmazov S.U. Data of deep geophysical surveys along Chegem profile (Central block, Greater Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 2. pp. 129–134. DOI: 10.23671/VNC.2017.2.9497. (in Russ.)

15. Shempelev A.G. Results of deep geophysical research along the Genaldon profile. In: *Proc. Dang. natural and man-made processes in the mount. and foothill ter. of the North Caucasus*. Vladikavkaz. GPI VNS RAS. 2008. pp. 457–463. (in Russ.)

16. Shengelaya G.Sh. Gravity model of the Caucasus Earth's crust. Moscow. Nauka. 1984. 128 p. (in Russ.)

17. Enna N.L., Lavrishchev V.A., Shishov V.S., Pismenskaya G.A. Main results of geological survey work within the K-38-X map sheet (Grozny). In: *Proceedings Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Vol. XI. Moscow. IIET RAS. 2021. pp. 162–171. (in Russ.)

18. Cloetingh S., Spadini G., Van Wees J.D., Beekman F. Thermo-mechanical modelling of Black Sea Basin (de)formation. *Sedimentary Geology*. 2003. Vol. 156. pp. 169–184.

19. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073.

20. Orug B., Ulutaf E., Pamukgu O., Haluk Selim H., Sonmez T. Rheological stratification and spatial variations in the effective elastic thickness of the lithosphere underneath the central Anatolian region, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. Vol. 176. pp. 1–7.

21. Ranalli G. *Rheology of the Earth*. London. Allen and Unwin. 1987. 336 p.

22. Ranalli G., Murphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*. 1987. Vol. 132. pp. 281–295.

23. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. Vol. 111. No. 5. Issue B05411.

УДК 550.344

DOI: 10.46698/VNC.2024.10.83.002

Оригинальная статья

## Новые данные о структуре поля поглощения S-волн Западного Прикаспия и ее связи с тектоникой и сейсмичностью

О.И. Аптикаева 

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995,  
г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: aptikaevaoi@mail.ru

Статья поступила: 04.03.2024, доработана: 10.06.2024, принята к публикации: 10.06.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В работе рассматривается распределение неоднородностей поля поглощения S-волн в верхней мантии Западного Прикаспия и прилегающих акваторий на существенно расширенной базе данных. Теоретические исследования, направленные на изучение связи свойств низов литосферы с сейсмичностью, актуальны и расширяют наши представления об условиях ее реализации. **Цель исследования** заключается в том, чтобы дополнить и уточнить опубликованную ранее версию распределения латеральных неоднородностей поля поглощения S-волн в районе Западного Прикаспия и прилегающих акваторий. Основанное на них представление о блоковом строении района (взаимном расположении добротных блоков и ослабленных зон) позволит более обоснованно подойти к сопоставлению их с тектоникой района исследований и сейсмичностью. **Методы.** В статье применен разработанный автором оригинальный подход, основанный на исследовании характеристики затухания короткопериодной сейсмической коды, позволяющий детально картировать неоднородности поля поглощения S-волн в верхней мантии. **Результаты.** Основываясь на существенно дополненных данных о пространственном распределении неоднородностей поля поглощения Западного Прикаспия и прилегающих акваторий, рассмотрены вариации блоковой структуры в связи с реализацией нескольких наиболее значительных землетрясений, включая Черногорское 1976 г. и Каспийское 2000 г. Удалось найти соответствие ослабленных зон, относящихся к западной части Каспийского моря с Тырныаузско-Центрально-Каспийской системой глубинных разломов и Северо-Абшеронской кольцевой системой разломов, а также ослабленных зон антикавказского простирания с выявленными в последние годы глубинными сейсмогенными разломами. Рассмотренные в работе примеры сейсмических ситуаций, сложившихся в процессе реализации наиболее заметных землетрясений, свидетельствуют об адекватности представленного блокового строения района исследований. Отмечено, что набор блоков, вовлеченных в процесс реализации каждого рассмотренного события, определяет в каждом конкретном случае состояние объекта исследований и его способность адаптироваться к воздействиям внешних факторов планетарного масштаба, например, вариациям скорости вращения Земли.

**Ключевые слова:** Западный Прикаспий, инструментальные записи, кода-волны, добротность, поле поглощения S-волн, добротный блок, ослабленная зона, тектоника, глубинные разломы, сейсмичность.

**Для цитирования:** Аптикаева О.И. Новые данные о структуре поля поглощения S-волн Западного Прикаспия и ее связи с тектоникой и сейсмичностью. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 21-32. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.83.002

DOI: 10.46698/VNC.2024.10.83.002

Original paper

## New data on the structure of the S-wave attenuation field of the Western Caspian Region and its correlation with tectonics and seismicity

O.I. Aptikaeva 

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123995, Russian Federation,  
e-mail: aptikaevaoi@mail.ru

Received: 04.03.2024, revised: 10.06.2024, accepted: 10.06.2024

**Abstract: Relevance.** The paper examines the distribution of inhomogeneities in the S-wave attenuation field in the upper mantle of the Western Caspian Sea and adjacent water areas using a significantly expanded database. Theoretical studies aimed at studying the correlation between the properties of the lower lithosphere and seismicity are relevant and expand our understanding of the conditions for its implementation. **The aim** of the study is to complement and clarify the previously published version of the distribution of lateral inhomogeneities in the S-wave attenuation field in the Western Caspian region and adjacent water areas. An idea of the block structure of the area based on them (the relative position of blocks with a high  $Q$ -factor and weakened zones) will allow a more reasonable approach to comparing them with the tectonics of the study area and seismicity. **Methods.** The article uses an original approach developed by the author, based on a study of the attenuation characteristics of a short-period seismic code, which makes it possible to map in detail the inhomogeneities of the S-wave attenuation field in the upper mantle. **Results.** Based on significantly expanded data on the spatial distribution of inhomogeneities in the S-wave attenuation field of the Western Caspian region and adjacent water areas, variations in the block structure in connection with the implementation of several of the most significant earthquakes, including the Chernogorsk 1976 and the Kaspisk 2000, are considered. It was possible to find a correspondence of weakened zones belonging to the western part of the Caspian Sea with the Tyrnyauz-Central Caspian system of deep faults and with the North Absheron ring fault system, as well as weakened zones of anti-Caucasian strike with deep seismogenic faults identified in recent years. The examples of seismic situations considered in the work that arose during the implementation of the most noticeable earthquakes indicate the adequacy of the presented block structure of the study area. It is noted that the set of blocks involved in the implementation of each event considered determines the state in each specific case object of research and its ability to adapt to the influence of external factors on a planetary scale, for example, variations of Earth's rotation speed.

**Keywords:** Western Caspian region, instrumental records, coda waves,  $Q$ -factor, S-wave attenuation field, block with a high  $Q$ -factor, weakened zone, tectonics, deep faults, seismicity.

**For citation:** Aptikaeva O.I. New data on the structure of the S-wave attenuation field of the Western Caspian Region and its correlation with tectonics and seismicity. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 21-32. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.83.002

### Введение

Геологическим и геофизическим исследованиям глубинной структуры Кавказа и Каспия всегда уделялось большое внимание (например, [Балавадзе и др., 1966; Винник и др., 1978; Бердичевский и др., 1996; Корничев, Sokolova, 2019; Стогний,

Стогний, 2023; Горбатиков и др., 2023]). В связи с появлением новых методов исследований, использующих естественные волновые поля, таких как, томография, метод приемных функций и других (например, [Lei, Zhao, 2007; Zor, 2008; Gok et al., 2011; Koulakov et al., 2012; Rogozhin et al., 2020; Vinnik et al., 2021]) в изучении глубинной структуры Кавказа и Каспия наметился существенный прогресс. Тем не менее, детали глубинного строения Кавказа остаются слабоизученными. В частности, недостаточно исследованы латеральные вариации структуры мантии и их связь с тектоникой и сейсмичностью.

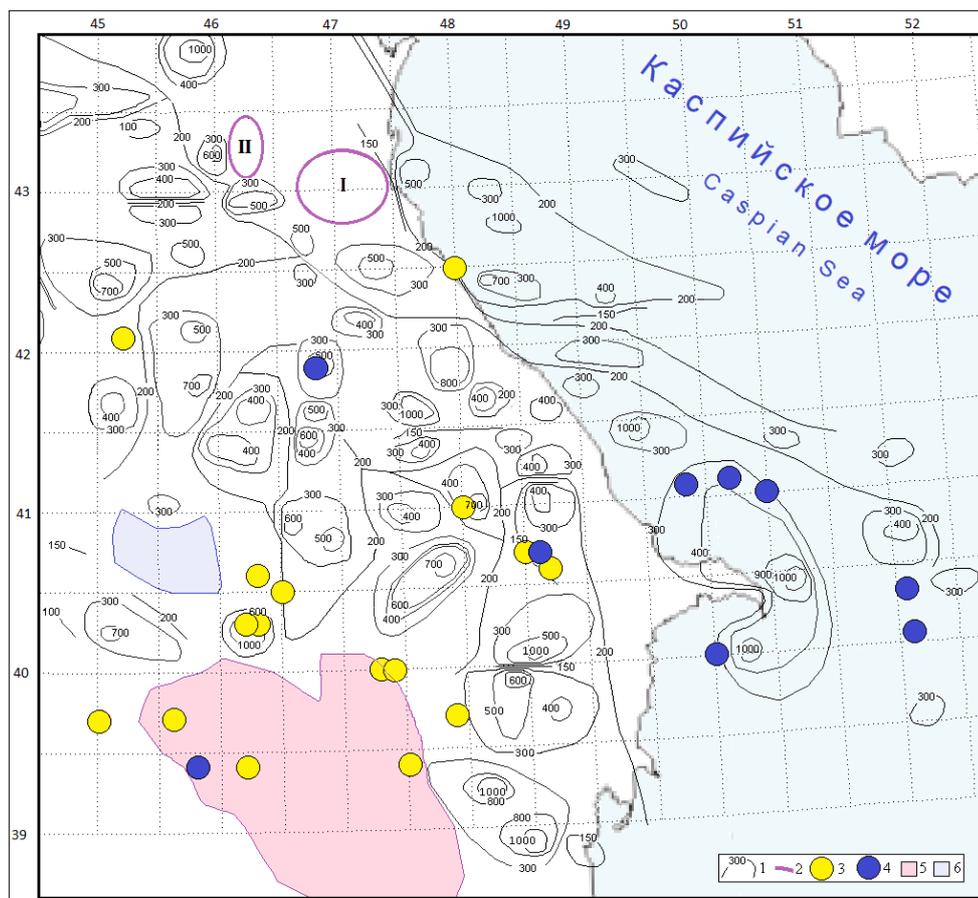
На исследование латеральных неоднородностей структуры поля поглощения нацелены работы, основанные на характере затухания колебаний в сейсмической среде. В работе [Artikaeva, 2020] были представлены некоторые результаты исследования латеральных вариаций структуры поля поглощения в мантии Кавказского региона методом короткопериодной коды. Карта неоднородностей поля поглощения Кавказа была построена по коду землетрясений, записанных станцией Кисловодск (KIV) сети IRIS. Впоследствии с привлечением записей землетрясений сейсмическими станциями Грузинской и Турецкой сетей карта уточнялась [Artikaeva, 2022]. Тем не менее, детальность структуры поля поглощения в верхней мантии Восточного Кавказа оставляла желать лучшего. С появлением в интернете в открытом доступе записей Азербайджанской сети станций стало возможным продвинуться в этом направлении и наиболее существенно по сравнению с предыдущей версией дополнить пространственное распределение неоднородностей поля поглощения Западного Прикаспия и прилегающих акваторий. Оно положено в основу представлений о блоковом строении района (взаимном расположении добротных блоков и ослабленных зон). Таким образом, появилась возможность подойти к анализу связи блокового строения с тектоникой и сейсмичностью района исследований.

### Исходные данные и методика

Для решения поставленных задач были привлечены записи землетрясений станциями KIV и АВКТ (сети IRIS), LGD (сети GO), KARS (сети KO), DSKN, HASN, MV02, MV04 (сети АВ), GO02 (сети ХА) и метод короткопериодной коды, основанный на экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что определяющее влияние на формирование сейсмического волнового поля оказывает структура поля поглощения и, что кода землетрясений, в основном, сформирована поперечными волнами, отраженными от многочисленных слабых субгоризонтальных границ в земной коре и мантии. Эффективная добротность  $Q_s$  оценивалась путем аппроксимации огибающих коды землетрясений кривой  $A(t) = \frac{\exp\left(-\frac{\pi t}{Q_s T}\right)}{t}$ , где  $A(t)$  – амплитуда коды в окрестностях времени  $t$ ;  $Q_s$  – эффективная добротность;  $T$  – период колебаний. Подробно методика описана в работах [Artikaeva, 2020, 2022].

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 сведены все имеющиеся данные о структуре поля поглощения Западного Прикаспия и смежных с ним территорий на глубинах более 200 км.



*Рис. 1. Структура поля поглощения района исследований с учетом новых данных. 1 – изолинии  $Q_s$ ; 2 – границы очаговых зон землетрясений Дагестанского 1970 г. (I) и Курчалойского 2008 г. (II); 3, 4 – эпицентры сильных землетрясений соответственно исторического и инструментального периодов с 1900 г.; 5, 6 – зоны низкой сейсмической активности в течение 1962–1991 гг. /*

*Fig. 1. Structure of the attenuation field in study area taking into account new data 1 – quality factor isolines; 2 – boundaries of the source zones of the earthquakes Dagestan 1970 (I) and Kurchaloi 2008 (II); 3, 4 – epicenters of strong earthquakes, respectively, of the historical and instrumental period since 1900; 5, 6 – zones of low seismic activity during 1962–1991*

Анализируя структуру поля поглощения в сейсмоактивных районах, мы не раз убеждались в том, что активные сейсмогенные разломы трассируют линейные зоны сильного поглощения (ослабленные зоны), например, [Artikaeva, 2020]. В данном случае некоторые крупные элементы тектоники с глубинным заложением также находят отражение в структуре поля поглощения на больших глубинах (рис. 2). Так, локализация и простираие протяженных и ярко выраженных ослабленных зон ( $Q_s=200-250$ ) на севере района исследований соответствует границе, разделяющей тектонические зоны Кавказа и Скифской плиты по [Трифонов и др., 2020]. Кроме того, наблюдается соответствие ослабленных зон, относящихся к западной части Каспийского моря, с Тырныузско-Центрально-Каспийской системой глубинных (распространяющихся в мантию) разломов и Северо-Абшеронской кольцевой системой разломов в рамках генерализированной модели распределения региональных систем разломов Каспийского моря [Полетаева, 2013] (модель основана на комплексном анализе гравитационных, магнитных и сейсмических полей).

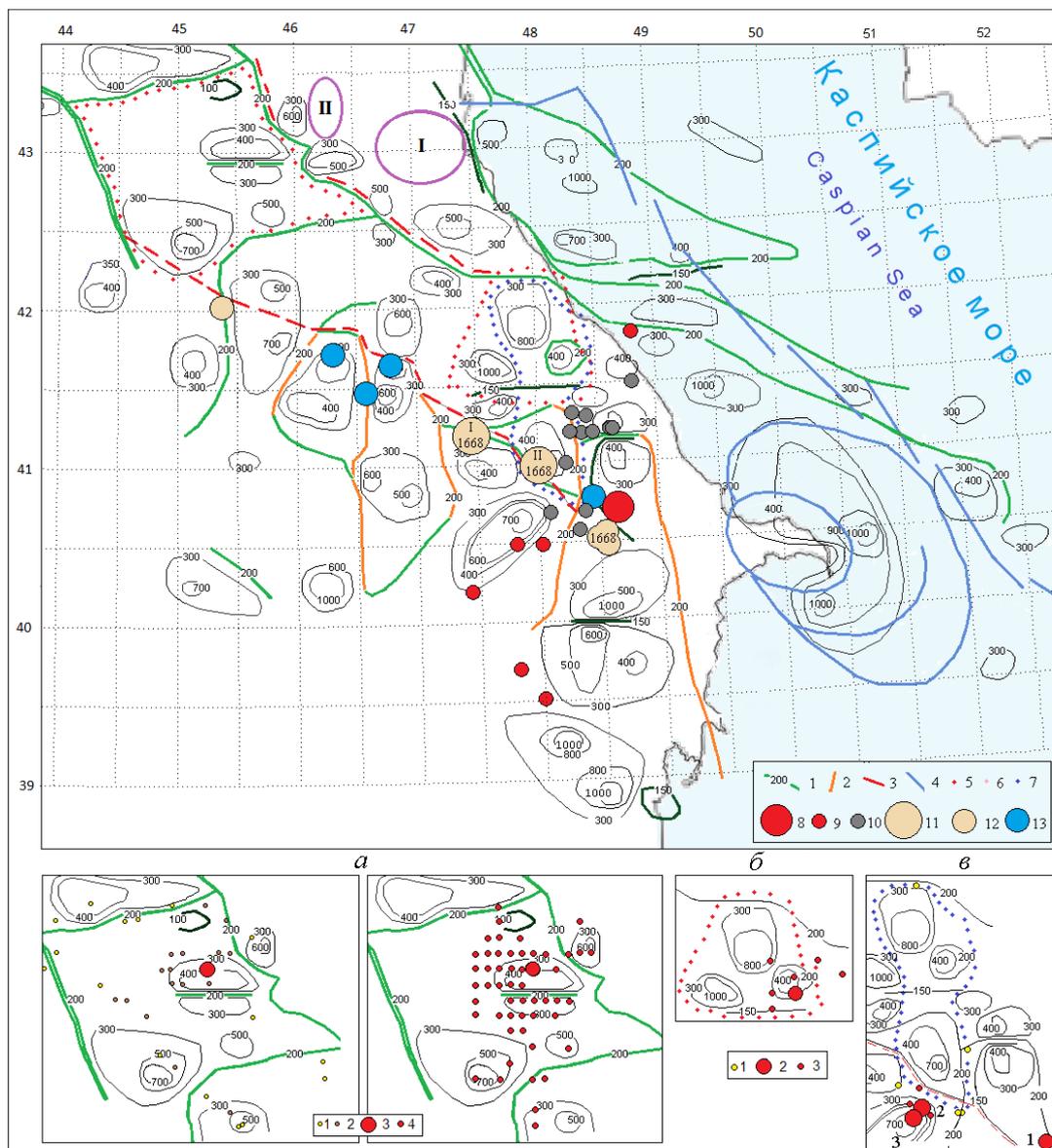


Рис. 2. Поле поглощения Западного Прикаспия и прилегающих акваторий с учетом новых данных. Изолинии добротности  $Q_s=200$  (1); ослабленные зоны антикавказского (2) и кавказского (3) простираения; система разломов Каспийского моря по [Поletaева, 2013] (4); зоны затишья перед землетрясениями: 1976 г. Черногорским (5), 1966 г. (6) и 1981 г. (7); эпицентры землетрясений: Шемахинского 13.02.1902 (8); за период 13.02–27.04.1902 (9); роя землетрясений 20.12.1971 г. (10); 14.01.1668 (11); за период 1.04.1668–18.08.1671 (12); 2012 г. (13) На врезках сейсмические ситуации землетрясений. а – Черногорского: события, предшествующие землетрясению за периоды 2.08.1975–26.01.1976 (1) и 17.07–27.07.1976 (2); главный толчок (3); афтершоки (4); б, в – события, предшествующие землетрясениям 1966 и 1981 гг., их очаги и афтершоки (1-3) /

Fig. 2. Attenuation field of the Western Caspian region and adjacent territories, taking into account new data. Quality factor  $Q_s=200$  isolines (1); weakened zones of anti-Caucasian (2) and Caucasian (3) strike; fault system of the Caspian Sea according to [Poletaeva, 2013] (4); quiescent zones before earthquakes: 1976 Chernogorsk (5), 1966 (6) and 1981 (7); earthquake epicenters: Shemakhi 02/13/1902 (8); for the period 13.02-27.04.1902 (9); earthquake swarm on December 20, 1971 (10); 01/14/1668 (11); for the period 04/01/1668-08/18/1671 (12); 2012 (13) Insets show seismic situations of earthquakes. а – Chernogorsk: events preceding the earthquake for the periods 08/2/1975–01/26/1976 (1) and 07/17–07/27/1976 (2); main shock (3); aftershocks (4); б, в – events preceding the earthquakes of 1966 and 1981, their sources and aftershocks (1-3)

Разломы кавказского простирания проявляются в поле поглощения, в большинстве своем, локальными участками ослабленных зон (см. рис. 2). Это объясняется, скорее всего, тем, что в пределах разломов кавказского простирания сейсмоактивными (т.е. информативными для метода короткопериодной коды) являются лишь их отдельные сегменты небольшой длины. С такими разломами были связаны очаги сильнейших землетрясений конца XX века Дагестанского 1970 г., Рачинского 1991 г., Черногорского 1976 г., Онийского 2009 г., Барисахского 1992 г., структура поля поглощения в очаговых зонах некоторых из них описана в [Artikaeva, 2020].

Более ярко выражены ослабленные зоны антикавказского простирания (см. рис. 2). Отметим, что с помощью разработанного в последние годы метода выявления сейсмогенерирующих зон глубинных разломов по проявлениям слабой сейсмичности обнаружены глубинные разломы антикавказского (ЮЗ-СВ) простирания [Mammadli, Rogozhin, 2018]. Эти разломы долгое время оставались недооцененными в качестве опасных сейсмогенерирующих структур, хотя с некоторыми из них связаны очаги сильных землетрясений, например, Курчалойского землетрясения 2008 г. с  $M=5.6$ . Структура поля поглощения в пределах очага этого землетрясения включает ослабленные зоны северо-восточного простирания [Artikaeva, 2020].

В последнее время к этой теме авторы обращаются все чаще. Например, в работе [Yetirmishli et al., 2019] как основные сейсмогенные разломы, среди прочих, упоминаются Казах-Сигнахский, Шарур-Загатальский и Гянджачай-Алазанский разломы, которые ассоциируются с ослабленными зонами в западной части района исследований, а в работе [Етирмишли и др., 2023] обсуждается сейсмичность Азербайджана в 2018–2019 гг., связанная с Западно-Каспийским, Таирджачай-Сальянским, Астара-Дербендским и Гызылбогаз-Девичинским разломами, которые большими сегментами совпадают с ослабленными зонами в восточной его части.

Как известно, сейсмическому затишью перед сильным событием отвечает состояние консолидированного блока, когда при данном уровне тектонических напряжений составляющие его малые блоки занимают такое положение, что их взаимные перемещения отсутствуют. Так, зона затишья, сформировавшаяся перед Черногорским землетрясением 1976 г., включает несколько малых блоков. Границы большого блока совпадают с долгоживущими ослабленными низкодобротными зонами, а ослабленные зоны, разделяющие малые блоки, проявляются время от времени. Сейсмическую активизацию, предшествующую этому землетрясению можно разбить на несколько этапов: с 2.08.1975 по 26.01.1976 г. эпицентры событий оконтурили зону затишья по долгоживущим ослабленным зонам (см. рис. 2 врезка а), по мере приближения к моменту возникновения главного события (28.07.1976 г.) они стягивались к его очагу, а с 17.07 по 27.07.1976 г. практически окружили его.

Развитие сейсмической ситуации в процессе реализации этого землетрясения описывает случай, когда зона затишья, которая может быть ассоциирована с относительно консолидированным объемом, сокращается от периферии к центру. Не исключено, что в данном случае работает схема деконсолидации периферийных участков консолидированного блока в результате флюидизации. Судя по локализации афтершоков (см. рис. 2 врезка а) процесс завершается полной деструкцией ранее консолидированного объема.

Проанализировав сейсмическую ситуацию за год, предшествующий землетрясению 1966 г., можно сказать, что по завершении процесса его подготовки три малых блока объединились в большой (рис. 2 врезка б). В результате афтершокового

процесса большой консолидированный блок лишился малого восточного блока.

Консолидированный блок, сложившийся перед двумя последними из серии землетрясений  $M=4.5-5.2$ , которые произошли 19, 29 ноября и 2 декабря 1981 г. (№1-3 на рис. 2 врезка в), оконтурили предшествующие им события. Очаги сильных землетрясений локализованы на границе консолидированного блока, а их афтершоки компактно расположены вокруг очагов сильных событий. В данном случае процесс развивается не по пути разрушения консолидированного блока, а посредством его движения по долгоживущим ослабленным зонам и передачи напряжений в соседние блоки. Таким образом, консолидированный блок сохранил свои размеры.

Следует отметить, что на изучаемой территории имеют место зоны очень низкой сейсмической активности в течение длительного времени (см. рис. 1). Такие зоны можно рассматривать в качестве консолидированных блоков на том основании, что в иерархически построенных блочных средах в течение некоторого времени могут существовать большие блоки, в пределах которых взаимные перемещения составляющих их малых блоков (относительно слабые землетрясения) отсутствуют. Сами же большие блоки могут перемещаться, результатом чего могут быть крупные события, приуроченные к границам этих блоков. Большинство приведенных на рис. 1 землетрясений приурочены к границам добротных блоков или принятых нами в качестве блоков зон низкой сейсмической активности.

Обращает на себя внимание повышенная концентрация очагов с  $M>6.0$  вокруг крупного добротного блока в зоне Южного Каспия. К этому блоку приурочены еще несколько землетрясений с магнитудой  $M=6.0-6.3$ . Рассматривая этот факт совместно с вариациями скорости вращения Земли, можно заметить, что моментам возникновения пяти близких по магнитуде событий в зоне Южного Каспия соответствуют близкие скорости вращения Земли (рис. 3а), иными словами, в этом месте максимальные напряжения, которые способен накопить блок, реализуются в виде сильных событий, под воздействием схожих внешних факторов.

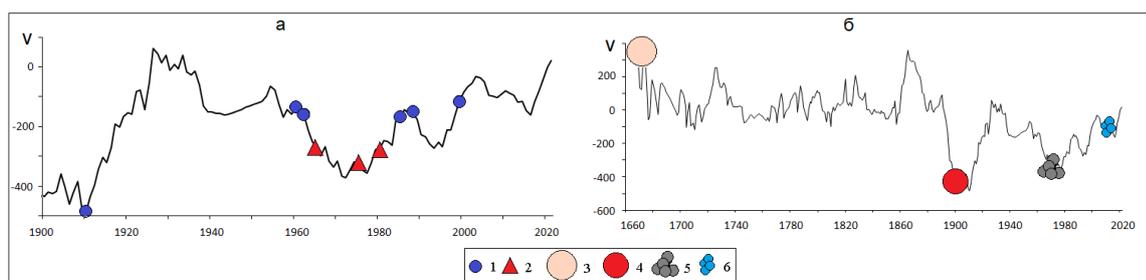


Рис. 3. Моменты возникновения описанных в работе землетрясений на фоне вариаций скорости вращения Земли<sup>1</sup>; землетрясения: 1 – 1911, 1961, 1963, 1986, 1989 и 2000 гг., 2 – 1966, 1976 и 1981 гг., 3 – 1668 г., 4 – 1902 г., 5 – 1971 г., 6 – 2012 г. /

Fig. 3. Moments of occurrence of the earthquakes described in the work against the background of variations in the Earth's<sup>2</sup> rotation speed; earthquakes: 1 – 1911, 1961, 1963, 1986, 1989 and 2000, 2 – 1966, 1976 and 1981, 3 – 1668, 4 – 1902, 5 – 1971, 6 – 2012

Рассмотрим сейсмическую ситуацию в зоне Южного Каспия в процессе реализации двух из шести упомянутых Каспийских землетрясений – 1963 и 2000 гг. В обоих случаях в сейсмический процесс были вовлечены большие добротные объ-

<sup>1</sup> Временной ряд вариаций скорости вращения Земли любезно предоставлен Н.С. Сидоренковым.

<sup>2</sup> The time series of variations in the Earth's rotation speed was kindly provided by N.S. Sidorenkov.

емы, что позволило реализоваться землетрясениям большой силы, хотя процессы реализации приуроченных к ним землетрясений отличались.

Землетрясение 2000 г. произошло в условиях роста скорости вращения Земли (см. рис. 3а) и сжатия ее поверхности, когда малые блоки занимают наиболее компактное положение, при этом большой блок становится более консолидированным. С начала 1999 г. по март 2000 г. в юго-восточной части района исследований сформировалась обширная зона затишья (рис. 4а), которую можно ассоциировать с таким блоком.

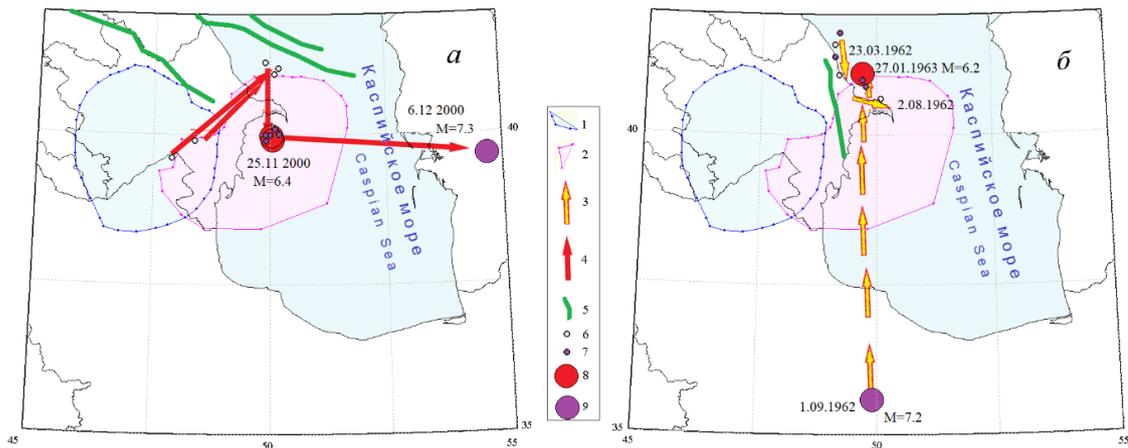


Рис. 4. Сейсмическая ситуация в процессе реализации Каспийских землетрясений 2000 (а) и 1963 гг. (б). 1, 2 – зоны затишья, сформировавшиеся перед землетрясениями 27.01.1963 г. и 25.11.2000 г.; 3, 4 – направление их сейсмического процесса; 5 – ослабленные зоны; 6 – эпицентры землетрясений  $K > 11$ , предшествующих главным событиям, 7 – их афтершоки; 8, 9 – главные толчки и связанные с ними сильные события /

Fig. 4. Seismic situation during the implementation of the Caspian earthquakes of 2000 (a) and 1963. (b). 1, 2 – quiescent zones formed before the earthquakes of January 27, 1963 and November 25, 2000; 3, 4 – direction of their seismic process; 5 – weakened zones; 6 – epicenters of  $K > 11$  earthquakes preceding the main events, 7 – their aftershocks; 8, 9 – main shocks and strong events associated with them

Зона охватывает несколько добротных блоков и линейную ослабленную зону субмеридионального простирания. С марта по сентябрь 2000 г. по периферии зоны затишья произошло 5 землетрясений энергетического класса  $K > 11.0$ , а 25 ноября произошли два, следующих друг за другом, сильных  $K = 13.5$  и  $14.2$  землетрясения с близкими эпицентрами (см. рис. 4а). Основные афтершоки в данном случае локализованы компактно.

Перед другим землетрясением 27.01.1963 г. ( $M = 6.2$ ), относящимся к тому же блоку, также сформировалась зона затишья (рис. 4б). С блоком она граничит по протяженной ослабленной зоне антикавказского простирания, вдоль которой локализованы эпицентры предшествующих главному толчку событий и его афтершоки.

Компактное положение эпицентров афтершоков землетрясения 2000 г. (период быстрого роста скорости вращения Земли) говорит о переупаковке малых блоков в пределах большого, тогда как, эпицентры форшоков, предшествующих сильному землетрясению 1963 г., и его афтершоков, расположенные вдоль ослабленной зоны, указывают на деструкцию сложившегося перед сильным событием объекта в период снижения скорости вращения Земли.

Каждое из этих землетрясений может быть примером, демонстрирующим процесс перераспределения напряжений вдоль ослабленных зон (стрелками показана

последовательность событий). В случае Каспийского землетрясения 2000 г. сброс напряжений в его очаге вполне мог спровоцировать Балханское землетрясение 2000 г. с  $M=7.3$  на противоположном берегу Каспия (они произошли с интервалом всего в несколько дней 25.11–6.12).

Сценарий землетрясения 1963 г. сложнее. Предшествующие ему события марта–августа 1962 г. в северной части района могли спровоцировать землетрясение на юге в сентябре 1962 г. с  $M=7.2$ , которое, в свою очередь, спровоцировало землетрясение 27 января 1963 г. с  $M=6.2$  на севере. Между очагами двух сильных событий расположена ослабленная зона субмеридионального простирания.

Рассмотрим в этом контексте несколько знаковых событий, произошедших в контрастные по скорости вращения Земли периоды. Сильнейшее Шемахинское землетрясение 1902 г. с  $M=6.9$  относится к периоду минимальных за последние 450 лет среднегодовых значений скорости вращения Земли (рис. 3б). Кроме Шемахинского землетрясения обращает на себя внимание рой из 5 землетрясений с  $K=12-13$  (20 декабря 1971 г.), который приходится на минимум скорости вращения Земли 70-х годов прошлого века.

Последовательность эпицентров первых афтершоков Шемахинского землетрясения 1902 г. локализована по простиранию Западно-Каспийского сдвигового разлома (см. рис. 2). В том же направлении ориентированы и эпицентры событий, последовавших за роём 1971 г. В направлении антикавказских разломов ориентированы также афтершоки землетрясений Каспийского 1963 г. и описанного выше землетрясения 1966 г. Они относятся к периоду снижения скорости вращения Земли. Напрашивается вывод, что реализация таких событий в зонах разломов антикавказского простирания является способом адаптации к внешним воздействиям этого геодинамического объекта в условиях снижающейся скорости вращения Земли или ее минимальных среднегодовых значений.

В непосредственной близости к очаговой зоне Шемахинского землетрясения 1902 г. 14.01.1668 г. произошло землетрясение с  $M=7.8$  (его эпицентры по разным данным: I – (Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. Ред. Уломов В.И., Медведева Н.С.) и II - [Никонов, 1982] показаны на рис. 2). Это землетрясение произошло на фоне высоких значений скорости вращения Земли. Эпицентры событий, которые могут быть ассоциированы с этим землетрясением ориентированы в направлении параллельном оси горного сооружения Большого Кавказа. На фоне высоких или растущих значений скорости вращения Земли произошли также: серия землетрясений с  $M>5.0$  в 2012 г., землетрясения ноября–декабря 1981 г., а также землетрясения  $K>11.0$  марта–сентября 2000 г., которые локализованы по периферии зоны затишья перед Каспийским землетрясением 2000 г. Очаги этих событий также расположены вдоль оси горного сооружения Большого Кавказа. Реализация таких землетрясений в зоне взбросо-надвиговых разломов является способом адаптации к внешним воздействиям данного геодинамического объекта, в условиях максимальной или растущей скорости вращения Земли.

## Выводы

На основе существенно расширенной по сравнению с предыдущими исследованиями базы данных проведен анализ связи блокового строения Западного Прикаспия и прилегающих акваторий с тектоникой и сейсмичностью. При этом выявлено

соответствие ослабленных зон, относящихся к западной части Каспийского моря, с Тырнаузско-Центрально-Каспийской системой глубинных разломов и Северо-Абшеронской кольцевой системой разломов. Разломы кавказского простирания проявляются в поле поглощения локальными участками ослабленных зон. Более ярко выражены ослабленные зоны антикавказского простирания, которые соотносятся с ориентированными в том же направлении глубинными разломами.

Рассмотренные в работе примеры сейсмических ситуаций, сложившихся в процессе реализации наиболее заметных землетрясений, свидетельствуют об адекватности представленного блокового строения района исследований.

Из анализа сейсмичности района исследований на фоне вариаций скорости вращения Земли следует, что адаптация его геодинамических объектов к внешним воздействиям в условиях минимальной, а также снижающейся среднегодовой скорости вращения Земли осуществляется за счет реализации сильных и умеренных землетрясений в зоне разломов антикавказского простирания. Тогда как, в условиях роста или максимальной среднегодовой скорости вращения Земли способом адаптации геодинамических объектов к внешним воздействиям является реализация землетрясений в зонах разломов кавказского простирания.

### Литература

1. Балавадзе Б.К., Твалтвадзе Г.К., Шенгелая Г.Ш., Сихарулидзе Д.И., Картвелишвили К.М. Геофизические исследования земной коры и верхней мантии в области Кавказа. // Геотектоника. – 1966. – № 3. – С. 30–40.
2. Бердичевский М.Н., Борисова В.П., Голубцова Н.С., Ингеров А.И., Коновалов Ю.Ф., Куликов А.В., Солодилов Л.Н., Чернявский Г.А., Шпак И.П. Опыт интерпретации МТ-зондирований в горах Малого Кавказа. // Физика Земли. – 1996. – № 4. – С. 99–117.
3. Винник Л.П., Годзиковская А.А., Патарая Е.И., Сихарулидзе Д.И., Баграмян А.Х. Скоростные аномалии верхней мантии Кавказа. // Физика Земли. – 1978. – № 7. – С. 22–31.
4. Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Милуков В.К., Миронов А.П., Хубаев Х.М., Мельков Д.А., Кануков А.С., Абаева З.В., Шманатов Г.В., Габараев А.Ф., Ревазов М.О. Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. – 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003.
5. Етирмишли Г.Д., Абдуллаева Р.Р., Исмаилова С.С., Казымова С.Э. Сейсмичность Азербайджана и прилегающих территорий в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 56–66. DOI: 10.35540/1818-6254.2023.26.04.
6. Никонов А.А. Сильнейшее землетрясение Большого Кавказа 14 января 1668 г. // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 9. – С. 90–106.
7. Полетаева Е.В. Разломно-блоковая модель земной коры Каспийского моря. // Ученые записки Тамбовского отделения РОСМУ. – 2013. – № 1. – С. 175–182.
8. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001.
9. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Хессами Х. Мезозойско-кайнозойская структура Черноморско-Кавказско-Каспийского региона и ее соотношение со строением верхней мантии. // Геотектоника. – 2020. – № 3. – С. 55–81.
10. Aptikaeva O.I. S-Wave Attenuation Field and Seismotectonics of Eastern Anatolia. // Seismic Instruments. – 2020. – Vol. 56. – pp. 106–120. DOI: 10.3103/S074792392001003X.

11. Aptikaeva O.I. Source of the 1902 Shamakhi Earthquake on the Background of Attenuation Field Inhomogeneities and Seismicity of the Western Caspian Region. // *Seismic Instruments*. – 2022. – Vol. 58. – pp. S67–S78. DOI: 10.3103/S0747923922070027.
12. Gok R., Mellors R.J., Sandvol E., Pasyanos M., Hauk T., Takedatsu R., Yetirmishli G., Teoman U., Turkell N., Godoladze T., Javakishvirli Z. Lithospheric velocity structure of the Anatolian plateau-Caucasus-Caspian region. // *Journal of Geophysical Research*. – 2011. – Vol. 116. – B05303. DOI: 10.1029/2009JB000837.
13. Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Heterogeneities of the field of *S*-wave attenuation in the lithosphere of the Caucasus and their relationship with seismicity. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2019. Vol. – 55. No. – 10. pp. 1526–1535. DOI: 10.1134/S0001433819100050.
14. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. // *Solid Earth*. – 2012. – Vol. 3. Issue 2. – pp. 327–337. DOI: 10.5194/se-3-327-2012.
15. Lei J., Zhao D. Teleseismic evidence for a break-off subducting slab under Eastern Turkey. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2007. – Vol. 257. Issue 1–2. – pp. 14–28.
16. Mammadli T.Y., Rogozhin E.A. Transverse Faults of the Eastern Caucasus and Their Manifestations in Seismicity. // *Seismic Instruments*. – 2018. – Vol. 45. – No. 2. – pp. 21–30. DOI: 10.21455/VIS2018.2-2.
17. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Kharazova Yu.V., Sysolin A.I., Andreeva N.V., Pogrebchenko V.V., Chervinchuk S.Yu., Chen Jiec, Liu Jiaoc, Ovsyuchenko A.N., Lar'kov A.S. Deep Structure of the Northwestern Termination of the Caucasus from New Geological and Geophysical Data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2020. – Vol. 56. – No 6. – pp. 772–788. DOI: 10.1134/S1069351320060075.
18. Vinnik L.P., Kosarev G.L., Makeeva L.I., Oreshin S.I. The Caucasus and the Caspian Sea: topography of deep seismic boundaries. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2021. – No. 4. – pp. 47–60.
19. Yetirmishli G.D., Mammadli T.Ya., Rogozhin E. A., Sysolin A.I. Seismic Activation in the Eastern Part of the Southern Slope of the Great Caucasus in the Late XX to Early XXI Centuries. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2019. – Vol. 55. – No. 8. – pp. 870–88. DOI: 10.1134/S0001433819080024.
20. Zor E. Tomographic evidence of slab detachment beneath eastern Turkey and the Caucasus. // *Geophysical Journal International*. – 2008. – Vol. 175. – Issue 3. – pp. 1273–1282.

## References

1. Balavadze B.K., Tvaltvdze G.K., Shengelaya G.Sh., Sikharulidze D.I., Kartvelishvili K.M., Geophysical investigations of the Earth's crust and upper mantle in the region of Caucasus. *Geotektonika*. 1966. No. 3. pp. 30–40. (in Russ.)
2. Berdichevskii M.N., Borisova V.P., Golubtsova N.S., Ingerov A.I., Konovalov Yu.F., Kulikov A.V., Solodilov L.N., Chernyavskii G.A., Shpak I.P. Interpretation of magnetotelluric soundings in the Lesser Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1996. No. 4. pp. 99–117. (in Russ.)
3. Vinnik, L.P., Godzikovskaya, A.A., Pataraya, E.I., Sikharulidze, D.I., Bagramyan, A.Kh. Velocity anomalies of the upper mantle beneath Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1978. No. 7. pp. 22–31. (in Russ.)
4. Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu., Milyukov V.K., Mironov A.P., Khubaev Kh.M., Melkov D.A., Kanukov A.S., Abaeva Z.V., Shmanatov G.V., Gabaraev A.F., Revazov M.O. Deep structure, seismicity, tectonics of the northern flank of the Greater Caucasus and the Terek-Caspian trough (North Ossetia) within the framework of a unified kinematic model based on new geophysical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003. (in Russ.)

5. Yetirmishli G.D., Abdullaeva R.R., Ismailova S.S., Kazimova S.E. Seismicity of Azerbaijan and adjacent territories in 2018–2019. *Earthquakes in Northern Eurasia*. 2023. Issue 26 (2018–2019). pp. 56–66. DOI: 10.35540/1818-6254.2023.26.04. (in Russ.)
6. Nikonov A.A. A very powerful earthquake in the Greater Caucasus Mountains, January 14, 1668. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. 1982. No. 9. pp. 90–106. (in Russ.)
7. Poletaeva E.V. Fault-block model of the Earth's crust of the Caspian Sea. *Scientific notes of the Tambov branch of ROSMU*. 2013. No. 1. pp. 175–182. (in Russ.)
8. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001. (in Russ.)
9. Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., Sokolov S.A., Hessami K. Mesozoic–Cenozoic structure of the Black Sea – Caucasus–Caspian region and its relationships with the upper mantle structure. *Geotectonics*. 2020. No. 3. pp. 55–81. (in Russ.)
10. Aptikaeva O.I. S-Wave Attenuation Field and Seismotectonics of Eastern Anatolia. *Seismic Instruments*. 2020. Vol. 56. pp. 106–120. DOI: 10.3103/S074792392001003X.
11. Aptikaeva O.I. Source of the 1902 Shamakhi Earthquake on the Background of Attenuation Field Inhomogeneities and Seismicity of the Western Caspian Region. *Seismic Instruments*. 2022. Vol. 58. pp. S67–S78. DOI: 10.3103/S0747923922070027.
12. Gok R., Mellors R.J., Sandvol E., Pasyanos M., Hauk T., Takedatsu R., Yetirmishli G., Teoman U., Turkell N., Godoladze T., Javakishviri Z. Lithospheric velocity structure of the Anatolian plateau-Caucasus-Caspian region. *Journal of Geophysical Research*. 2011. Vol. 116. B05303. DOI: 10.1029/2009JB000837.
13. Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Heterogeneities of the field of S-wave attenuation in the lithosphere of the Caucasus and their relationship with seismicity. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. Vol. 55. No. 10. pp. 1526–1535. DOI: 10.1134/S0001433819100050.
14. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. *Solid Earth*. 2012. Vol. 3. Issue 2. pp. 327–337. DOI: 10.5194/se-3-327-2012.
15. Lei J., Zhao D. Teleseismic evidence for a break-off subducting slab under Eastern Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. Vol. 257. Issue 1–2. pp. 14–28.
16. Mammadli T.Y., Rogozhin E.A. Transverse Faults of the Eastern Caucasus and Their Manifestations in Seismicity. *Seismic Instruments*. 2018. Vol. 45. No. 2. pp. 21–30. DOI: 10.21455/VIS2018.2-2.
17. Rogozhin E.A., Gorbaticov A.V., Stepanova M.Yu., Kharazova Yu.V., Sysolin A.I., Andreeva N.V., Pogrebchenko V.V., Chervinchuk S.Yu., Chen Jiec, Liu Jiaoc, Ovsyuchenko A.N., Lar'kov A.S. Deep Structure of the Northwestern Termination of the Caucasus from New Geological and Geophysical Data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. Vol. 56. No 6. pp. 772–788. DOI: 10.1134/S1069351320060075.
18. Vinnik L.P., Kosarev G.L., Makeeva L.I., Oreshin S.I. The Caucasus and the Caspian Sea: topography of deep seismic boundaries. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2021. No. 4. pp. 47–60.
19. Yetirmishli G.D., Mammadli T.Ya., Rogozhin E.A., Sysolin A.I. Seismic Activation in the Eastern Part of the Southern Slope of the Great Caucasus in the Late XX to Early XXI Centuries. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. Vol. 55. No. 8. pp. 870–88. DOI: 10.1134/S0001433819080024.
20. Zor E. Tomographic evidence of slab detachment beneath eastern Turkey and the Caucasus. *Geophysical Journal International*. 2008. Vol. 175. Issue 3. pp. 1273–1282.

УДК 539.3

DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003

Оригинальная статья

## О предвестнике землетрясения в сейсмоопасной горной территории

В.А. Бабешко<sup>1</sup>, О.В. Евдокимова<sup>2</sup>, О.М. Бабешко<sup>1</sup>,  
С.Б. Уафа<sup>1</sup>, В.В. Лозовой<sup>2</sup>, В.С. Евдокимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар,  
ул. Ставропольская, 149, e-mail: rector@kubsu.ru;

<sup>2</sup> Южный научный центр РАН, Россия, 344006, Ростов-на-Дону,  
пр. Чехова, 41, e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

Статья поступила: 15.04.2024, доработана: 12.06.2024, принята к публикации: 14.06.2024

**Резюме:** Актуальность работы состоит в необходимости дальнейшего развития применения высокоточных механико-математических методов в проблеме прогноза нарастания сейсмичности. В частности, строгих математических подходов исследования сейсмичности на горных территориях крайне мало. Целью проведенных исследований явилось решение задачи выявления условий резонансного поведения гармонически колеблющихся литосферных плит, а также горных массивов, вызываемого периодическими приливными воздействиями Луны, атмосферными и иными источниками. **Методы работы.** Применение новейших математических разработок в области механики деформируемых штампов, опубликованных в высокорейтинговых журналах. Изучается тот случай, когда разлом может иметь любую ширину и литосферные плиты могут приближаться торцами. Такая же ситуация возникает на достаточно узких горных дорогах, окруженных скальными образованиями, а также при приближении долин, где горные гряды оказываются достаточно удаленными. Применяется новейшая разработка, опирающаяся на метод блочного элемента, а также теория контактных задач с деформируемым штампом. При исследовании, использованы методы блочного элемента. **Результаты исследования.** Разработан метод учета разнотипности горных рельефов и пород за счет возможности перехода, при описании берегов трещин нового типа, к материалам изменяемых реологий и установлены дисперсионные соотношения для определения резонансных частот. Таким образом, с помощью применяемых новых методов в статье показана возможность получения соотношений, позволяющих оценивать степень опасности разрушения литосферных плит.

**Ключевые слова:** разломы, литосферные плиты, резонансы, землетрясение, контактная задача, деформируемые штампы, интегральное уравнение.

**Благодарность:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, Кубанского научного фонда, региональный проект № 24-11-20006.

**Для цитирования:** Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Уафа С.Б., Лозовой В.В., Евдокимов В.С. О предвестнике землетрясения в сейсмоопасной горной территории. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 33-44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003

DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003

Original paper

## About earthquake precursors in an earthquake-prone mountainous area

V.A. Babeshko<sup>1</sup>, O.V. Evdokimova<sup>2</sup>, O.M. Babeshko<sup>1</sup>,  
S.B. Uafa<sup>1</sup>, V.V. Lozovoy<sup>2</sup>, V.S. Evdokimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kuban State University, 149 Stavropol Str., Krasnodar 350040, Russian Federation,  
e-mail: rector@kubsu.ru;

<sup>2</sup> Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,  
Rostov-on-Don 344006, Russian Federation,  
e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

Received: 15.04.2024, revised: 12.06.2024, accepted: 14.06.2024

**Abstract:** The relevance of the work lies in the need for further development of the use of high-precision mechanical and mathematical methods in the problem of forecasting the increase in seismicity. In particular, there are very few rigorous mathematical approaches to studying seismicity in mountainous areas. **The purpose of the research** was to solve the problem of identifying the conditions of resonant behavior of harmoniously vibrating lithospheric plates, as well as mountain ranges caused by periodic tidal influences of the Moon, atmospheric and other sources. **Methods.** Application of the latest mathematical developments in the field of deformable stamp mechanics, published in highly rated journals. The case is being studied when a fault can have any width and lithospheric plates can approach with their ends. The same situation occurs on fairly narrow mountain roads surrounded by rock formations, as well as when approaching valleys where mountain ranges are quite remote. The latest development is applied, based on the block element method, as well as the theory of contact problems with a deformable stamp. In the study, block element methods were used. **Results.** A method has been developed to account for the diversity of mountain reliefs and rocks due to the possibility of transition, when describing the crack edges of a new type, to materials of variable rheologies and dispersion relations have been established to determine resonant frequencies. Thus, using the applied new methods, the article shows the possibility of obtaining ratios that allow assessing the degree of destruction danger for lithospheric plates.

**Keywords:** faults, lithospheric plates, resonances, earthquake, contact problem, deformable stamps, integral equation.

**Acknowledgments:** The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, the Kuban Science Foundation, regional project No. 24-11-20006.

**For citation:** Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Uafa S.B., Lozovoy V.V., Evdokimov V.S. About earthquake precursors in an earthquake-prone mountainous area. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 33-44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003

### Введение

В ранее опубликованной работе авторов [Евдокимова и др., 2022], с использованием трещин нового типа, построены дисперсионные уравнения, служащие целям вычисления резонансных частот, справедливых только для удаленных литосферных плит. В настоящей работе этот недостаток устраняется. Разработаны методы,

позволяющие строить дисперсионные соотношения для определения резонансных частот для случаев любой близости торцов литосферных плит. Этот подход позволил исследовать малоизученные некоторые вопросы оценки сейсмического состояния в горных местностях, имеющих протяженные дороги или ущелья. Они зачастую играют важнейшую роль для коммуникаций в горных местностях, часто, связанную с жизнедеятельностью проживающего там населения.

В работе, наряду с вопросами сейсмичности, связанными с литосферными плитами, изучается вопрос сейсмичности территории в горной местности, имеющей ущелья, которые можно интерпретировать как трещины нового типа. В частности, эти ущелья могут служить целям коммуникаций, с проложенными дорогами или с горными реками. Окружающие их горы могут рассматриваться как берега трещин нового типа. Как и в предыдущей работе, главную роль в исследовании играют обнаруженные ранее и еще малоизученные трещины нового типа [Babeshko et al., 2019; Babeshko et al., 2021]. Охват всех диапазонов изменения параметров трещин нового типа является главной задачей исследования, позволяющей более широко использовать этот механико-математический объект в практическом применении. Важным, при использовании трещин нового типа, является возможность, пусть приближенная, учета деформируемости и изменяемости материалов разной реологии как основания в вершине трещины, так и ее берегов. Новым является возможность приближенного учета влияния горных массивов как штампов некоторой аппроксимирующей реологии, которую можно изменять, используя некоторые ориентиры, определяемые характером распространяющихся там волн [Бабешко и др., 2021]. В условиях отсутствия иных подходов, предлагаемый метод может служить некоторым приближением для оценки сейсмической обстановки в горных регионах.

Вопросам оценки сейсмичности территорий и применения различных методов и способов прогноза землетрясений и ущерба, следующих за ними оползней и селей, посвящено значительное число важных работ, облегчающих дальнейшие исследования. Следует упомянуть многочисленные предвестники землетрясений, а также подходы и методы, изложенные в работах [Заалишвили и др., 2021; Чернов, 1989; Lu et al., 2007; Chernov et al., 2020; Садовский и др., 1987; Xia et al., 2004; Xia et al., 2005; Geller, 1997; Kagan, 1997; Keer, 1979; Main, Meredith, 1989; Mogi, 1967; Scholz et al., 1973; Wyss, 1991; Atkinson, 1981; Mitchell et al., 2013; Mitchell et al., 2015; Togo, 2011 и др.], каждая из которых, несомненно, содействовала развитию новых методов прогноза, в том числе, и с применением трещин нового типа.

### Постановка задачи

Считаем, с учетом необходимости дальнейшего исследования граничных задач для линейно деформируемых тел, что приливные воздействия на литосферные плиты поверхности Земли описываются комплексной функцией  $e^{-i\omega t}$ . Она сокращается в уравнениях и приводит их к стационарной граничной задаче для амплитуд. На ее верхней границе вводится декартова система координат с осями  $Ox_1$ ,  $Ox_2$  в касательной плоскости и  $Ox_3$  по нормали. Примеры моделируемых ущелий-трещин в горных грядках приводятся на рисунках 1, 2, 3.



Рис. 1. Алагирское ущелье. Северная Осетия / Fig. 1. Alagir gorge. North Ossetia

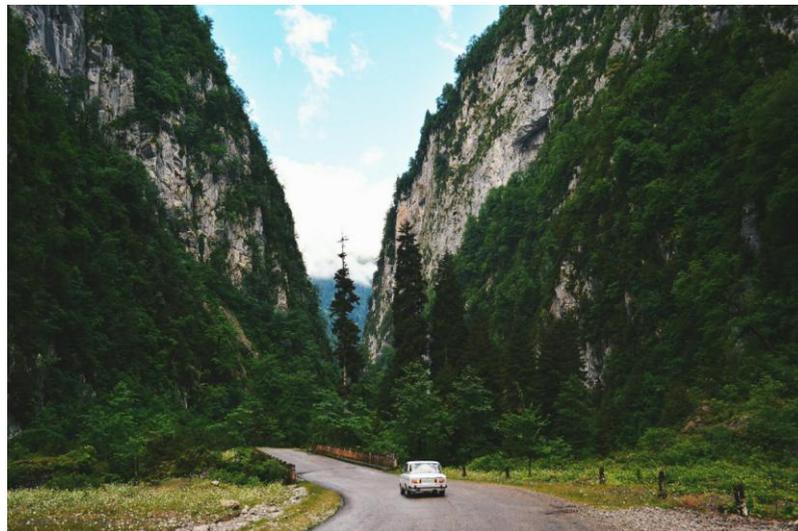


Рис. 2. Бзыбское ущелье в Абхазии / Fig. 2. The Vzyb gorge of Abkhazia

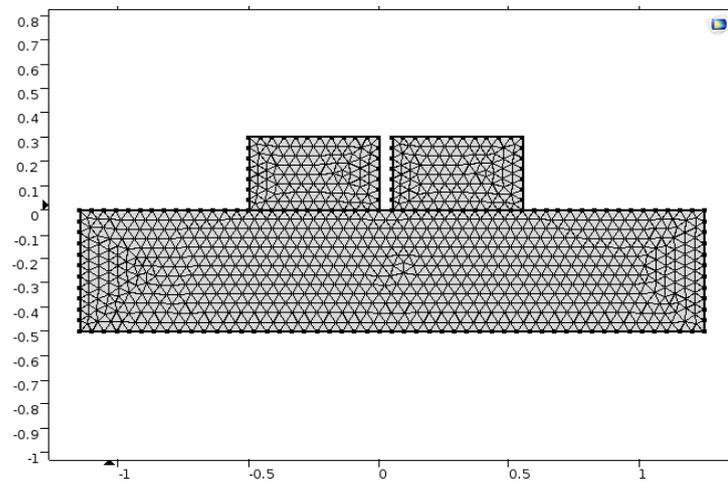


Рис. 3. Модель литосферных плит на основании, разделенных ущельем / Fig. 3. Model of lithospheric plates on a base separated by a gorge.

Рассмотрим случай, когда материал описывается уравнениями Гельмгольца. Материал в зоне трещин описывается дифференциальными уравнениями Гельмгольца (рис. 3):

$$\begin{aligned} & [ \partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2 ] \varphi_{-A1}(x_1, x_2) = g(x_1, x_2), \quad g(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2), \\ & \Omega_{-A}(-\infty \leq x_1 \leq -A, |x_2| \leq \infty), \quad p^2 = c\omega^2 \\ & [ \partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2 ] \varphi_{A1}(x_1, x_2) = g(x_1, x_2), \quad g(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2), \\ & \Omega_A(A \leq x_1 \leq \infty, |x_2| \leq \infty) \end{aligned} \tag{1}$$

с граничными условиями

$$\varphi_{-A1}(x_1, x_2) = \varphi(-A, x_2), \quad x_1 \rightarrow -A, \quad \varphi_{A1}(x_1, x_2) = \varphi(A, x_2), \quad x_1 \rightarrow A,$$

Введя соотношение:

$$\varphi(x_1, \alpha_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x_1, x_2) e^{i\alpha_2 x_2} dx_2,$$

получаем одномерную граничную задачу с параметром  $\alpha_2$ :

$$\begin{aligned} & (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_{-A1}(x_1, \alpha_2) = g_{-A1}(x_1, \alpha_2), \quad \Omega_{-A}(-\infty \leq x_1 \leq -A), \quad k^2 = p^2 - \alpha_2^2 \\ & (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_{A1}(x_1, \alpha_2) = g_{A1}(x_1, \alpha_2), \quad \Omega_A(A \leq x_1 \leq \infty, ) \\ & g_{-A1}(x_1, \alpha_2) = q_{-A1}(x_1, \alpha_2) - t_{-A1}(x_1, \alpha_2), \quad g_{A1}(x_1, \alpha_2) = q_{A1}(x_1, \alpha_2) - t_{A1}(x_1, \alpha_2), \\ & \varphi(x_1) = \varphi(x_1, \alpha_2), \quad \varphi(x_1, \alpha_2) = \varphi(\pm A, \alpha_2), \quad x_1 \rightarrow \pm A, \\ & \varphi_{-A1}(x_1, \alpha_2) = \varphi(-A, \alpha_2), \quad x_1 \rightarrow -A, \quad \varphi_{A1}(x_1, \alpha_2) = \varphi(A, \alpha_2), \quad x_1 \rightarrow A, \end{aligned} \tag{2}$$

Параметр  $\alpha_2$  временно опускается до конца статьи.

$$\begin{aligned} & (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_{-A1}(x_1) = g_{-A1}(x_1), \quad \Omega_{-A}(-\infty \leq x_1 \leq -A), \quad k^2 = p^2 - \alpha_2^2 \\ & (\partial^2 x_1 + k^2) \varphi_{A1}(x_1) = g_{A1}(x_1), \quad \Omega_A(A \leq x_1 \leq \infty, ) \\ & g_{-A1}(x_1) = q_{-A1}(x_1) - t_{-A1}(x_1), \quad g_{A1}(x_1) = q_{A1}(x_1) - t_{A1}(x_1), \\ & \varphi(x_1) = \varphi(x_1), \quad g(x_1) = g(x_1), \quad \varphi(x_1) = \varphi(\pm A), \quad x_1 \rightarrow \pm A, \\ & \varphi_{-A1}(x_1) = \varphi(-A), \quad x_1 \rightarrow -A, \quad \varphi_{A1}(x_1) = \varphi(A), \quad x_1 \rightarrow A, \end{aligned} \tag{3}$$

### Применяемый метод исследования

Строятся упакованные блочные элементы, порождаемые граничной задачей (3) [Babeshko et al., 2021]:

$$\begin{aligned} \omega_{-A1}(\alpha_1) &= -i(\alpha_1 + k) \varphi_{-A1}(-C) e^{-i\alpha_1 C} + Q_{-A1}(-k) e^{-i(\alpha_1 + k)C} - \\ & - Q_{-A1}(\alpha_1) - T_{-A1}(-k) e^{-i(\alpha_1 + k)C} + T_{-A1}(\alpha_1) \\ \omega_{A1}(\alpha_1) &= i(\alpha_1 - k) \varphi_{A1}(A) e^{i\alpha_1 A} + Q_{A1}(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} - Q_{A1}(\alpha_1) - T_{A1}(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} + T_{A1}(\alpha_1) \end{aligned}$$

Здесь приняты обозначения заглавными буквами преобразований Фурье строчных:

$$\Phi(\alpha_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} dx_1$$

$$\varphi_r(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_r(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad \Phi_r(\alpha_1) = \frac{\omega_r(\alpha_1)}{N(\alpha_1)}, \quad r = A, -A, \quad (4)$$

$$N(\alpha_1) = (\alpha^2 - k^2)$$

### Контактная задача для основания и литосферных плит

Применяется контакт без трения.

Уравнения контактной задачи имеют вид [Ворович, Бабешко, 1979]:

$$\iint_{\Omega_{-A}} k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) q_{-A}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 +$$

$$+ \iint_{\Omega_A} k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) q_A(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = u_r(x_1, x_2), \quad x_1, x_2 \in \Omega_r, r = -A, A, \quad (5)$$

$$\langle \alpha, x \rangle = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2, \quad k(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{R^2} K(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha, x)} d\alpha_1 d\alpha_2$$

$$K(\alpha_1, \alpha_2) = O(v^{-1}), \quad u = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \rightarrow \infty.$$

Пример, функция  $K(\alpha_1, \alpha_2)$  имеет вид:

$$K(u) = x_2^2 (\sigma_1 \text{sh} \sigma_1 \text{ch} \sigma_2 - u^2 \sigma_2^{-1} \text{sh} \sigma_2 \text{ch} \sigma_1) \Delta^{-1}(u)$$

$$\Delta(u) = u^2 (2u^2 - \theta_2^2) + u^2 \sigma_1^{-1} \sigma_2^{-1} \text{sh} \sigma_1 \text{sh} \sigma_2 [2u^4 - (\theta_1^2 + 2\theta_2^2)u^2 + \theta_1^2 \theta_2^2 + 0,25\theta_2^4]$$

$$- \text{ch} \sigma_1 \text{ch} \sigma_2 (2u^4 - \theta_2^2 u^2 + 0,25\theta_2^4), \quad \sigma_1 = \sqrt{u^2 - \theta_1^2}, \quad \sigma_2 = \sqrt{u^2 - \theta_2^2}$$

$$\theta_1^2 = (\lambda + 2\mu)^{-1} \rho \omega^2 h^2, \quad \theta_2^2 = \mu^{-1} \rho \omega^2 h^2$$

Система уравнений упрощается до следующего вида:

$$u_r(x_1) = \int_{-\infty}^{-A} k(x_1 - \xi_1) q_{-A}(\xi_1) d\xi_1 + \int_A^{\infty} k(x_1 - \xi_1) q_A(\xi_1) d\xi_1,$$

$$k(x_1) = k(x_1, \alpha_2), \quad q_r(\xi_1) = q_r(\xi_1, \alpha_2), \quad (6)$$

$$k(x_1) = k(x_1, \alpha_2) \quad k(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1,$$

$$K(\alpha_1) = K(\alpha_1, \alpha_2), \quad u_r(x_1) = u_r(x_1, \alpha_2), \quad r = -A, A$$

Асимптотика нулей имеет вид [Ворович, Бабешко, 1979]:

$$\xi_{s_1} = iv(s+0.5)(1+o(1)), \quad s \rightarrow \infty, \quad z_m = ivm(1+o(1)), \quad m \rightarrow \infty, \quad v = \text{const} > 0.$$

Некоторое конечное число нулей и полюсов может быть вещественным. В этом случае представление ядра дается контурным интегралом вида:

$$k(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma} K(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1.$$

Контур  $\gamma$  совпадает с вещественной осью всюду, кроме зон вещественных полюсов, которые обходятся им по полуокружностям малого радиуса [Ворович, Бабешко, 1979].

Для решения задачи продолжим систему интегральных уравнений (6) на всю ось, добавив справа на отрезке  $[-A, A]$  новую неизвестную функцию  $w(x_1)$ , представляющую перемещение поверхности среды в промежутке между штампами.

О факторизационном методе Винера-Хопфа

Приравняв перемещения, имеем в двойственном пространстве:

$$u_r(x_1) = \varphi_r(x_1), \quad x_1 \in \Omega_r, \quad r = -A, A$$

$$K(\alpha_1)Q_{-A1}(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}[-Q_{-A1}(\alpha_1) + S_{-A1}],$$

$$[K(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}]Q_{-A1}(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_{-A1}]$$

$$K(\alpha_1)Q_{A1}(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}[-Q_{A1}(\alpha_1) + S_{A1}],$$

$$[K(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}]Q_{A1}(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}S_{A1}]$$

$$S_{-A1} = -i(\alpha_1 + k)\varphi_{-A1}(-A)e^{-i\alpha_1 A} + Q_{-A1}(-k)e^{-i(\alpha_1+k)A} - T_{-A1}(-k)e^{-i(\alpha_1+k)A} + T_{-A1}(\alpha_1)$$

$$S_{A1} = i(\alpha_1 - k)\varphi_{A1}(A)e^{i\alpha_1 A} + Q_{A1}(k)e^{i(\alpha_1-k)A} - T_{A1}(k)e^{i(\alpha_1-k)A} + T_{A1}(\alpha_1)$$

Это дает соотношение:

$$\begin{aligned} K_1(\alpha_1)Q_1^-(\alpha_1) + W_1(\alpha_1) + K_1(\alpha_1)Q_1^+(\alpha_1) = \\ = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}(S_1^- + S_1^+), \quad K_1(\alpha_1) = [K(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}] \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь  $W_1(\alpha_1)$  – преобразование Фурье свободной от напряжений зоны между штампами. Для сомкнувшихся торцов, имеем  $W_1(\alpha_1) = 0$ , что приводит к уравнению:

$$K_1(\alpha_1)Q_1^-(\alpha_1) + K_1(\alpha_1)Q_1^+(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}(S_1^- + S_1^+). \tag{8}$$

Введем обозначения:

$$Q_1^-(\alpha_1) \equiv Q_{-A1}(\alpha_1), \quad S_1^- \equiv S_{-A}(\alpha_1), \quad Q_1^+(\alpha_1) \equiv Q_{A1}(\alpha_1), \quad S_1^+(\alpha_1) \equiv S_A(\alpha_1).$$

Знак плюс означает регулярность аналитической функции комплексного переменного в верхней полуплоскости, а минус – в нижней.

Об интегральном уравнении на конечном отрезке

Разделив (7) на  $K(\alpha_1)$ , имеем:

$$Q_1^-(\alpha_1) + K_1^{-1}(\alpha_1)W_1(\alpha_1) + Q_1^+(\alpha_1) = K_1^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}(S_1^- + S_1^+). \tag{9}$$

Представив (9) в интегральном виде, получим:

$$\begin{aligned} \int_{-A}^A k_{11}(x_1 - \xi_1)w_{11}(\xi_1)d\xi_1 = f_{11}(x_1), \quad |x_1| \leq A, \quad w_{11}(\xi_1) = w_{11}(\xi_1, \alpha_2), \\ k_{11}(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_1^{-1}(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad K_1^{-1}(\alpha_1) = P_1^{-1}(\alpha_1)R_1(\alpha_1), \quad k_{11}(x_1) = k_{11}(x_1, \alpha_2) \end{aligned} \tag{10}$$

Имеем:

$$f_{11}(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_1^{-1}(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}(S_1^- + S_1^+)e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad |x_1| \leq A.$$

Функция  $K_1^{-1}(\alpha_1)$  имеет поведение:

$$K_1^{-1}(\alpha_1) = O(|\alpha_1|), \quad |\alpha_1| \rightarrow \infty.$$

Вынесем дифференциальный оператор и решим уравнение, имеем:

$$(-\partial^2 + \tau^2) \int_{-A}^A n_{11}(x_1 - \xi_1)w_{11}(\xi_1)d\xi_1 = f_{11}(x_1),$$

$$n_{11}(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha_1^2 + \tau^2)^{-1} K_1^{-1}(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad N_{11}(\alpha_1) = (\alpha_1^2 + \tau^2)^{-1} K_1^{-1}(\alpha_1)$$

$$\int_{-A}^A n_{11}(x_1 - \xi_1) w_{11}(\xi_1) d\xi_1 = f_{11}(x_1) + c_{11} e^{\tau x_1} + c_{12} e^{-\tau x_1} \quad (11)$$

$$f_{11}(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_1^{-1}(\alpha_1) (\alpha_1^2 + \tau^2)^{-1} (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} (S_1^- + S_1^+) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad |x_1| \leq A$$

Получим решение в виде:

$$w_{11}(x_1) = \frac{m_{11}(x_1) + c_{11} m_{12}(x_1) + c_{12} m_{13}(x_1)}{\pi Q_{\frac{1}{2}}(chA) \sqrt{2chA - 2chx_1}}. \quad (12)$$

Здесь  $m_{rs}(x_1)$  – некоторые непрерывные функции, появляющиеся в процессе. Решения интегрального уравнения являются известными.  $Q_{\frac{1}{2}}(chA)$  – функция Лежандра [Гохберг, Крейн, 1967].

Для непрерывности  $w_{11}(x_1)$  необходимо, чтобы она обращалась в нули в точках  $x_1 = \pm A$ . Это приводит к уравнениям:

$$c_{11} m_{12}(A) + c_{12} m_{13}(A) + m_{11}(A) = 0$$

$$c_{11} m_{12}(-A) + c_{12} m_{13}(-A) + m_{11}(-A) = 0$$

Из них имеем:

$$c_{11} = \Delta^{-1} [m_{11}(-A) m_{13}(A) - m_{11}(A) m_{13}(-A)]$$

$$c_{12} = \Delta^{-1} [m_{11}(A) m_{12}(-A) - m_{11}(-A) m_{12}(A)]$$

$$\Delta = m_{12}(A) m_{13}(-A) - m_{12}(-A) m_{13}(A)$$

Определив постоянные  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ , изучим дисперсионное уравнение Воровича И.И. [Ворович, 1979а; 1979б]. Возьмем соотношения:

$$Q_1^-(\alpha_1) + Q_1^+(\alpha_1) = K_1^{-1}(\alpha_1) (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} (S_1^- + S_1^+) - K_1^{-1}(\alpha_1) W_1(\alpha_1).$$

$$Q_{-A1}(\alpha_1) \equiv Q_1^+(\alpha_1) = \{K_1^{-1}(\alpha_1) (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} (S_1^- + S_1^+) - K_1^{-1}(\alpha_1) W_1(\alpha_1)\}^+$$

$$Q_{-A1}(\alpha_1) \equiv Q_1^-(\alpha_1) = \{K_1^{-1}(\alpha_1) (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} (S_1^- + S_1^+) - K_1^{-1}(\alpha_1) W_1(\alpha_1)\}^-$$

Осуществим разложение правых частей этих выражений, выделив функционалы  $Q_{A1}(k)$  и  $Q_{-A1}(-k)$ . В результате получим соотношения:

$$Q_{A1}(\alpha_1) = Q_{A1}(k) R_1^+(\alpha_1) + Q_{-A1}(-k) R_2^+(\alpha_1) + R_3^+(\alpha_1) \quad (13)$$

$$Q_{-A1}(\alpha_1) = Q_{A1}(k) R_1^-(\alpha_1) + Q_{-A1}(-k) R_2^-(\alpha_1) + R_3^-(\alpha_1)$$

Внеся в эти соотношения последовательно  $\alpha_1 = k$  в первое, затем  $\alpha_1 = -k$  во второе и, вычислив функционалы из полученной алгебраической системы уравнений, получим их значения в виде:

$$Q_{A1}(k) = \Delta_1^{-1} \langle R_3^+(k) [1 - R_2^-(k)] + R_3^-(k) R_2^+(k) \rangle$$

$$Q_{-A1}(-k) = \Delta_1^{-1} \langle R_3^+(k) R_1^-(k) - R_3^-(k) [1 - R_2^+(k)] \rangle$$

$$\Delta_1(k) = [1 - R_1^+(k)] [1 - R_2^-(k)] - R_2^+(k) R_1^-(k)$$

С учетом того, что,  $k$  зависит от  $\omega$ , получили предсказанное академиком И.И. Воровичем следующее соотношение:

$$[1 - R_1^+(k)] [1 - R_2^-(k)] - R_2^+(k) R_1^-(k) = 0. \quad (14)$$

**Пример.** Ввиду того, что изучение разработанным методом поиска предвестников землетрясений для реальной ситуации сложно, что будет делаться с привлечением аппаратных средств в будущем, в качестве примера рассмотрим модельную задачу, содержащую все элементы построений настоящей статьи.

Рассмотрим тот случай, когда в соотношениях (6) функция  $K(\alpha_1)$  является мероморфной, имеющей счетное число нулей  $z_m$  и полюсов  $\xi_r$ , зависящих от частоты колебаний и растущих с ее ростом, что свойственно динамическим контактными задачам. Среди этих нулей и полюсов конечное число должно быть вещественных [Ворович, Бабешко, 1979]. Для получения качественной картины, ограничимся рассмотрением того случая, когда мероморфная функция урезается путем оставления лишь конечного числа вещественных полюсов, что сохраняет возбуждение волн. Тем самым, сможем получить качественную картину, которая может служить и первым приближением к реальной.

Ради краткости, рассмотрим в (6) тот случай, когда:  $K(u) = (u^2 - A^2)^{-1}$ ,  $A > 0$   
 $K^{-1}(\eta) = K^{-1}(-\eta)$ ,  $F(\eta) = F(-\eta)$ ,  $f(x) = F(\eta)(e^{-i\eta x} + e^{i\eta x}) = 2F(\eta) \cos \eta x$ .

Тогда имеем:  $N_{11}(u) = (u^2 - A^2)(u^2 - B^2)^{-1}$ ,  $\tau = iB$ ,

$f(x) = F(\eta)(e^{-i\eta x} + e^{i\eta x}) = 2F_1(\eta)(\eta^2 - B^2)^{-1} \cos \eta x + c \cos Bx$ ,  $F_1(\eta) = F(\eta)(\eta^2 - B^2)^{-1}$ .

В этом случае преобразование Фурье ядра интегрального уравнения имеет вещественными по одному положительному нулю,  $u = A$ , и полюсу,  $u = B$ . В том случае, если у функции  $N_{11}(u)$  имеется счетное число нулей  $z_m$  и полюсов  $\xi_r$ , интегральное уравнение (6) одним из методов приводится к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений вида [Ворович, Бабешко, 1979]:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{1}{\xi_r - z_m} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\xi_r + z_m} e^{i z_m 2a} \right) X_m(\pm) = -D_1(\eta)F(\eta)e^{-i\eta a} - cD_2(\eta)e^{-iBa} \tag{15}$$

Здесь приняты обозначения правой части  $f(x) = F(\eta)e^{-i\eta x}$ .

$D_s(\eta)$  – некоторые рациональные функции.

Решение интегрального уравнения ищется в виде разложения:

$$q(x) = D_3(\eta)(x+a)e^{-i\eta x} + \sum_{m=1}^{\infty} (A_{m+} e^{i z_m (a+x)} + A_{m-} e^{i z_m (a-x)}), \quad (A_{m+} \pm A_{m-}) = X_m(\pm).$$

Переходя в системе (15) к урезанному интегральному уравнению, оно приводит к конечной одномерной алгебраической системе вида:

$$\left( \frac{e^{-iAa}}{B-A} + \frac{1}{B+A} e^{iAa} \right) X_1(+) = -D_1(\eta)F(\eta)e^{-i(\eta+A)a} - cD_2(\eta)e^{-i(B+A)a}$$

При определении постоянной  $c$  из этого уравнения, ясно, что дисперсионное уравнение является коэффициентом при неизвестном в левой части, в котором  $A = A(\omega)$ . Определяя нули функции

$$\frac{e^{-iAa}}{B-A} + \frac{e^{iAa}}{B+A} = 0$$

выясняем, что они строятся графически как пересечение тангенсоид с прямой второго и четвертого квадрантов из уравнения:

$$\operatorname{tg} \tau_p = -\frac{\tau_p}{aB}, \quad p=1,2,\dots$$

Асимптотическое представление нулей дается соотношением:

$$A_p = \frac{\tau_p}{a} = \left(p\pi + \frac{\pi}{2}\right) \frac{1}{a}.$$

Отсюда видно, что чем более узким будет ущелье, тем выше должна быть частота сейсмической волны, приводящей к резонансу.

### Выводы

Полученный в работе результат демонстрирует метод построения резонансного уравнения для разлома, описываемого трещиной нового типа в средах различных реологий, которые можно вводить описанным способом, опираясь на подход [Babeshko et al., 2021]. Полученный результат показал, что не только отдельная изолированная литосферная плита, но и сблизившиеся на любое расстояние литосферные плиты имеют, при колебании, изолированные резонансы, повышающие уровень сейсмичности. Полученный результат может давать определенные ориентиры для оценки сейсмичности на горных территориях, принимая в качестве трещин нового типа ущелья, а также дороги или долины, окруженные горами, поскольку применяемый метод справедлив для любых значений параметров ширины разлома.

### Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Фрактальные свойства блочных элементов и новый универсальный метод моделирования. // Доклады Академии наук. – 2021. – Т. 499. № 1. – С. 30–35. DOI: 10.31857/S2686740021040039.
2. Ворович И.И. Резонансные свойства упругой неоднородной полосы. // Доклады Академии наук СССР. – 1979а. – Т. 245. № 5. – С. 1076–1079.
3. Ворович И.И. Спектральные свойства краевой задачи теории упругости для неоднородной полосы. // Доклады Академии наук СССР. – 1979б. – Т. 245. № 4. – С. 817–820.
4. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, – 1979. 320 с.
5. Гохберг И.Ц., Крейн М.Г. Теория вольтерровых операторов в гильбертовом пространстве и ее приложения. М.: Наука, – 1967. 508 с.
6. Евдокимова О.В., Бабешко В.А., Павлова А.В., Евдокимов В.С., Бабешко О.М. Об одном новом предвестнике повышенной сейсмичности. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 47–58. DOI: 10.46698/VNC.2022. 80.98.004.
7. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.
8. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, – 1987. 104 с.
9. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической оценки территории. Ташкент: Фан, – 1989. 296 с.
10. Atkinson B. Earthquake prediction. // *Physics in Technology*. – 1981. – Vol. 12. No. 2. – pp. 60–68. DOI: 10.1088/0305-4624/12/2/i04.
11. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. A New Type of Cracks Adding to Griffith-Irwin Cracks. // *Doklady Physics*. – 2019. – Vol. 64. No. 3. – pp. 102–105. DOI: 10.1134/S10283358191030042.

12. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Earthquakes and Cracks of New Type Complementing the Griffith–Irwin’s Crack. // *Advanced Structured Materials*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, L.A. Igumnov. – 2021. – pp. 11–26. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2.
13. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic impacts in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2020. – Vol. 56. No. 5. – pp. 644–655. DOI: 10.1134/S1069351320050018.
14. Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review. // *Geophysical Journal International*. – 1997. – Vol. 131. Issue 3. – pp. 425–450. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x.
15. Kagan Y.Y. Are earthquake predictable? // *Geophysical Journal International*. – 1997. – Vol. 131. Issue 3. – pp. 505–525. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06595.x.
16. Keer R.A. Earthquake prediction: Mexican quake shows one way to look for the big ones. // *Science*. – 1979. – Vol. 203. Issue 4383. – pp. 860–862.
17. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2007. – Vol. 104. Issue 48. – pp. 18931–18936.
18. Main I.G., Meredith P.G. Classification of earthquake precursors from a fracture mechanics model. // *Tectonophysics*. – 1989. – Vol. 167. – pp. 273–283.
19. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions corresponding to slow slip events in subduction zones. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2015. – Vol. 16. – pp. 4006–4020.
20. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of westerly granite: Experimental observations and numerical Simulations. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2013. – Vol. 14. – pp. 567–582.
21. Mogi K. Earthquake and fracture. // *Tectonophysics*. – 1967. – Vol. 5. No. 1. – pp. 35–55.
22. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. // *Science*. – 1973. – Vol. 181. No. 4102. – pp. 803–810.
23. Toro G.Di., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. Fault lubrication during earthquake. // *Nature*. – 2011. – Vol. 471. Issue 7339. – pp. 494–498. DOI: 10.1038/nature09838.
24. Wyss M. Evaluation of proposed earthquake precursors. // *American Geophysical Union, Washington DC*. – 1991. – Vol. 302. – 94 p. DOI: 10.1029/SP032.
25. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes. The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. // *Science*. – 2004. – Vol. 303. – pp. 1859–1861.
26. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H., Rice J.R. Laboratory Earthquakes Along Inhomogeneous Faults. Directionality and Supershear. // *Science*. – 2005. – Vol. 308. – pp. 681–684.

## References

1. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Fractal Properties of Block Elements and a new Universal Modeling Method. *Doklady Physics*. 2021. Vol. 499. No. 1. pp. 30–35. DOI: 10.1134/S1028335821080012. (In Russ.)
2. Vorovich I.I. Resonant properties of an elastic inhomogeneous band. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1979. Vol. 245. No. 5. pp. 1076–1079. (In Russ.)
3. Vorovich I.I. Spectral properties of the boundary value problem of elasticity theory for an inhomogeneous band. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1979. Vol. 245. No. 4. pp. 817–820. (In Russ.)
4. Vorovich I.I., Babeshko V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical domains. Moscow. Nauka. 1979. 320 p. (In Russ.)
5. Gokhberg I.Ts., Krein M.G. Theory of Voltaire operators in Hilbert space and its applications. Moscow. Nauka. 1967. 508 p. (In Russ.)

6. Evdokimova O.V., Babeshko V.A., Pavlova A.V., Evdokimov V.S., Babeshko O.M. About one new precursor of increased seismicity. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 47–58. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.98.004. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of the ground layer according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 9.46698/VNC.2021.77.59.006. (In Russ.)
8. Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. Deformation of the geophysical environment and the seismic process. Moscow. Nauka. 1987. 104 p. (In Russ.)
9. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic assessment of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 296 p. (In Russ.)
10. Atkinson B. Earthquake prediction. *Physics in Technology*. 1981. Vol. 12. No. 2. pp. 60–68. DOI: 10.1088/0305-4624/12/2/i04.
11. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. A New Type of Cracks Adding to Griffith-Irwin Cracks. *Doklady Physics*. 2019. Vol. 64. No. 3. pp. 102–105. DOI: 10.1134/S10283358191030042.
12. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Earthquakes and Cracks of New Type Complementing the Griffith–Irwin’s Crack. *Advanced Structured Materials*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, L.A. Igumnov. 2021. pp. 11–26. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2.
13. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic impacts in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. Vol. 56. No. 5. pp. 644–655. DOI: 10.1134/S1069351320050018.
14. Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 131. Issue 3. pp. 425–450. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x.
15. Kagan Y.Y. Are earthquake predictable? *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 131. Issue 3. pp. 505–525. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06595.x.
16. Keer R.A. Earthquake prediction: Mexican quake shows one way to look for the big ones. *Science*. 1979. Vol. 203. Issue 4383. pp. 860–862.
17. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007. Vol. 104. Issue 48. pp. 18931–18936.
18. Main I.G., Meredith P.G. Classification of earthquake precursors from a fracture mechanics model. *Tectonophysics*. 1989. Vol. 167. pp. 273–283.
19. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions corresponding to slow slip events in subduction zones. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015. Vol. 16. pp. 4006–4020.
20. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of westerly granite: Experimental observations and numerical Simulations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. Vol. 14. pp. 567–582.
21. Mogi K. Earthquake and fracture. *Tectonophysics*. 1967. Vol. 5. No. 1. pp. 35–55.
22. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*. 1973. Vol. 181. No. 4102. pp. 803–810.
23. Toro G.Di., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. Fault lubrication during earthquake. *Nature*. 2011. Vol. 471. Issue 7339. pp. 494–498. DOI: 10.1038/nature09838.
24. Wyss M. Evaluation of proposed earthquake precursors. American Geophysical Union, Washington DC. 1991. Vol. 302. 94 p. DOI: 10.1029/SP032.
25. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes. The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. *Science*. 2004. Vol. 303. pp. 1859–1861.
26. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H., Rice J.R. Laboratory Earthquakes Along Inhomogeneous Faults. Directionality and Supershear. *Science*. 2005. Vol. 308. pp. 681–684.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

Оригинальная статья

## Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных

В.Б. Заалишвили , Д.А. Мельков , М.И. Фидарова , Г.В. Шманатов 

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

Статья поступила: 24.05.2024, доработана: 10.06.2024, принята к публикации: 10.06.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Факторами, определяющими интегральный геоэкологический риск территорий, являются его основные составляющие: природные – геолого-тектонические, искусственно-техногенные, экологические, социально-экономические и административные, состояние которых определяет потенциал ущерба и его проявленную величину. Сейсмическая интенсивность является наиболее точной характеристикой сейсмических воздействий, поскольку она напрямую связана с повреждаемостью объектов. При этом на практике осуществляется округление данных полученных различными способами до десятичных знаков, без оценки точности и статистической (вероятностной) обеспеченности получаемых результатов. Это предполагает необходимость разработки методологии использования при оценках сейсмической опасности дробных значений интенсивности в баллах. **Методы.** Современные цифровые геоинформационные технологии позволяют производить системную оценку состояния каждого фактора риска на основе алгоритмов машинного обучения. В работе использован метод опорных векторов (support vector regression) и процедура кросс-валидации. В рамках разрабатываемой геоинформационно-вычислительной системы выполнена системная интеграция блоков регионального моделирования сейсмических воздействий на основе зон ВОЗ и реакции отдельных участков на данные воздействия. При этом моделировались ансамбли акселерограмм с варьированием характеристик разломов, и выполнялась статистическая обработка результатов с представлением пространственных данных в ГИС-технологиях, формирующих геоэкологический риск территории. **Результаты.** Разработана оригинальная методика оценки состояния грунтовой толщи по критерию дисперсии и на ее основе введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, подтверждающиеся инструментальными данными (наличие просадочных грунтов) и обуславливающие различный геоэкологический риск.

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

**Для цитирования:** Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 45-60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

Original paper

## Geoecological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data

V.B. Zaalishvili , D.A. Melkov , M.I. Fidarova , G.V. Shmanatov 

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

Received: 24.05.2024, revised: 10.06.2024, accepted: 10.06.2024

**Abstract: Relevance.** The factors that determine the integral geo-ecological risk of territories are its main components: natural-geological-tectonic, artificial-technogenic, environmental, socio-economic and administrative. Their state of which determines the potential for damage and its manifested rate. Seismic intensity is the most accurate characteristic of seismic impacts, since it is directly related to the damageability of objects. At the same time, in practice, data obtained in various ways is rounded to decimal places, without assessing the accuracy and statistical (probabilistic) reliability of the results obtained. This suggests the need to develop a methodology for using fractional intensity values in points when assessing seismic hazard. **Methods.** Modern digital geographic information technologies allow for a system assessment of the state of each risk factor based on machine learning algorithms. The work used the support vector regression method and the cross-validation procedure. Within the framework of the developed geographic information and computing system, system integration of blocks of regional modeling of seismic effects based on possible seismic sources zones and the response of individual areas to these impacts was carried out. At the same time, ensembles of accelerograms with varying fault characteristics were modeled, and statistical processing of the results was performed with the presentation of spatial data in GIS technologies that form the geoecological risk of the territory. **Results.** An original method for assessing the state of the soil stratum using the dispersion criterion has been developed and, on its basis, amendments have been introduced to the distribution of zones by seismic properties, confirmed by instrumental data (presence of subsidence soils) and causing various geo-ecological risks.

**Keywords:** macroseismic intensity, instrumental records, strong motion database, seismic scale, machine learning.

**For citation:** Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geoecological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 45-60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

### Введение

В горных районах, большей частью характеризующихся высокой сейсмической опасностью, находится значительное количество промышленных и гражданских зданий, гидротехнических сооружений и объектов транспортной инфраструктуры, создающих различные виды антропогенного воздействия на геологическую среду. Интенсификация урбанизации, образование крупных городов и городских агломераций, промышленного производства, а также рост населения связаны с интенсивным использованием ограниченных земельных, водных и минеральных ресурсов. Концепция анализа факторов сейсмического риска использует возможности гео-

информационных систем, комбинируя информационные слои с данными о пространственном распределении сейсмической опасности, о техногенной нагрузке и уязвимости застройки, а также о величинах, подверженных риску повреждения и позволяющие оценивать возможные потери [Yodgorov, 2018]. Для урбанизированных горных территорий проблема оценки и снижения сейсмического риска с целью разработки мер по управлению и снижению ущерба является актуальной.

Сейсмическая интенсивность является наиболее точной характеристикой сейсмических воздействий, поскольку она напрямую связана с повреждаемостью строительных объектов. В то же время, повреждаемость объектов определяется параметрами сейсмических воздействий. Таким образом, оценки сейсмической интенсивности тесно связаны с параметрами сейсмического движения грунта. Заметим, что действующая шкала ГОСТ Р 57546-2017 однозначно связывает баллы шкалы сейсмической интенсивности со степенями повреждений различных типов зданий и является первой регламентированной шкалой интервалов. При этом на практике осуществляется округление данных полученных различными способами до десятичных знаков, без оценки точности и статистической (вероятностной) обеспеченности получаемых результатов. В этой связи оценка интенсивности в целочисленных величинах, несомненно, характеризуется высокой погрешностью. Это предполагает необходимость разработки методологии использования при оценках сейсмической опасности дробных значений интенсивности в баллах.

Факторами, определяющими интегральный геоэкологический риск территорий, являются его основные составляющие: природные – геолого-тектонические, искусственно-техногенные, экологические, социально-экономические и административные, состояние которых определяет потенциал ущерба и его проявленную величину [Yodgorov, 2018; Чотчаев и др., 2021]. Каждый из этих факторов характеризуется особенностями текущего состояния и уровнем реализации. Современные цифровые геоинформационные технологии позволяют производить системную оценку состояния каждого фактора риска на основе алгоритмов машинного обучения. Основой такой оценки является, несомненно, адекватный выбор величин, определяющих сейсмическую опасность и зависящих от решаемой геоэкологической задачи. Так, для оценки геоэкологического риска целесообразно использовать макросейсмическую интенсивность в баллах, важно получить обоснованные формулы пересчета непрерывных физических величин, выражаемых через параметры инструментальных данных в интенсивность макросейсмической шкалы, которая в данном случае обоснованно будет являться непрерывной (однородной). Геоэкологические задачи могут отличаться от инженерных задач, и интегральная мера воздействия, выраженная в величине интенсивности, является более общей и более обоснованной для применения. В частности, установление сейсмической опасности в единицах пиковых ускорений не отражает, в целом, все особенности процесса, но является определенной величиной, для которой по инструментальным данным строятся региональные модели, а интенсивность, выраженная в баллах, отличается меньшей «разрешающей способностью» исходных данных, выраженной в целочисленных баллах. В этой связи разработка инструментально обоснованного подхода будет сочетать преимущества обеих мер сейсмических воздействий.

## Методы

Использование сейсмических приборов позволяет по параметрам записи получить точечную оценку сейсмической интенсивности, и здесь возникает вопрос – насколько единичная оценка соответствует макросейсмической интенсивности данной зоны в целом. Для оценки любой величины требуется указать ее погрешность. При этом в зависимости от решаемой геоэкологической задачи может рассматриваться как среднее значение оценки, так и интервальные значения или определенные значения с заданной вероятностью неперевышения. Таким образом, требуется оценить тип и параметры распределения анализируемых случайных величин.

Каждая точечная оценка может рассматриваться для определенного радиуса, в зависимости от плотности таких оценок. Или могут использоваться диаграммы Вороного, определяющие наибольшую близость к данной точке [Okabe et al., 2000; Laurenzano et al., 2023]. При этом также необходимо учитывать, что границы между зонами различной интенсивности приурочены к границам инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Поэтому неотъемлемой частью разрабатываемой геоинформационной системы должен являться слой инженерно-геологического районирования территории [Zhu et al., 2001; Ordaz-Hernández et al., 2012; Vilorio et al., 2016; Failache, Zuquette, 2018; Razmyar, Eslami, 2018; Li et al., 2023]. При этом, учитывая возможность применения дробных значений сейсмической интенсивности, каждый ИГЭ может быть дифференцирован по сейсмическому признаку без более общей классификации по категориям.

Возникающая при этом задача соответствия цифровой модели реальным свойствам объектов решается на основе математического моделирования и сопоставлении с инструментальными данными непосредственно на данных участках. Источником таких данных могут являться сейсмические станции.

Соединение двух данных характеристик сейсмического фактора – макросейсмической интенсивности по повреждениям зданий по проявлению непосредственно и инструментальной меры сейсмической интенсивности представляет основную задачу данной работы. Определение соотношения между ними позволит производить оценки рисков и более точно производить оценку приращения сейсмической интенсивности, поскольку одним из наиболее обоснованных методов является инструментальный метод СМР, например, формулы способа слабых землетрясений, мощных источников, способа сейсмических жесткостей, основанные на определении приращений интенсивности непосредственно по записям колебаний и инженерно-геологическим данным (скоростям сейсмических волн и плотностям). При этом предполагается, что увеличение амплитуды колебаний в два раза соответствует приращению интенсивности на один балл. Данное положение в последнее время подвергается серьезной критике [Аптикаев, 2021].

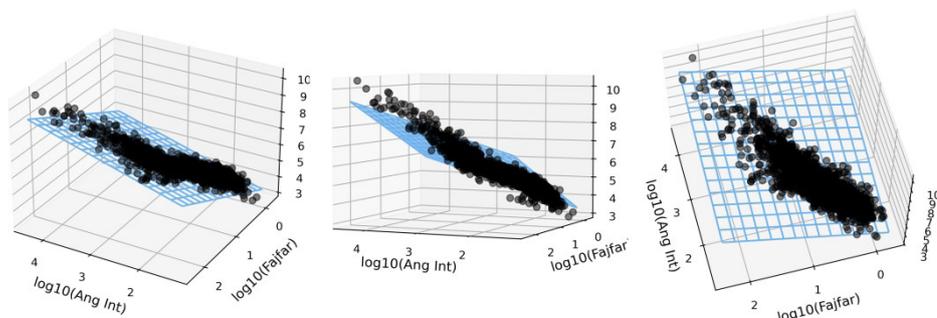
Очевидно, что не существует однозначного соответствия ускорений баллам сейсмической интенсивности. Поскольку, как это неоднократно отмечалось, на результирующую интенсивность влияют спектральный состав и продолжительность колебаний.

Для учета многофакторности процесса рассмотрены основные параметры сейсмических записей и различные инструментальные меры сейсмической интенсивности [Ang, 1990; Finn Liam et al., 1994; Fajfar, 1995; Shabestari, 2019; Masi et al., 2020], по сути, являющиеся их комбинациями [Фидарова и др., 2023]. Регрессионные модели строились методом опорных векторов на основе базы данных K-NET

(Япония) [National Research..., 2019; Заалишвили и др., 2013]. Расчеты выполнялись с использованием библиотеки sklearn. Было отобрано более 1000 записей, соответствующих интенсивности превышающей 6 баллов. Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки) [Hastie et al., 2009].

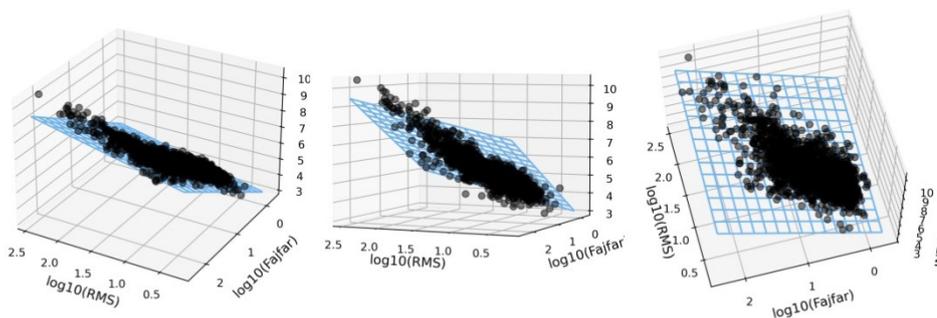
В модели с двумя параметрами лучший результат получен для комбинации меры Фаджфара и меры Анга, а также меры Фаджфара и среднеквадратического ускорения. Поскольку в меру Фаджфара входит пиковая скорость и продолжительность, по сути, это уточнение трехпараметрической модели, сочетающей в себе элементы меры Фаджфара и Анга (рис. 1). На рисунках приведены регрессионные выражения и соответствующие метрики: коэффициент детерминации  $R^2$  и средние абсолютные отклонения MAE.

$$I = 0.82 \cdot \log_{10}(\text{Ang Int}) + 1.34 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 2.60, R^2 = 0.89, MAE = 0.23$$



а)

$$I = 0.90 \cdot \log_{10}(\text{RMS}) + 1.72 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 3.20, R^2 = 0.89, MAE = 0.23$$

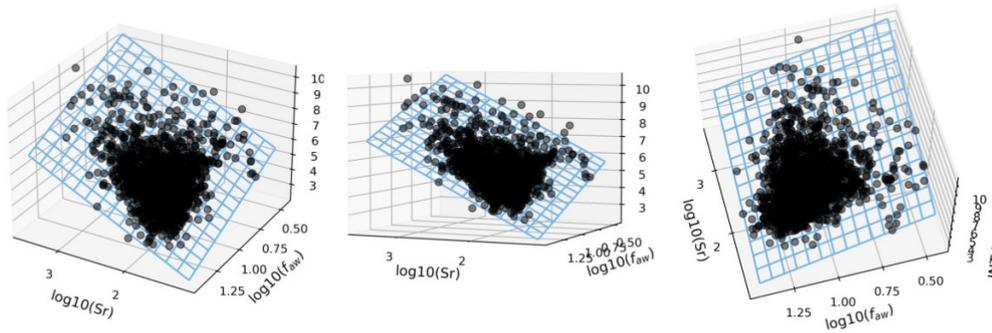


б)

Рис. 1. Регрессионные модели, основанные на мере Фаджфара-Анга /  
 Fig. 1. Regression models based on Fajfar-Ang measure

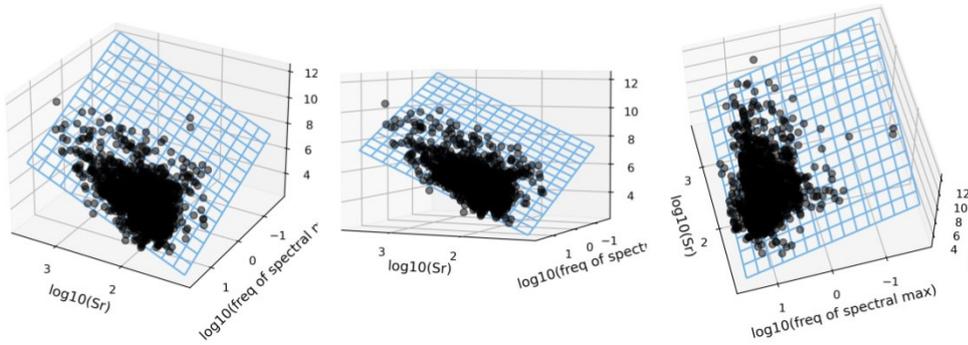
Для двух основных параметров лучший результат получен для площади спектра и средневзвешенной частоты ( $R^2 = 0.88$ , MAE = 0.23) – рис. 2а. Для сравнения комбинация площади реального спектра с частотой спектрального максимума дает хуже результат – рис. 2б.

$$I = 2.11 \cdot \log_{10}(Sr) - 3.54 \cdot \log_{10}(f_{aw}) + 4.68, \quad R^2 = 0.88, \quad MAE = 0.23$$



a)

$$I = 2.17 \cdot \log_{10}(Sr) - 1.58 \cdot \log_{10}(\text{freq of spectral max}) + 2.19, \quad R^2 = 0.77, \quad MAE = 0.31$$



б)

Рис. 2. Регрессионные модели, основанные на площади спектра /  
Fig. 2. Regression models based on spectral area

Для сопоставления с соотношениями, приведенными в ШСИ-2017, рассмотрена также комбинация пикового горизонтального ускорения и пиковой скорости. Она также дает высокий коэффициент детерминации  $R^2 = 0.85$  при  $MAE = 0.27$  – рис. 3.

$$I = 0.59 \cdot \log_{10}(PHA) + 2.11 \cdot \log_{10}(PHV) + 3.41, \quad R^2 = 0.85, \quad MAE = 0.27$$

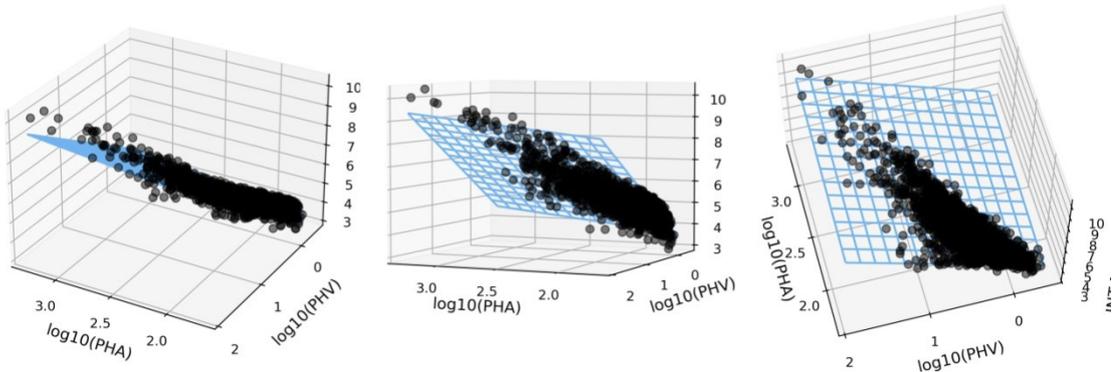


Рис. 3. Регрессионные модели, основанные на пиковой горизонтальной скорости (PHV) и пиковом горизонтальном ускорении (PHA) /

Fig. 3. Regression models based on peak horizontal velocity (PHV) and peak horizontal acceleration (PHA)

Для решения задачи исследования слоистости среды и параметров распределения на основе базы данных сейсморазведочных работ, проводимых ГФИ ВНИЦ РАН на территории г. Владикавказа, были построены сейсмические модели грунтовой толщи различных участков. В качестве входных данных использована симуляция сценарных землетрясений от различных зон ВОЗ территории на основе конечно-разломной модели (программа FINSIM). Моделирование акселерограмм каждого участка осуществлялось методом многократно отраженных волн.

Таким образом, в рамках разрабатываемой геоинформационно-вычислительной системы выполнена системная интеграция блоков регионального моделирования сейсмических воздействий на основе зон ВОЗ и реакции отдельных участков на данные воздействия. При этом моделировались ансамбли акселерограмм с варьированием характеристик разломов, и выполнялась статистическая обработка результатов с представлением пространственных данных в ГИС-технологиях.

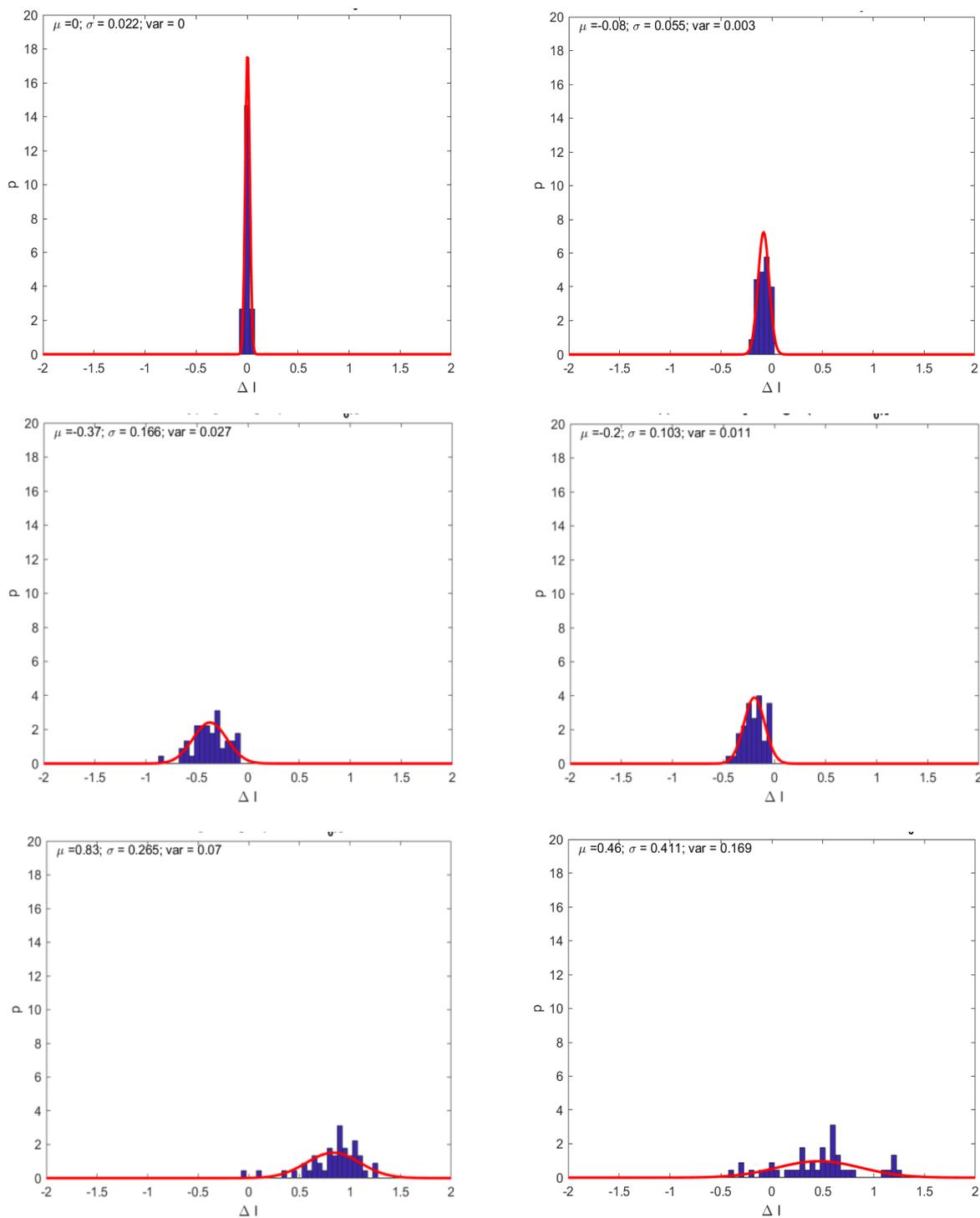
В результате по критерию дисперсии введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, которые подтверждаются инструментальными данными (наличие просадочных грунтов). Рассчитаны поправки к значениям сейсмической интенсивности в форме доверительных интервалов.

Моделирование выполнялось на основе программы FINSIM [Beresnev, Atkinson, 1998] алгоритмов, разработанных в ГФИ ВНИЦ РАН, работа с пространственными данными осуществлялась в программах ARCGIS 9 и QGIS, обработка данных в программах MATLAB, JupyterNotebook (библиотек Pythonscipy, numpy, sklearn). Используются данные базы данных «Владикавказ».

## Результаты и обсуждение

Предложенные модели инструментальной меры сейсмической интенсивности должны обладать следующим важным свойством – быть применимы для расчета приращений сейсмической интенсивности. Полученные закономерности для сейсмической интенсивности, а также формулы, включенные в ШСИ-2017 [Аптикаев, Эртелева, 2016] и выражения, полученные для мощных источников (основанные на площади спектра, средневзвешенной частоте в сочетании с амплитудными параметрами) [Заалишвили, 1997] применены для тестового полигона – территории г. Владикавказа. При этом рассматривались как введенные ранее выражения, так и полученные в рамках данной работы новые регрессионные модели. Важно отметить, что в частности в формулах 6 и 9 в таблице 1 перед площадью спектра получен примерно одинаковый коэффициент равный двум, но в уточненной формуле 9 вводится поправка на средневзвешенную частоту.

Пример распределения приращений для наиболее характерных участков территории приведен на рис. 4 и в таблице 1. В целом, наблюдается закономерность увеличения разброса значений с ухудшением категории, но поскольку данный параметр связан также со слоистостью среды, в пределах одного и того же комплекса ИГЭ данный параметр будет различаться.



*Рис. 4. Гистограммы распределения приращений сейсмической интенсивности для различных участков территории /*

*Fig. 4. Histograms of distribution of seismic intensity increments for different areas of the territory*

Таблица 1 / Table 1

**Расчет приращений сейсмической интенсивности  $\Delta I$  (средние значения) и соответствующие среднеквадратические отклонения  $\sigma$  / Calculation of increments of seismic intensity  $\Delta I$  (average values) and corresponding standard deviations  $\sigma$**

№ пп	Формула / Formula	Весна / Vesna		Дом печати / Dom pečati		Металлург / Metallurg		Тургеневская / Turgenevskaya		Дзусова / Dzusova		Кадырова Московское / Kadyrova Moskovskoe	
		$\Delta I$	$\sigma$	$\Delta I$	$\sigma$	$\Delta I$	$\sigma$	$\Delta I$	$\sigma$	$\Delta I$	$\sigma$	$\Delta I$	$\sigma$
1	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0)$	0,47	0,29	-0,45	0,12	-0,91	0,19	0,06	0,06	-0,19	0,08	-0,50	0,54
2	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,83	0,26	-0,20	0,10	-0,37	0,17	0,00	0,02	-0,08	0,06	0,46	0,41
3	$\Delta I = 1.325 \cdot \lg(\text{PHV} \cdot \text{PHA} / (\text{PHV}_0 \cdot \text{PHA}_0))$	0,52	0,19	-0,26	0,06	-0,52	0,11	0,02	0,03	-0,11	0,04	-0,01	0,37
4	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(\text{PHA} / \text{PHA}_0) + 1.25 \cdot \log_{10}(\tau/\tau_0)$	0,38	0,21	-0,36	0,13	-0,72	0,15	0,04	0,08	-0,14	0,11	-0,20	0,30
5	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((\text{PHA} \cdot f_{aw}) / (\text{PHA}_0 \cdot f_{aw0}))$	0,11	0,25	-0,39	0,11	-1,06	0,17	0,14	0,06	-0,20	0,08	-0,92	0,41
6	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg(\text{Sr}/\text{Sr}_0)$	0,21	0,06	-0,24	0,01	-0,57	0,03	0,06	0,01	-0,12	0,01	-0,47	0,13
7	$\Delta I = 0.82 \cdot \lg(\text{Ang}/\text{Ang}_0) + 1.34 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,65	0,33	-0,23	0,31	-0,51	0,53	-0,04	0,24	-0,28	0,44	0,13	0,47
8	$\Delta I = 0.90 \cdot \lg(\text{RMS}/\text{RMS}_0) + 1.72 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,66	0,27	-0,21	0,23	-0,46	0,39	-0,03	0,18	-0,23	0,32	0,19	0,41
9	$\Delta I = 2.11 \cdot \lg(\text{Sr}/\text{Sr}_0) - 3.54 \cdot \lg(f_{aw}/f_{aw0})$	0,60	0,10	-0,28	0,03	-0,33	0,06	-0,04	0,01	-0,09	0,01	0,06	0,26
10	$\Delta I = 0.59 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 2.11 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,62	0,20	-0,21	0,07	-0,40	0,12	0,01	0,02	-0,09	0,04	0,21	0,35

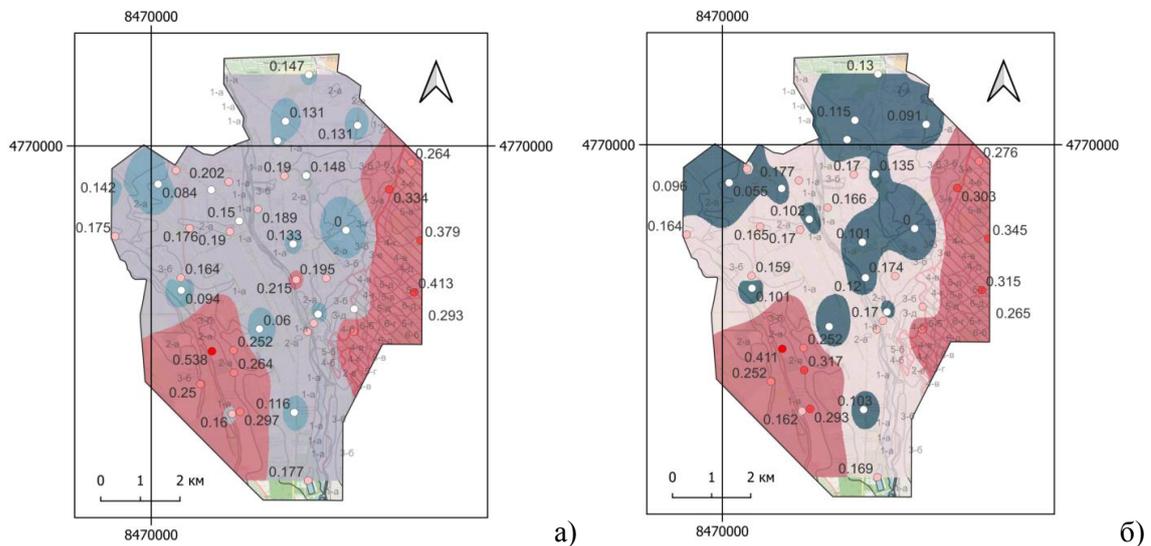
В связи с необходимостью оценки максимальных воздействий с определенной вероятностью непревышения, нами в методологию СМР в расчеты введен новый параметр «дисперсия разброса значений около среднего». Распределение среднеквадратических отклонений приращений сейсмической интенсивности по пиковым горизонтальным ускорениям и скоростям приведено на рис. 5. Как видно из таблицы 2, учет дисперсии в форме верхней границы доверительного интервала незначительно увеличивает приращение сейсмической интенсивности (порядка одной десятой балла), однако является важным критерием при районировании, позволяющим выделять наиболее опасные зоны (рис. 5) и в определенном сочетании с другими параметрами.

Таблица 2 / Table 2

**Приращения сейсмической интенсивности для вероятностей непревышения 95% и 99% / Increments of seismic intensity for probabilities of non-exceedance of 95% and 99%**

№ пп	Формула / Formula	Весна / Vesna		Дом печати / Dom pečati		Металлург / Metallurg		Тургеневская / Turgenevskaya		Дзусова / Dzusova		Кадырова Московское / Kadyrova Moskovskoe	
		95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%
1	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0)$	0,54	0,58	-0,42	-0,41	-0,87	-0,85	0,07	0,08	-0,17	-0,16	-0,36	-0,30
2	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,90	0,93	-0,17	-0,16	-0,33	-0,31	0,01	0,01	-0,07	-0,06	0,57	0,61

3	$\Delta I = 1.325 \cdot \lg(\text{PHV} \cdot \text{PHA} / (\text{PHV}_0 \cdot \text{PHA}_0))$	0,57	0,59	-0,25	-0,24	-0,49	-0,48	0,03	0,03	-0,10	-0,09	0,08	0,12
4	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(\text{PHA} / \text{PHA}_0) + 1.25 \cdot \lg_{10}(\tau / \tau_0)$	0,43	0,46	-0,33	-0,31	-0,68	-0,66	0,06	0,07	-0,11	-0,10	-0,13	-0,09
5	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((\text{PHA} \cdot f_{\text{aw}}) / (\text{PHA}_0 \cdot f_{\text{aw}0}))$	0,17	0,20	-0,37	-0,35	-1,02	-1,00	0,15	0,16	-0,18	-0,17	-0,82	-0,78
6	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg(\text{Sr} / \text{Sr}_0)$	0,23	0,23	-0,24	-0,23	-0,56	-0,56	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,44	-0,42
7	$\Delta I = 0.82 \cdot \lg(\text{Ang} / \text{Ang}_0) + 1.34 \cdot \lg(\text{Fajfar} / \text{Fajfar}_0)$	0,74	0,77	-0,15	-0,12	-0,38	-0,32	0,02	0,05	-0,17	-0,13	0,25	0,30
8	$\Delta I = 0.90 \cdot \lg(\text{RMS} / \text{RMS}_0) + 1.72 \cdot \lg(\text{Fajfar} / \text{Fajfar}_0)$	0,73	0,76	-0,16	-0,13	-0,36	-0,32	0,02	0,04	-0,15	-0,11	0,29	0,34
9	$\Delta I = 2.11 \cdot \lg(\text{Sr} / \text{Sr}_0) - 3.54 \cdot \lg(f_{\text{aw}} / f_{\text{aw}0})$	0,62	0,63	-0,27	-0,27	-0,32	-0,31	-0,04	-0,04	-0,09	-0,08	0,13	0,16
10	$\Delta I = 0.59 \cdot \lg(\text{PHA} / \text{PHA}_0) + 2.11 \cdot \lg(\text{PHV} / \text{PHV}_0)$	0,67	0,69	-0,19	-0,18	-0,37	-0,36	0,02	0,02	-0,08	-0,07	0,29	0,33



*Рис. 5. Среднеквадратические отклонения приращений сейсмической интенсивности по пиковым горизонтальным ускорениям (а) и скоростям (б) /*

*Fig. 5. Standard deviations of seismic intensity increments based on peak horizontal accelerations (a) and velocities (b)*

В результате выполнено районирование территории г. Владикавказа по комплексу критериев в рамках предложенных формул с учетом доверительных интервалов для вероятностей 5% и 1% непревышения указанных значений (таблица 2) и районирование в пределах каждой категории грунтов, исходя из уточненных данных сейсморазведки. Значительные изменения не отмечаются, учитывая округление результатов до десятых, однако в случае значений около 0,5 по максимальным ускорениям (участок «Весна») изменения могут меняться от 0,47 до 0,54 и обусловить округление приращения на один балл.

Для разбиения территории на подзоны использовалась диаграмма Вороного – деление на области, содержащие равноудаленные точки от данного участка, для которого выполнены работы по данным сейсморазведки. Процесс деления на зоны представлен на рис. 6: деление схемы инженерно-геологического районирования на

подобласти диаграммой Вороного (а) и дифференциация внутри каждой категории комплекса инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (б). Если точка не попадает в категорию комплекса ИГЭ, то соответствующая зона на схеме не представлена, и в качестве подложки показана интерполяция данных между точками.

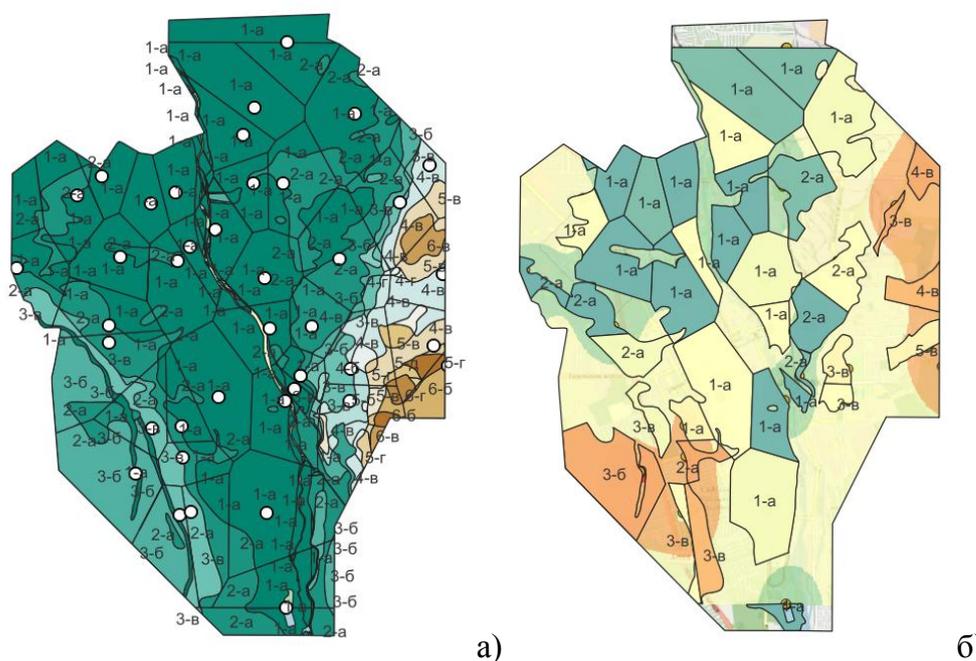
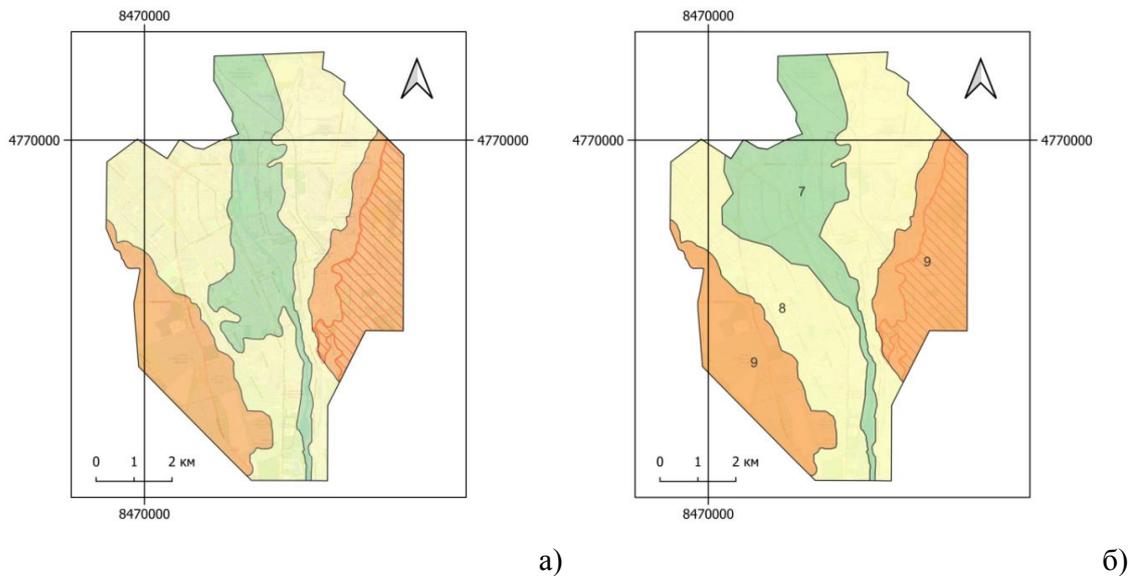


Рис. 6. Деление схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного (а) и дифференциация внутри каждой категории комплекса ИГЭ (б) /

Fig. 6. Division of the engineering-geological zoning scheme into subregions using the Voronoi diagram (a) and differentiation within each category of the complex of engineering-geological elements (b)

По результатам выполненной оценки построена уточненная карта-схема СМР территории г. Владикавказа – рис. 7. Таким образом, на основе детальных исследований по критерию дисперсии разработана методика оценки состояния грунтовой толщи и на ее основе введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, подтверждающиеся инструментальными данными (наличие просадочных грунтов) и непосредственно обуславливающие распределение геоэкологической опасности, в свою очередь, формирующих различный геоэкологический риск.

Результаты проведенных геофизических исследований позволили ввести коррективы в границы распространения отдельных инженерно-геологических участков. Конкретно, на юго-западной части левобережья города по отдельным скважинам (скв. 438, 442, 474) в разрезе были зафиксированы непросадочные грунты (в интервале глубин 0,0–3,5 м), а ниже залегают просадочные суглинки (в интервале 3,5–7,0 м). По результатам геофизических исследований методом КМПВ (Участки «Гадиева 1» и «Гадиева 2») и микросейсм (спектральных  $H/V$  отношений) показатели по участкам 3б и 3в аналогичны (соизмеримы  $V_s$ , резонансные частоты при условии одинаковой мощности), что позволило отнести эти два участка, по наимудшим грунтовым условиям, к 9-балльной зоне сейсмичности. Таким же образом, на правом берегу р. Терек участки 3б, распространенные полосой западнее зоны залегания просадочных грунтов, были отнесены к 9-балльной зоне.



*Рис. 7. Исходная (а) и уточненная (б) карты СМР территории г.Владикавказа /  
Fig. 7. Initial (a) and updated (b) maps of seismic microzonation of the territory of Vladikavkaz*

## Выводы

1. В практику геоэкологических оценок состояния среды включены сейсмические методы инструментальных оценок состояния грунтовых условий. Массовое исследование и анализ, в частности, групповых записей микросейсмических колебаний или микросейсм позволяет выполнять геоэкологическое районирование территории по признакам параметров сейсмических колебаний, являющееся основой обнаружения и прогноза катастрофических природно-техногенных процессов. Способ регистрации слабых землетрясений не позволяет набрать статистически надежный набор данных в сжатые кратчайшие сроки. В работах Заалишвили и др., разработан способ дифференциации участков по признаку преобладающей частоты колебаний грунтовой толщи на исследуемой территории. Однако такое районирование предполагает привязку полученных частот к конкретным инженерно-геологическим условиям, для которых имеются данные полевых изысканий.

2. В российском действующем своде правил (СП), как и в зарубежных нормах (Eurocode 8 и др.), принята классификация грунтовых условий по средневзвешенной по мощности грунтовой толщи скорости поперечных волн в верхнем 30-метровом слое ( $V_{s30}$ ). Однако при этом не учитывается влияние слоистости среды и, в особенности, контрастности слоев, приводящих к увеличению определенных частот колебаний. В силу различной ориентации плоскости разлома, первого подысточника и различного расстояния до моделируемых эпицентров зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), приходящие сейсмические волны имеют различный спектральный состав и обуславливают значительную вариацию параметров колебаний и результирующей сейсмической интенсивности на поверхности грунтовой толщи. Параметром, описывающим данный эффект, является дисперсия, непосредственно характеризующая ширину распределения исследуемой величины или в случае конечной выборки величина среднеквадратического отклонения. Таким

образом, дисперсия (квадрат среднеквадратического отклонения) также является характеристикой геоэкологического состояния территории по инструментальным данным.

3. Для решения задачи исследования слоистости среды и установления параметров пространственного распределения на основе базы данных сейсморазведочных работ, проводимых ГФИ ВНИЦ РАН на территории г. Владикавказа, были построены сейсмические модели грунтовой толщи различных участков. В качестве входных данных использована симуляция сценарных землетрясений от различных зон ВОЗ территории на основе конечно-разломной модели (программа FINSIM). Моделирование акселерограмм каждого участка осуществлялось методом многократно отраженных волн (МОВ).

4. Наблюдается закономерность увеличения разброса значений с ухудшением геоэкологического состояния или сейсмической категории грунта, но поскольку данный параметр связан также со слоистостью среды, в пределах одного и того же комплекса ИГЭ данный параметр будет различаться.

5. В связи с необходимостью оценки максимальных воздействий с определенной вероятностью превышения, в методологию СМР введен новый параметр «дисперсия разброса значений около среднего».

6. В рамках разрабатываемой геоинформационно-вычислительной системы выполнена системная интеграция блоков регионального моделирования сейсмических воздействий на основе зон ВОЗ и реакции отдельных участков на данные воздействия. При этом моделировались ансамбли акселерограмм с варьированием характеристик разломов, и выполнялась статистическая обработка результатов с представлением пространственных данных в ГИС-технологиях, формирующих геоэкологический риск территории.

7. Разработана оригинальная методика оценки состояния грунтовой толщи по критерию дисперсии и на ее основе введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, подтверждающиеся инструментальными данными (наличие просадочных грунтов) и обуславливающие различный геоэкологический риск. При этом поправки к значениям сейсмической интенсивности рассчитывались в форме доверительных интервалов.

## Литература

1. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Российская сейсмическая шкала нового поколения. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43. № 2. – С. 43–52.
2. Аптикаев Ф.Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 55–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005.
3. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, – 1997. 76 с.
4. 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.
5. 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.

6. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.
7. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. // In: *Proceedings 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California. – 1990. Vol. 1. – pp. 29–45.
8. Beresnev I.A., Atkinson G.M. FINSIM – a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. // *Seismological Research Letters*. – 1998. – Vol. 69. – pp. 27–32.
9. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. // *Engineering Geology*. – 2018. – Vol. 246. – pp. 107–122. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.09.032.
10. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. // In: *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna. – 1995. – Vol. 2. – pp. 1169–1178.
11. Finn Liam W.D., Iai S., Matsunavga Y. Effect of Site Conditions of Ground Motions. // In: *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna. Balkema. – 1994. – Vol. 2.
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. Issue XXII. New York. Springer, – 2009. 745 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.
13. Laurenzano G., Garbin M., Parolai S., Barnaba C., Romanelli M., Froner L. High-resolution local seismic zonation by cluster and correlation analysis. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2023. – Vol. 173. 108122. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108122.
14. Li Y., Qi S., Zheng B., Yao X., Guo S., Zou Y., Lu X., Tang F., Guo X., Waqar M.F., et al. Multi-Scale Engineering Geological Zonation for Linear Projects in Mountainous Regions: A Case Study of National Highway 318 Chengdu-Shigatse Section. // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. 4619. DOI: 10.3390/rs15184619.
15. 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. – Vol. 18. – pp. 1899–1932. DOI: 10.1007/s10518-019-00782-2.
16. 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.
17. Ordaz-Hernández A., Chuy Rodríguez T., Hernández S.J., Garcia Pelaez J. Geological-geotechnical division applied to urban seismic zonation. San Cristobal town, western Cuba. // *Cuaternario y Geomorfología*. – 2012. – Vol. 26. – pp. 89–104.
18. Okabe A.B., Boots B., Sugihara K., Chiu S.N. *Spatial tessellations concepts and applications of Voronoi diagrams*. // Chichester: John Wiley and Sons. – 2000. – pp. 671.
19. Razmyar A., Eslami A. Evaluating the Geotechnical and Geophysical Characteristics of Expanding Districts in Tehran Using Field Experiments. // *Civil Engineering Journal (C.E.J.)*. – 2018. – Vol. 4. No. 2. – pp. 363–377. DOI: 10.28991/cej-030997.
20. Shabestari K.T., Yamazaki F.A. Proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records. // *Earthquake Spectra*. – 2019. – Vol. 17. Issue 14. – pp. 711–723. DOI: 10.1193/1.1425814.
21. Vilorio J.A., Vilorio-Botello A., Pineda M.C., Valera A. Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: A neuro-fuzzy approach. // *Geomorphology*. – 2016. – Vol. 253. – pp. 199–207. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2015.10.007.
22. Yodgorov Sh.I. Geoinformational basis of estimation of the modern status of geocological factor of seismic risk in the territory of Bukhara. // *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*. – 2018. – Vol. 8. Issue 2. – pp. 36–43.

23. Zhu A., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. // Soil Science Society of America Journal. – 2001. – Vol. 65. – pp. 1463–1472.

## References

1. Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Russian seismic intensity scale of new generation. *Seismic Instruments*. 2016. Vol. 43. No. 2. pp. 43–52. (in Russ.)
2. 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.)
3. Zaalishvili V.B. Instrumental method of seismic microzonation. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 1997. 76 p. (in Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Kharebov C.S., Kharebov A.C. Strong motion database development based on contemporary ideology. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2013. No. 3. pp. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537. (in Russ.)
5. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the values of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of vibrations in the soil stratum. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005. (in Russ.)
6. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (in Russ.)
7. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. In: *Proceedings 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California. 1990. Vol. 1. pp. 29–45.
8. Beresnev I.A., Atkinson G.M. FINSIM – a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seismological Research Letters*. 1998. Vol. 69. pp. 27–32.
9. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 246. pp. 107–122. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.09.032
10. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. In: *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna. 1995. Vol. 2. pp. 1169–1178.
11. Finn Liam W.D., Iai S., Matsunavga Y. Effect of Site Conditions of Ground Motions. In: *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna. Balkema. 1994. Vol. 2.
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. Issue XXII. New York. Springer. 2009. 745 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.
13. Laurenzano G., Garbin M., Parolai S., Barnaba C., Romanelli M., Froner L. High-resolution local seismic zonation by cluster and correlation analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023. Vol. 173. 108122. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108122.
14. Li Y., Qi S., Zheng B., Yao X., Guo S., Zou Y., Lu X., Tang F., Guo X., Waqar M.F., et al. Multi-Scale Engineering Geological Zonation for Linear Projects in Mountainous Regions: A Case Study of National Highway 318 Chengdu-Shigatse Section. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 4619. DOI: 10.3390/rs15184619.
15. 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. Vol. 18. pp. 1899–1932. DOI: 10.1007/s10518-019-00782-2.
16. 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.

17. Ordaz-Hernández A., Chuy Rodríguez T., Hernández S.J., Garcia Pelaez J. Geological-geotechnical division applied to urban seismic zonation. San Cristobal town, western Cuba. *Cuaternario y Geomorfologia*. 2012. Vol. 26. pp. 89–104.
18. Okabe A.B., Boots B., Sugihara K., Chiu S.N. *Spatial tessellations concepts and applications of Voronoi diagrams*. Chichester: John Wiley and Sons. 2000. pp. 671.
19. Razmyar A., Eslami A. Evaluating the Geotechnical and Geophysical Characteristics of Expanding Districts in Tehran Using Field Experiments. *Civil Engineering Journal (C.E.J)*. 2018. Vol. 4. No. 2. pp. 363–377. DOI: 10.28991/cej-030997.
20. Shabestari K.T., Yamazaki F. A Proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records. *Earthquake Spectra*. 2019. Vol. 17. Issue 14. pp. 711–723. DOI: 10.1193/1.1425814.
21. Viloría J.A., Viloría-Botello A., Pineda M.C., Valera A. Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: A neuro-fuzzy approach. *Geomorphology*. 2016. Vol. 253. pp. 199–207. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2015.10.007.
22. Yodgorov Sh.I. Geoinformational basis of estimation of the modern status of geocological factor of seismic risk in the territory of Bukhara. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 8. Issue 2. pp. 36–43.
23. Zhu A., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal*. 2001. Vol. 65. pp. 1463–1472.

УДК 550.530

DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

Оригинальная статья

## Оценка гидрогеологических показателей формирования напряженного состояния земной коры территории Армении

Р.А. Пашаян<sup>1</sup>, Д.К. Карапетян<sup>1</sup>, А.А. Геворкян<sup>2</sup>, Р.А. Карамян<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. Н. Назарова НАН РА, Республика Армения, 3515, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна 5, e-mail: romellapashayan@sci.am;

<sup>2</sup> Региональная служба сейсмической защиты, Государственная некоммерческая организация, Республика Армения, 0082, г. Ереван, шоссе Цицернакаберд 8/1

Статья поступила: 26.01.2024, доработана: 01.04.2024, принята к публикации: 02.04.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Изучение геодинамических процессов земной коры территории Армении проводится по широкому спектру геофизических полей: сейсмическое, гидрогеодинамическое, геохимическое, деформационное, тектоническое. Наблюдательная сеть включает: 14 гидрогеодинамических скважин, пробуренных в сеймотектонических зонах региона и источники минеральных вод Центральной Армении – Суренаван, Веди, Арзни и Бжни. Гидрогеологические показатели гидрогеодинамики, химического состава подземных вод территории Армении при сопоставлении с текущей сейсмичностью региона являются индикаторами формирования напряженно-деформированного состояния земной коры региона. **Цель исследований.** Анализ сейсмичности, составление карт пространственно-временного распределения сейсмичности и изучение изменений напряженно-деформированного состояния земной коры региона по вариациям гидрогеологических показателей. Задачей исследования является определение характерных вариаций гидрогеохимических и гидрогеодинамических показателей и изучение эффектов-предвестников в связи с сеймотектоническим процессом. **Методы исследования.** Применяемый метод гидрогеологического мониторинга основан на способности подземных вод реагировать на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры региона. Для обработки временных рядов вариации подземных вод и компонентов химического состава минеральных вод применялись статистические методы и учет тензочувствительности мест расположения пунктов наблюдений. **Результаты работ.** Анализ сейсмичности территории Армении за исследуемый период указывает на приуроченность очагов землетрясений к глубинным разломам: Ереванскому, Арарат-Севанскому и Памбак-Севанскому. Наблюдается концентрация очагов землетрясений на севере региона, в Приереванской разломной зоне и на восточном побережье оз. Севан. Гидрогеодинамические эффекты, предшествующие произошедшим землетрясениям, выявлены по вариациям подземных вод в гидрогеодинамических скважинах сети наблюдений и по компонентам химического состава минеральных вод источников. Построенная карта напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении отражает характер деформации в виде сжатия в Гюмрийском, Ереванском и Севанском тектонических блоках. В перечисленных тектонических блоках расположены гидрогеологические пункты мониторинговых наблюдений, по которым получены аномальные изменения величин гидрогеологических показателей и содержания CO<sub>2</sub>, растворенного в минеральных водах.

**Ключевые слова:** землетрясение, деформация, земная кора, мониторинг, тектоника, гидрогеодинамика, геохимия, скважина.

**Для цитирования:** Пашаян Р.А., Карапетян Д.К., Геворкян А.А., Карамян Р.А. Оценка гидрогеологических показателей формирования напряженного состояния земной коры территории Армении. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 61-76. DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

Original paper

# Assessment of hydrogeological indicators of the formation of the stress state of the Earth's crust on the territory of Armenia

R.A. Pashayan<sup>1</sup>, D.K. Karapetyan<sup>1</sup>, A.A. Gevorkyan<sup>2</sup>, R.A. Karamyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysics and Engineering Seismology named after. acad. N. Nazarova NAS RA, 5 V. Sargsyan Str., Gyumri 3515, Republic of Armenia,  
e-mail: romellapashayan@sci.am;

<sup>2</sup> Regional Seismic Protection Service, State non-profit organization, 8/1 Tsitsernakaberd highway, Yerevan 0082, Republic of Armenia

Received: 26.01.2024, revised: 01.04.2024, accepted: 02.04.2024

**Abstract: Relevance.** The study of geodynamic processes of the Earth's crust in Armenia involves a wide range of geophysical fields such as seismic, hydrogeodynamic, geochemical, deformational, and tectonic. The monitoring network includes 14 hydrogeodynamic wells drilled in seismotectonic zones and mineral water sources in Central Armenia. Hydrogeological indicators and the chemical composition of underground waters are compared with the current seismicity of the region to indicate the formation of stress-deformed state of the Earth's crust. **The research aims** to analyze seismicity, create maps of spatial-temporal seismic distribution, and study changes in the stress-deformed state of the region based on hydrogeological variations. The research task is to determine characteristic variations in hydrogeochemical and hydrogeodynamic indicators and study precursor effects related to the seismotectonic process. **Methods.** Application of hydrogeological monitoring method based on groundwater's response to changes in stress-deformed state of the region. Statistical methods used to process temporal variations of underground waters and chemical components of mineral waters. Consideration of the sensitivity of observation points' locations. **Results.** Analysis of seismicity in Armenia indicates that seismic sources are associated with deep faults like the Yerevan, Ararat-Sevan, and Pambak-Sevan faults. Concentration of seismic sources in the northern region, the Pre-Yerevan fault zone, and the eastern coast of Lake Sevan is observed. Hydrogeodynamic effects preceding earthquakes are identified through variations in underground waters in monitoring wells and chemical components of mineral water sources. The constructed map of stress-deformed state of the Earth's crust in Armenia reflects the deformation structure in compression form in Gyumri, Yerevan, and Sevan tectonic blocks. In the listed blocks, anomalous changes in hydrogeological parameters and CO<sub>2</sub> dissolved in mineral waters were obtained.

**Keywords:** earthquake, deformation, Earth's crust, monitoring, tectonics, hydrogeodynamics, geochemistry, well.

**For citation:** Pashayan R.A., Karapetyan D.K., Gevorkyan A.A., Karamyan R.A. Assessment of hydrogeological indicators of the formation of the stress state of the Earth's crust on the territory of Armenia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 61-76. DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

## Введение

С 1977 г. на Камчатке проводятся непрерывные наблюдения за режимом подземных вод. Одной из главных практических задач гидрогеологического мониторинга является выявление в реальном времени гидрогеологических предвестников сильных землетрясений [Рябинин и др., 2009]. По результатам многолетних исследова-

ний ученых всего мира, в т. ч. сейсмологов стран Центральной Азии, гидрогеологический метод прогноза землетрясений относится к одним из наиболее достоверных [Султанходжаев, 2006].

За последние годы широко используются методы мониторинга для наблюдений за состоянием различных природных сред, контроля геодинамических процессов. В частности, в представляемой работе исследования проводились методом гидрогеологического мониторинга земной коры. Метод гидрогеологического мониторинга земной коры разработан в институте Физики Земли РАН [Киссин, 1993]. Метод основан на способности подземных вод реагировать на изменения напряженно-деформированного состояния земной коры, изучении эффектов-предвестников, связанных с землетрясениями, оценке величины деформации пород по наблюдаемым вариациям гидрогеологических показателей. Мониторинг включает измерения уровня вод в гидрогеодинамических скважинах, пробуренных в тектонически активных участках земной коры территории Армении, и режимные наблюдения за химическим составом вод и углекислого газа, растворенного в воде минеральных источников Центральной Армении. Метод, также включает анализ сейсмического режима территории Армении. Данные по уровню вод гидрогеодинамических скважин и каталог землетрясений предоставляет региональная служба сейсмической защиты Государственной Некоммерческой Организации Республики Армения (ГНКО РА). Мониторинг слежения за химическим составом минеральных вод проводится в лаборатории «Экологическая Геофизика и Гидрогеодинамика» ИГИС им. А.Г. Назарова. В представленной работе продолжены исследования данных по уровню вод в скважинах, пробуренных по всему региону Армении, методом гидрогеологических предвестников (ГГД) [Киссин, 2015]. Изучение гидрогеологических предвестников в Армении позволило выявить гидрогеологические эффекты, как по уровню подземных вод, так и по химическому составу минеральных вод, предшествующим землетрясениям [Пашаян, 1998]. Метод гидрогеологических предвестников включает принципы организации регистрации наблюдений, способы обработки и интерпретации данных. Обработка данных сводилась к выделению полезного сигнала на фоне помех. Для фильтрации помех использованы статистические методы обработки: вычисление интерполяционных многочленов, корреляционный анализ, выявление скрытых периодичностей и цифровая фильтрация. В результате применения метода и сопоставления полученных данных по гидродинамике и динамике концентрации элементов химического состава вод с сейсмичностью региона, выявлены гидрогеологические эффекты, предшествующие землетрясениям и другим тектоническим процессам земной коры территории Армении за исследуемый период.

### Исходные данные и методы исследований

Исходными данными для исследований являются каталоги землетрясений за последние три года (2021–2023 гг.) с  $M \geq 2,5$ , мониторинговые данные по вариациям уровня вод в гидрогеодинамических скважинах, пробуренных на тектонико-активных участках территории Армении, и по изменению концентрации параметров химического состава минеральных вод Центральной Армении. Геолого-тектонические, гидрогеологические и геофизические условия и высокая сейсмичность территории Армении дают возможность для исследований геодинамических процессов земной коры и оценки напряженно-деформированного состояния сейсмоактивных зон во времени и пространстве.

Территория Армении характеризуется зональным строением, обусловленным разграничивающими ее четырьмя разломами глубокого заложения: Лалвар-Мравская, Базумо-Севанская, Анкаван-Сюникская и Ереванская [Асланян, 1968] (рис. 1). В гидрогеологическом отношении регион представляет собой высокоприподнятую область дренажа и относится к зоне интенсивного водообмена с направлением стока поверхностных вод от складчатого сооружения в сторону Куринской и Среднеараксинской депрессий. Для размещения наблюдательных скважин выбирались участки и водоносные горизонты с низким уровнем неконтролируемых помех с тем, чтобы определить особенности режима этих горизонтов и реакции на подготовку землетрясений [Wang et al., 2010]. Гидрогеохимические наблюдения включают данные по химическому составу вод минеральных источников: Веди, Суренован, Бжни и Арзни. Сеть гидрогеохимических наблюдений размещена по всей территории Центральной Армении (рис. 1).

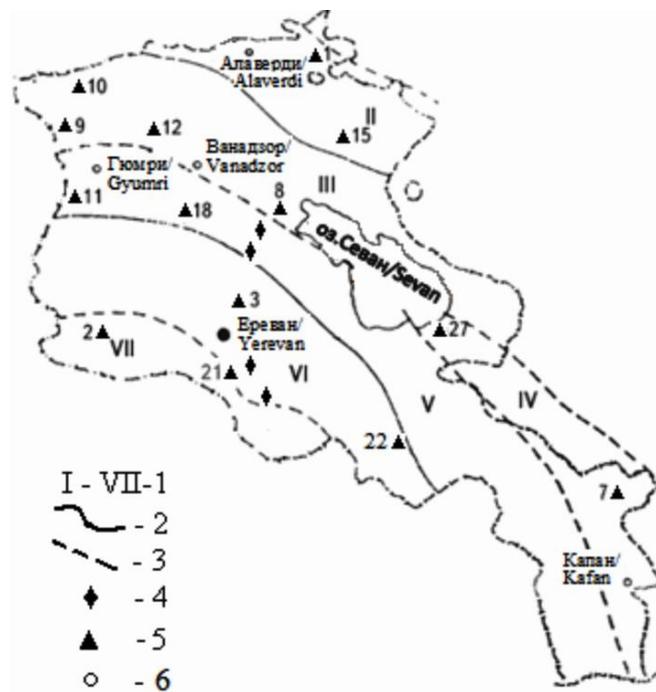


Рис. 1. Схема тектонической зональности Армении, составленная А.Т. Асланяном.  
1 – номера зон; 2 – границы оротектонических поясов; 3 – границы тектонических зон;  
4 – минеральные источники, 5 – гидрогеохимические скважины, 6 – города /

Fig. 1. Scheme of tectonic zonality of Armenia, compiled by A.T. Aslanyan.  
1 – zone numbers; 2 – boundaries of orotectonic belts; 3 – boundaries of tectonic zones;  
4 – mineral springs, 5 – hydrogeochemical wells, 6 – cities

Наблюдения за вариациями уровня вод ведутся в неглубоких водоносных горизонтах гидрогеодинамических скважин. Изучение режимобразующих факторов позволило выявить гидрогеодинамические эффекты, предшествующие изменениям напряженно-деформированного состояния среды и являющиеся индикаторами современных геодинамических процессов. Для обработки данных по изменению уровня вод в гидрогеодинамических скважинах временной ряд приводится к равномерной дискретности с периодом – 1 сутки. Далее сезонные вариации удалялись цифровым фильтром [Гриневский и др., 1983], снимающим частотный диапазон

спектра, содержащий сезонную и кратные ей гармоники. Обработанная кривая сопоставлялась с сейсмическими событиями. С целью повышения корреляции полученных данных с сейсмичностью в работе рассмотрена методика выборки сейсмических событий из каталога для различных наблюдательных скважин с учетом деформаций в окрестностях эпицентра готовящегося землетрясения [Пашаян и др., 2006]. Для выделения гидрогеологических эффектов землетрясений рассчитывалась деформация  $D$ , которая должна развиваться на месте расположения наблюдательной скважины в зависимости от ее расстояния до эпицентра и магнитуды землетрясения. Расчетная деформация определялась по формуле И.Г. Добровольского [Добровольский, 1984]

$$\varepsilon = \left[ \frac{10^{0,413M-2,66}}{R} \right]^3$$

где  $M$  – магнитуда землетрясения,  $R$  – эпицентральное расстояние (км).

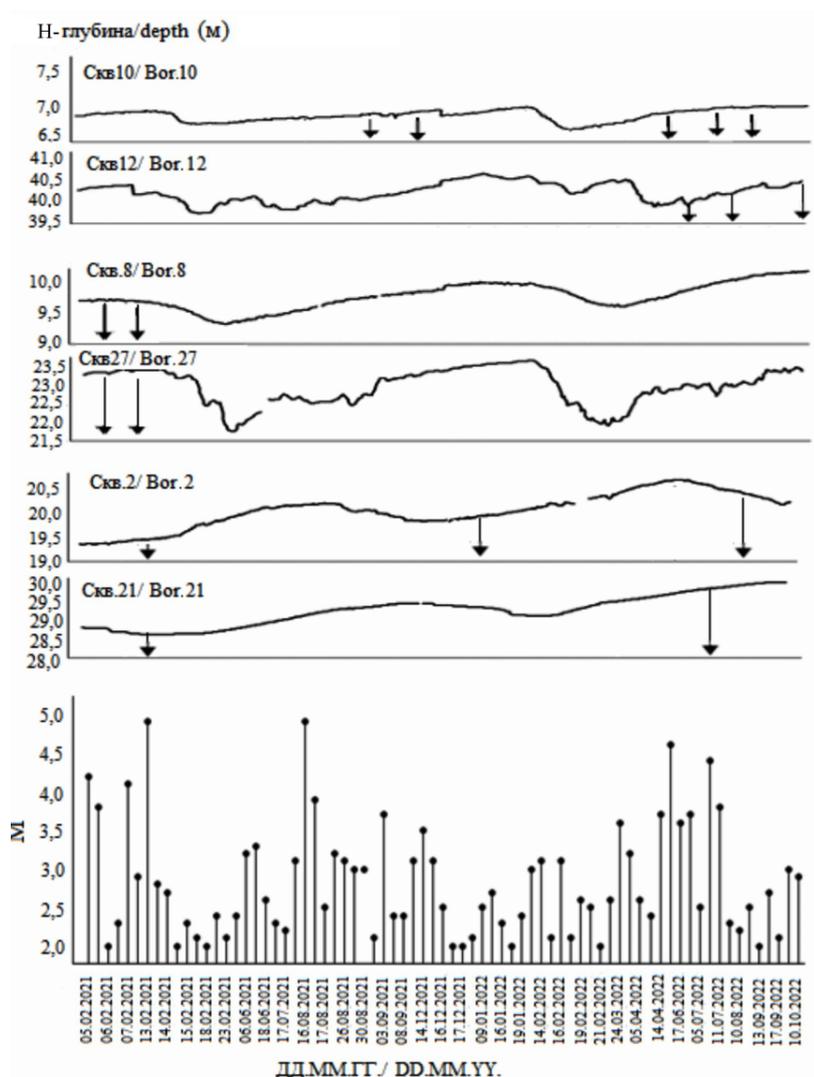


Рис. 2. Графики вариаций уровня вод в гидрогеодинамических скважинах, последняя диаграмма произошедших землетрясений по магнитуде /

Fig.2. Graph of water level variations in hydrogeodynamic wells, the last diagram of earthquakes that occurred by magnitude

При этом имелось в виду, что в процессе подготовки землетрясений могут быть выявлены эффекты в том случае, если расчетная деформация имеет величину не менее  $10^{-8}$ , т.е. превышает величину земно-приливной деформации. В некоторых случаях рассматривается возможная высокая тензочувствительность места расположения скважины, где следует учитывать деформации порядка  $10^{-9}$  и более. Радиус зоны проявления гидрогеологических эффектов определяется по формуле:  $R = 10^{0,43M}$  (км), где  $M$  – магнитуда землетрясения [Добровольский и др., 1980]. Таким образом, обработанные временные ряды вариаций уровня вод в скважинах: № 10, 12, 2, 21, 8 и 27, за 2019–2023 гг. приводятся в виде графиков (рис. 2).

Гидрогеодинамическая скважина-10 расположена на границе Севанской и Приараксинской тектонических зон и в Гюмрийском тектоническом блоке, за время исследований вокруг скважины произошло 15 землетрясений с  $2 < M \leq 5.0$ . Перед землетрясением 03.05.2022 с  $M=4,6$  наблюдается бухтообразное понижение уровня воды в скважине (рис. 2), что вероятно, указывает на то, что в окрестности скважины преобладали деформации растяжения, которые приводили к приросту порово-трещинной емкости и повышению проницаемости пласта. Скважина-12 пробурена в зоне активного Спитакского разлома, в Спитакском тектоническом блоке. Землетрясение 02.05.2022 с  $M=4,6$  вызвало ступенчатое изменение уровня воды (рис. 2) соответствующее деформации сдвига.

Скважина-2 расположена на севере Мецаморского тектонического блока, ограниченного с севера Ереванским глубинным разломом. Землетрясение 13.02.2021 с  $M=4,9$  вызвало бухтообразное понижение уровня воды в скважине, это указывает на деформацию растяжения вокруг скважины. Скважина-21 расположена к ЮВ от Ереванского тектонического блока. Землетрясение 13.02.2021,  $M=4,9$  вызвало ступенчатое понижение уровня воды в скважине, что так же создало деформацию растяжения вокруг скважины.

Скважина-8 расположена на СЗ Севанского тектонического блока. Землетрясения: 05.02.2021,  $M=4,2$ ; 13.02.2021,  $M=4,1$  вызвали бухтообразный подъем уровня воды в скважине. Скважина-27 расположена на ЮВ Севанского тектонического блока. Землетрясения: 05.02.2021,  $M=4,2$ ; 13.02.2021,  $M=4,1$  вызвали бухтообразный подъем уровня воды в скважине. Вариации уровня вод в скважинах 8 и 27 (рис. 2) перед перечисленными землетрясениями демонстрируют повышение уровня, связанное с воздействием сжимающих напряжений; в окрестностях скважин сформирована деформация растяжения.

Таким образом, по характеристикам гидродинамических показателей вод скважин, выявлены деформационные процессы земной коры в виде структур деформации: растяжения и сжатия [Milyukov et al., 2011].

Мониторинговые наблюдения проводятся за химическим составом минеральных вод Центральной Армении: Суренаван, Веди, Арзни и Бжни. Задачей гидрогеохимического мониторинга является выявление гидрогеохимических эффектов, выраженных преимущественно в изменениях макрокомпонентного и газового состава вод, сопутствующих геодинамическим движениям земной коры. Исследуются основные компоненты химического состава минеральных вод ( $Cl$ ,  $HCO_3$ ,  $SO_4$ ,  $Mg$ ), газового- $CO_2$  при сопоставлении с сейсмичностью.

Подземные воды района исследований относятся к межгорной Араратской котловине. Араратская котловина является областью накопления подземного стока и

формирования грунтовых и напорных водоносных горизонтов и включает большие запасы минеральных вод [Геология Армянской ССР, 1969]. **Суренованское** месторождение минеральных вод расположено в середине структурного блока Приараксинской зоны, основным структурным элементом этой зоны является Ереванский глубинный разлом. **Вединское** месторождение минеральных вод приурочено к зоне тектонического нарушения. В динамике минеральных вод месторождения некоторую роль играет смешивание с минеральными глубинными грунтовыми водами, что приводит к изменению общей минерализации. **Арзни** в структурном отношении приурочено к средней части Разданской впадины тектонического происхождения. В гидрогеологическом отношении Разданская впадина представляет артезианский бассейн. **Бжнинское** месторождение минеральных вод приурочено к пересечению Разданского и Бжнинского тектонических нарушений. Участок месторождения расположен в ядре Арзаканской складки, сложенной метаморфическими сланцами, прорванными гранитами. В пределах месторождения ядро складки разорвано крупным тектоническим нарушением постэоценового возраста. Приуроченность минеральных вод к глубинным тектоническим разломам, которым характерна повышенная геодинамика, отражается на химическом составе минеральных вод в виде аномальных изменений некоторых химических параметров. Для наглядного изображения химического состава вод по каждому месторождению вод составлена формула М.Г. Курлова [Самарина, 1977], (табл. 1). Газонасыщенность ( $CO_2$ , г/л) вод минеральных источников: Бжни и Арзни – высокое (1–0,5), Веди – среднее (0,5–1,0), Суренаван – низкое (0,1–0,5). Общая минерализация вод месторождений составляет от 3,7 мг/л до 8,3 мг/л, по величине рН (6,7–7,0) относятся к типу нейтральных вод.

Таблица 1 / Table 1

**Формулы химического состава вод минеральных источников /**  
**Formulas of the chemical composition of mineral spring waters**

Минеральные воды / Mineral water	Формулы вод / Water formulas	Наименования воды / Names of water
Бжни / Bjni	$CO_2 1.2 M 4.5 \frac{HCO_3 71 CL 23 SO_4 6}{Na 71 Ca 15 Mg 10} pH 6.7 T 21$	Гидрокарбонатно-натриевая-хлоридная / Hydrocarbonate-sodium-chloride
Арзни / Arzni	$CO_2 1.3 M 5.9 \frac{CL 67 HCO_3 26 SO_4 7}{Na 73 Mg 14 Ca 10} pH 6.8 T 22$	Хлоридно-натриево-гидрокарбонатная / Chloride-sodium-bicarbonate
Веди / Vedi	$CO_2 1.2 M 3.7 \frac{HCO_3 79 SO_4 15 CL 6}{Ca 43 Na 33 Mg 22} pH 6.7 T 22$	Гидрокарбонатно-кальциево-магниева / Hydrocarbonate calcium magnesium
Суренаван / Surenavan	$CO_2 0.35 M 4.0 \frac{HCO_3 46 SO_4 30 CL 23}{Mg 50 Na 37 Ca 10} pH 7.0 T 22$	Магниево-гидрокарбонатно-натриево-сульфатно-хлоридная / Magnesium-Hydrocarbonate-Sodium-Sulfate Chloride

Статистический анализ фактического материала показал, что наиболее информативной характеристикой для получения критерия краткосрочного прогноза времени землетрясений служит дисперсия содержания углекислого газа в воде на некотором временном интервале. Рассматриваемый метод прогноза основан на статистической оценке изменчивости дисперсии содержания углекислого газа в смежных временных интервалах [Барсуков и др., 1992]. При этом используется среднее значение дисперсии, а также скорость ее изменения. Статистическая обработка временного ряда изменения концентрации углекислого газа проводилась по воде минерального источника Суренаван (рис. 3). Среднее значение содержания углекислого газа в воде составляет – 321 мг/л. Построен график вариации временного ряда углекислого газа (рис. 3) по данным лабораторного анализа проб воды минерального источника. График вариации дисперсии  $\text{CO}_2$  составлен по значению дисперсии, которая равняется среднему квадрату отклонений отдельных значений параметра от общего среднего значения их. Полученная картина отражает периоды повышения и соответствующего снижения значений дисперсии. Полученный результат сопоставлялся с сейсмическими событиями, имевшими место на разном удалении от пункта наблюдения (мин. источник Суренаван). Перед сейсмическими событиями вначале происходит повышение величины дисперсии, а потом ее понижение. Чаще всего сейсмические события соответствуют минимальным значениям дисперсии, что допустимо принять в качестве прогнозного признака.

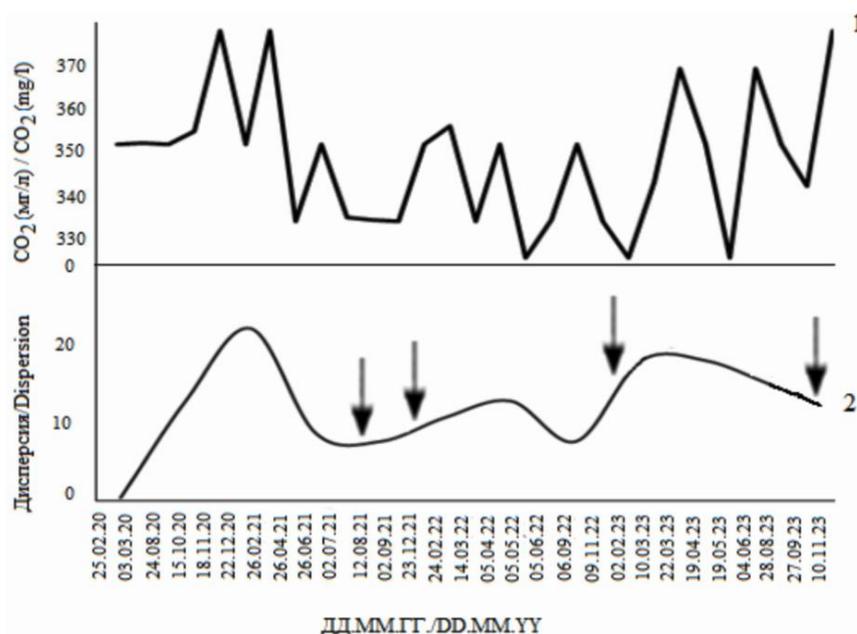


Рис. 3. Изменение величин дисперсии содержания углекислого газа, растворенного в воде минерального источника – Суренаван. 1 – фактические данные содержания  $\text{CO}_2$ , 2 – дисперсия содержания  $\text{CO}_2$ , стрелками указаны землетрясения /

Fig.3. Change in the dispersion of carbon dioxide dissolved in the water of a mineral spring - Surenavan. 1 – actual data –  $\text{CO}_2$ , 2 – dispersion,  $\text{CO}_2$ , arrows indicate earthquakes

Как видно из рисунка 3 сейсмические события (табл. 2) отразились на дисперсии содержания углекислого газа в воде минерального источника Суренаван. Землетрясения происходят на спаде величины дисперсии после соответствующего его повышения, и имеют бухтообразную форму.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры землетрясений, произошедших на эпицентральной  
расстоянии 36-893 км от минерального источника Суренаван /  
Parameters of earthquakes that occurred at the epicentral distance (36-893 km)  
from the mineral spring – Surenavan**

Дата землетрясений/ Date of earthquakes	$\varphi$ , °	$\lambda$ , °	M	R, км/ R, km	Объемная деформация/ Volumetric deformation	Минеральный источник/ Mineral spring
26.08.2021	40,12	45,03	3,3	49	$1,10 \cdot 10^{-9}$	Суренаван/Surenavan
13.02.2022	41,14	43,99	5,4	172	$9,93 \cdot 10^{-9}$	Суренаван/Surenavan
06.02.2023	37,17	37,08	7,8	893	$6,64 \cdot 10^{-8}$	Суренаван/Surenavan
13.11.2023	39,48	44,62	4,3	36	$4,66 \cdot 10^{-8}$	Суренаван/Surenavan

$\varphi$  – широта,  $\lambda$  – долгота, M – магнитуда, R – эпицентральной расстояние /  
 $\varphi$  – latitude /  $\lambda$  – longitude, M – magnitude, R – epicentral distance

Как видно из таблицы 2, эпицентры землетрясений находились на расстоянии от 36 км до 893 км, а напряженно-деформированное состояние земной коры в окрестностях минерального источника Суренаван оценивалось величиной объемной деформации от  $10^{-9}$  до  $10^{-8}$ . В таблице 2 указано землетрясение (06.02.2023, M=7,8) [Геодакян и др., 2023], произошедшее на эпицентральной расстоянии 893 км от минерального источника Суренаван, при этом расчетная деформация составила  $10^{-8}$ , что эквивалентно величине приливной деформации. Таким образом, несмотря на удаленность очага Турецкого землетрясения (>800 км), отмечается реакция минеральной воды Суренаван на это сейсмическое событие, что ещё раз подтверждает высокую тензочувствительность приразломных зон выхода минеральных вод Армении на удалённые землетрясения [Киссин, 1985].

### Результаты исследования

Динамика изменения сейсмического режима в регионе, за последние три года (согласно каталогу сейсмических событий за 2020–2023 гг.), приводится на рис. 4. Составленный график распределения землетрясений по годам указывает на ослабление сейсмичности в 2023 году. За период наблюдений на территории Армении локализован 101 эпицентр местных землетрясений с M>2.

N-количество землетрясений/  
N-quantity of earthquakes

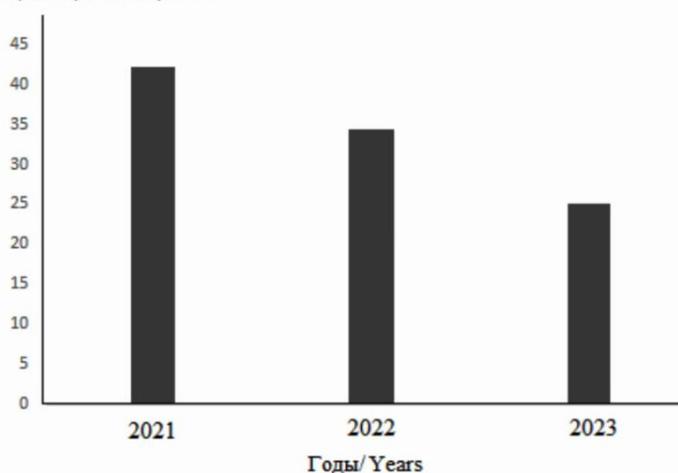


Рис. 4. Распределение количества землетрясений на территории Армении за 2021–2023 гг. (N – количество землетрясений) /  
Fig. 4. Distribution of the number of earthquakes on the territory of Armenia for 2021–2023 (N – quantity of earthquakes)

Карта эпицентров произошедших землетрясений отражает сейсмичность во времени и пространстве на напряженных участках (концентрация эпицентров землетрясений) земной коры с повышенной активностью геодинамических процессов (рис. 5). Карта сейсмичности указывает на концентрацию эпицентров землетрясений на севере региона, на Джавахетском нагорье. Концентрация эпицентров землетрясений наблюдается также на восточном побережье оз. Севан, где скопления очагов землетрясений приурочены к Памбак – Севанскому глубинному разлому. Эпицентры землетрясений фиксируются в центральной части региона, где очаги произошедших землетрясений тяготеют к Ереванскому глубинному разлому. Ряд сейсмических событий зарегистрирован на юге территории Армении [Karapetyan et al., 2023].

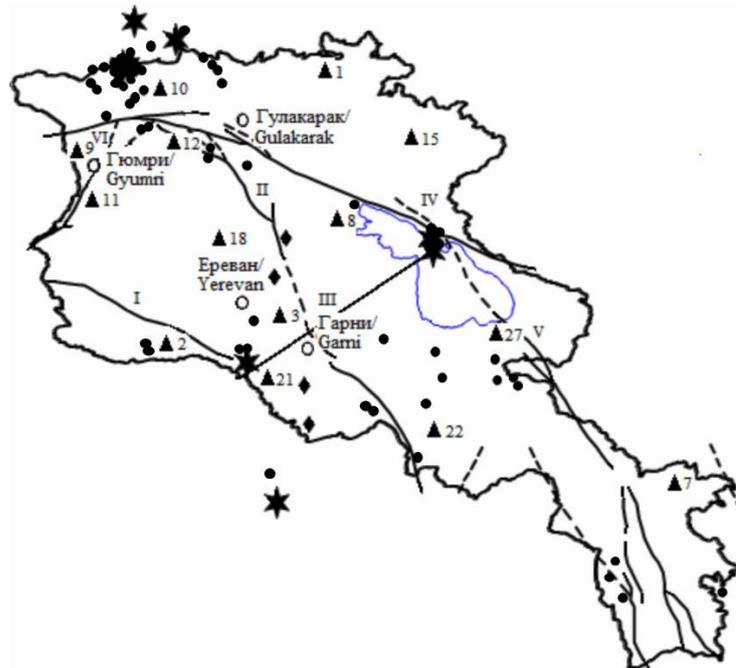


Рис. 5. Карта сейсмичности территории Республики Армения.

— глубинные разломы: I – Ереванский, II – Гарнийский,  
 III – Арарат-Севанский, IV – Базум-Севанский, V – Памбак-Севан-Сюникский,  
 VI – Ахурянский, ◆ – минеральные источники, ▲ – гидрогеодинамические скважины, о – города,  
 ● –  $M=2\div 3.5$ , ★ –  $M \geq 4.0$  /

Fig. 5. Seismicity map of the territory of the Republic of Armenia.

— deep faults: I – Yerevan fault, II – Garni fault,  
 III – Ararat-Sevan fault, IV – Bazum-Sevan fault, V – Pambak-Sevan-Syunik fault,  
 VI – Akhuryan fault, ◆ – mineral springs, ▲ – hydrogeodynamic wells, o – cities, ● –  $M=2\div 3.5$ ,  
 ★ –  $M \geq 4.0$

Карта сейсмичности территории Армении (рис. 5) при сопоставлении с картой предыдущих лет показывает на активизацию сейсмичности на восточном побережье оз. Севан. Сильные землетрясения с  $M > 4.5$ , имели место на севере, на границе с Грузией, в центральной части региона, на восточном побережье оз. Севан и на границе с Ираном.

На основе анализа сейсмичности региона в сопоставлении с вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры выявлена корреляционная связь между ними. Корреляционная связь наблюдается между магнитудой, про-

изшедшего землетрясения, и величиной расчетной деформации. Карта напряженно-деформированного состояния земной коры (рис. 6) составляется по вариациям показателей гидрогеодинамических и гидрогеохимических пунктов наблюдений. Показатели гидрогеодинамики и гидрогеохимии это форма, амплитуда и продолжительность изменения уровня подземных вод в скважинах и изменение химического состава минеральных вод перед землетрясениями и другими тектоническими процессами земной коры [Пашаян и др., 2006]. Карта напряжённо-деформированного состояния земной коры Армении отражает тектонические блоки наращивания деформаций и напряжённости в приразломных зонах региона. Изменения деформации земной коры территории Армении, на карте показаны в виде сформированных по изолиниям деформаций структур сжатия и растяжения. Структура деформационного сжатия (сгущения изолиний равных величин расчетной деформации) сформирована: на Джавахетском нагорье, в Гюмрийском блоке, Спитакском тектоническом блоке, Севанском и Ереванском тектонических блоках и разломной зоне. Деформация растяжения наблюдается в Мецаморском и Апаран-Анкаванском тектонических блоках. Ослабление напряженности земной коры наблюдается на СВ и Юге территории Армении.

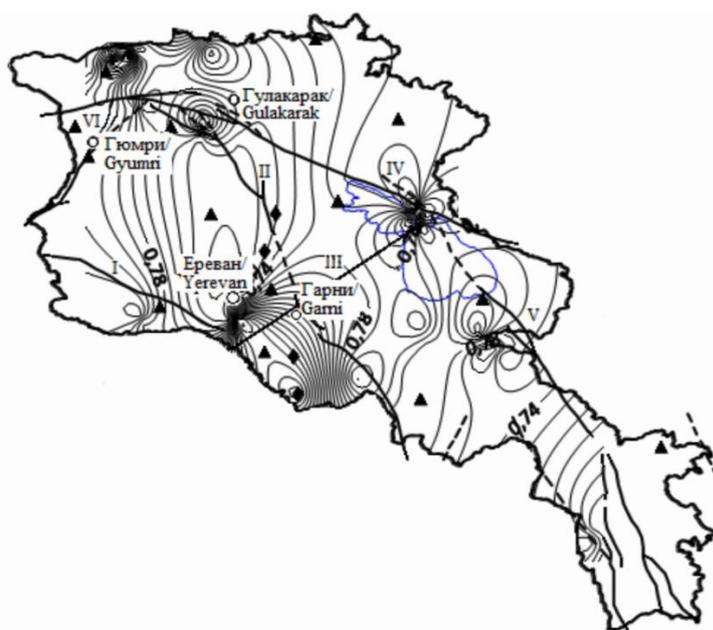


Рис. 6. Карта напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении за 2021-2023 гг.

↗ – глубинные разломы, ⚡ – изолиния деформации,

◆ – минеральные источники, ▲ – гидрогеодинамические скважины, о – города /

Fig. 6. Map of the stress-strain state of the earth's crust on the territory of Armenia for 2021-2023.

↗ – deep faults, ⚡ – deformation isoline,

◆ – mineral springs, ▲ – hydrogeodynamic wells, o – cities

При сопоставлении карты эпицентров землетрясений (рис. 5) с описанием динамики сейсмичности, карта напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении отражает распределение деформации на сейсмоактивных участках земной коры региона [Латынина, 1981].

По результатам мониторинговых наблюдений за химическим составом вод минеральных источников, составлен график вариаций временного ряда величины минерализации вод источников (рис. 7).

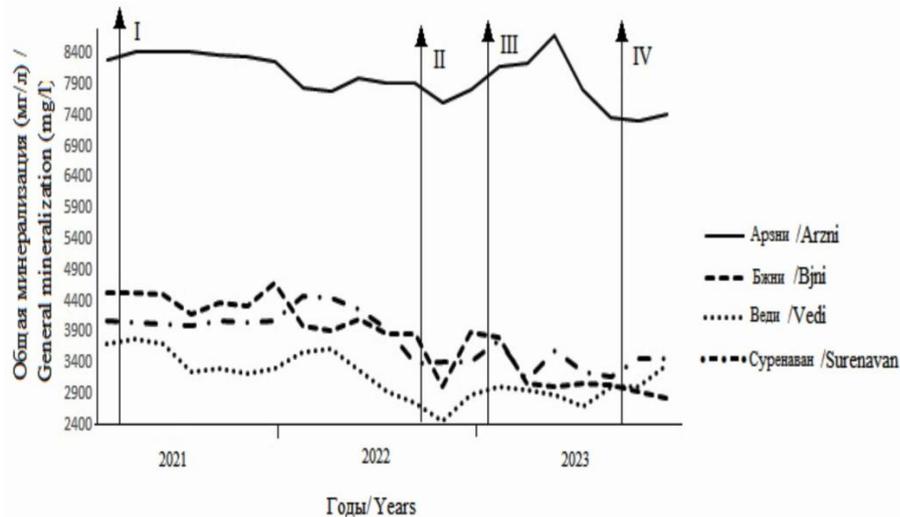


Рис. 7. График вариаций величины минерализации вод минеральных источников, I-IV- землетрясения /  
Fig. 7. Graph of variations in mineralization values of mineral spring waters, I-IV- earthquakes

На графике приводятся обработанные временные ряды величины общей минерализации вод источников Центральной Армении. Обработка проводилась с учетом сезонных изменений и исключения тренда [Rubinin et al., 2017]. Вертикальными линиями отмечены моменты землетрясений. Рассмотрены изменения во времени параметра общей минерализации воды по источникам (рис. 7). На рисунке учтены землетрясения: I–13.02.2021 M=4.9 (Армения); II–11.07.22 M=4.4 (Армения); III–06.02.2023 M=7.8 (Турция), IV–21.08.23 M=4.1 (Армения). Определены гидрогеохимические эффекты по водам месторождений: Суренаван, Веди, Арзни и Бжни (табл. 3) в результате, произошедших землетрясений [Корулова et al., 2023].

Таблица 3 / Table 3

**Вычисленные гидрогеохимические эффекты (общей минерализации) вод источников по параметрам, произошедших землетрясений /  
Calculated hydrogeochemical effects (total mineralization) of source waters according to parameters of earthquakes that occurred**

Минеральные источники / Mineral springs	Параметры землетрясений / Earthquake parameters				Гидрогеохимические эффекты (ГТХ) / Hydrogeochemical effects (HGC)			
	Дата землетрясений дд.мм.гг./ date earthquakes dd.mm.yy	Координаты / Coordinates	Магнитуда / Magnitude	Эпи-о-е расстояние (км)/ Epicentral distance (km)	Общая минерализация / General mineralization			
	j °	l °	M	Δ	$\bar{K}^*$	$\delta$	$\bar{K}$	$A = n \delta$
Суренаван/Surenavan								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	39	4075	14	4060	4δ

11.07.2022	41,17	43,95	4,4	178	3917	464	3400	-
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	893	3901	363	3760	3 $\delta$
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	96	3397	363	3470	3 $\delta$
Веди/Vedi								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	28	3748	32	3700	3 $\delta$
11.07.2022	41,17	43,95	4,4	163	3072	399	2750	-
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	896	3115	305	3030	3 $\delta$
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	86	3118	305	3360	-
Арзни/Arzni								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	38	8348	52	8420	2 $\delta$
11.07.2022	41,17	43,95	4,4	116	7835	122	7910	5 $\delta$
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	901	8041	277	8200	$\delta$
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	78	7790	277	7420	5 $\delta$
Бжни/Vjni								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	56	4536	19	4520	1.5 $\delta$
11.07.2022	41,17	43,95	4,4	108	3818	336	3880	2 $\delta$
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	912	3989	367	3810	2 $\delta$
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	72	3067	367	2830	-

$\bar{K}^*$  – среднее значение минерализации;  $A$  – гидрогеохимический эффект,  $\bar{K}$  – фоновое значение минерализации /  $\bar{K}^*$  – average value of mineralization;  $A$  – hydrogeochemical effect;  $\bar{K}$  – background value of mineralization.

Как видно из таблицы 3, между параметрами произошедших землетрясений (магнитуда, эпицентральное расстояние) и величинами гидрогеохимических эффектов наблюдается корреляционная зависимость, чем выше магнитуда землетрясения и близость эпицентра землетрясения к пункту наблюдения, тем выше величина гидрогеохимического эффекта.

Результаты применения статистического метода обработки временных рядов минерализации вод источников приводятся в таблице 3. Рассчитанный гидрогеохимический эффект:  $A=n*\delta$ , равен величине дисперсии умноженной на  $n$ , где  $n$  – число, указывающее, во сколько раз увеличивается дисперсия во время сейсмического события для определяемого химического элемента состава вод [Григорян и др., 2016]. Изменения гидрогеохимических показателей, рассматриваемые в качестве прогностического признака, должны иметь «аномальный» характер, т.е. значительно отличаться от фоновых вариаций. Таким образом, мониторинг изменений гидрогеологических показателей подземных вод территории Армении имеет краткосрочное и среднесрочное прогностическое значение. Мониторинг содержания и изменений углекислого газа, растворенного в минеральных водах, имеет краткосрочное прогностическое значение.

## Выводы

Карта сейсмичности, составленная по каталогу землетрясений за исследуемый промежуток времени, отражает концентрацию эпицентров землетрясений на севере и в Центральной части Армении, а также показывает на активизацию сейсмичности на восточном побережье оз. Севан.

Гидрогеологические эффекты, выявленные перед местными землетрясениями на территории Армении, по продолжительности эффекта, относятся к категории: среднесрочных и краткосрочных предвестников, а эффекты перед Турецким землетрясением, согласно длительности эффекта, можно отнести к долгосрочным предвестникам.

Мониторинг изменений углекислого газа, растворенного в минеральных водах Армении, может быть использован в качестве экспресс-информации при взятии проб воды минеральных источников.

Построено напряженно-деформированное поле земной коры территории Армении; концентрация напряженности тектонических структур пропорциональна значениям гидрогеологических показателей. Величина или аномальные значения показателей зависят от количества и параметров произошедших землетрясений.

Выявленные гидрогеологические показатели формируют напряженно-деформированное состояние земной коры территории Армении, которое отражает активизацию динамики тектонических блоков: Гюмрийского и Севанского, а также Приереванской зоны разломов и глубинных разломов: Гарнийского и Арарат-Севанского.

Комплексная интерпретация данных о гидрогеологических показателях (химических и гидродинамических) способствует повышению достоверности их в качестве предвестников землетрясений и оценки напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении.

## Литература

1. Асланян А.Т. Региональная геология Армении. Ереван: Айпетрат, – 1968. 408 с.
2. Барсуков В.Л., Беляев А.А. Геохимические методы прогноза землетрясений. М.: Наука, – 1992. 213 с.
3. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ( $M_w=7.8$ ). // Геология и Геофизика Юга России. – 2023. –Т. 13. № 4. – С.42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.
4. Геология Армянской ССР. Том IX. Минеральные воды. / ред. Мкртчян С.С. Ереван: Издательство АН Армянской ССР, – 1969. 505 с.
5. Григорян С.В., Пашаян Р.А., Арутюнян Л.В. Результаты гидрогеологического мониторинга геодинамических процессов территории Армении. // Доклады НАН РА. – 2016. – Т. 116. № 2. – С. 141–147.
6. Гриневский А.О., Барабанов В.Л. Методика обработки гидрогеодинамических данных в целях прогноза землетрясений. Москва: ВСЕГИНГЕО, – 1983. С. 44–47.
7. Добровольский И.Г. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ, – 1984. 188 с.
8. Добровольский И.Г., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений. // В сборнике Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, – 1980. С. 7–43.
9. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры. // Физика Земли. – 1993. – № 8. – С. 58–69.

10. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, – 2015. 327 с.
11. Киссин И.Г. Чувствительные зоны земной коры и амплитуда аномалий предвестников землетрясений. // Доклады Академии наук СССР. – 1985. – Т. 218. № 2. – С. 304–307.
12. Латынина Л.А. Гидрогеологические эффекты в деформациях земной поверхности. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1981. – № 11. – С. 10–16.
13. Пашаян Р.А. Исследования гидрогеодинамических эффектов, как предвестников землетрясений на территории Армении: дисс. на соиск. уч. степ. канд. мин. наук. – Ереван: НАН РА, – 1998. 163 с.
14. Пашаян Р.А., Саргсян А.З. Гидрогеодеформационная характеристика земной коры региона Армении (2002-2004 гг.). // Известия НАН РА. Науки о Земле. – 2006. – Т. LXX. № 3. – С. 30–36.
15. Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ. // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. – 2009. – № 13. – С. 107–122.
16. Самарина В.С. Гидрогеохимия. Л.: Издательство Ленинградского университета, – 1977. 353 с.
17. Султанходжаев А.Н. Основы гидрогеосейсмологии. Ташкент. – 2006. 164 с.
18. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavoro-Caucasian region. // EGU General Assembly. – 2023. – Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-16905. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-16905.
19. Kopylova G.N., Boldina S.V. Seismohydrogeological phenomena as an Earthquakes' Trigger Impact on Groundwater (by the example of the Wells of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site, Kamchatka Peninsula). // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2023. – Vol. 59. No. 3. – pp. 405–420. DOI: 10.1134/S1069351323030072.
20. Milyukov V.K., Kravchyuk V.K., Mironov A.P., Latynina L.A. Deformation Processes in the Litosphere Related to the Nonuniformity of the Earth's Rotation. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2011. – Vol. 47. Issue 3. – pp. 246–258.
21. Rubinin G.V., Pashayan R.A., Harutyunyan L.V. Changes in the concentrations of chloride ion in the mineral waters of central Armenia. // Academy of Sciences of RA. Electronic journal of Natural Sciences. – 2017. – Vol. 28. Issue 1. – pp. 21–24.
22. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. // Lecture Notes in Earth Sciences. – 2010. – Vol. 114. Berlin. Springer. 249 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.

## References

1. Aslanyan A.T. Regional geology of Armenia. Yerevan. Aypetrat. 1968. 408 p. (In Russ.)
2. Barsukov V.L., Belyaev A.A. Geochemical methods for earthquake prediction. Moscow. Nauka. 1992. 213 p. (In Russ.)
3. Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan M.A., Mkrtchyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ( $M_w = 7.8$ ). Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. № 4. pp. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004. (In Russ.)
4. Geology of the Armenian SSR. Vol. IX. Mineral waters. Ed. Mkrtchyan S.S. Yerevan. The Academy of Sciences of the Armenian SSR. 1969. 505 p. (In Russ.)
5. Grigoryan S.V., Pashayan R.A., Harutyunyan L.V. Results of hydrogeological monitoring of geodynamic processes in the territory of Armenia. Doklady NAS RA. 2016. Vol. 116. No. 2. pp. 141–147. (In Russ.)
6. Grinevsky A.O., Barabanov V.L. Methodology for processing hydrogeodynamic data for earthquake prediction. Moscow. VSEGINGEO. 1983. pp. 44–47. (In Russ.)

7. Dobrovolsky I.G. Mechanics of tectonic earthquake preparation. Moscow. IPE. 1984. 188 p. (In Russ.)
8. Dobrovolsky I.G., Zubkov S.I., Myachkin V.I. On assessing the size of the zone of manifestation of earthquake precursors. In: Modeling of earthquake precursors. Moscow. Nauka. 1980. pp. 7–43. (In Russ.)
9. Kissin I.G. Hydrogeological monitoring of the Earth's crust. Physics of the Earth. 1993. No. 8. pp. 58–69. (In Russ.)
10. Kissin I.G. Fluids in the Earth's crust. Geophysical and tectonic aspects. Moscow. Nauka. 2015. 327 p. (In Russ.)
11. Kissin I.G. Sensitive zones of the Earth's crust and the amplitude of earthquake precursor anomalies. Doklady Earth Sciences USSR. 1985. Vol. 218. No. 2. pp. 304–307. (In Russ.)
12. Latynina L.A. Hydrogeological effects in deformations of the Earth's surface. In: Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth. 1981. No. 11. pp. 10–16. (In Russ.)
13. Pashayan R.A. Research of hydrogeodynamic effects as precursors of earthquakes on the territory of Armenia: Ph.D. dissertation. Yerevan. NAS RA. 1998. 163 p. (In Russ.)
14. Pashayan R.A., Sargsyan A.Z. Hydrogeodeformation characteristics of the Earth's crust in the Armenian region (2002-2004). Izvestiya NAS RA. Earth Sciences. 2006. Vol. LLX. No. 3. pp. 30–36. (In Russ.)
15. Ryabinin G.V., Khatkevich Yu.M. Hydrogeochemical effects preceding strong earthquakes in Kamchatka. Identification algorithm and morphological analysis. Bulletin of KRAUNC. Earth Science Series. 2009. No. 13. p. 107-122. (In Russ.)
16. Samarina V.S. Hydrogeochemistry. Leningrad. Leningrad University Press. 1977. 353 p. (In Russ.)
17. Sultankhojaev A.N. Fundamentals of hydrogeoseismology. Tashkent. 2006. 164 p. (In Russ.)
18. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. EGU General Assembly. 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-16905. DOI: 10.05194/egusphere-egu23-16905.
19. Kopylova G.N., Boldina S.V. Seismohydrogeological phenomena as an Earthquakes' Trigger Impact on Groundwater (by the example of the Wells of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site, Kamchatka Peninsula). Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2023. Vol. 59. No. 3. pp. 405–420. DOI: 10.1134/S1069351323030072.
20. Milyukov V.K., Kravchyuk V.K., Mironov A.P., Latynina L.A. Deformation Processes in the Litosphere Related to the Nonuniformity of the Earth's Rotation. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2011. Vol. 47. Issue 3. pp. 246–258.
21. Rubinin G.V., Pashayan R.A., Harutyunyan L.V. Changes in the concentrations of chloride ion in the mineral waters of central Armenia. Academy of Sciences of RA. Electronic journal of Natural Sciences. 2017. Vol. 28. Issue 1. pp. 21–24.
22. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Lecture Notes in Earth Sciences. 2010. Vol. 114. Berlin. Springer. 249 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.

УДК 551.2.03

DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

Оригинальная статья

## Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона

В.Б. Свалова <sup>1,2</sup>, В.Б. Заалишвили <sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия,  
101000, г. Москва, Уланский пер., 13, стр. 2,  
e-mail: v-svalova@mail.ru;

<sup>3</sup> Северо-Осетинский государственный университет  
им. К.Л. Хетагурова, Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина 44-46

Статья поступила: 19.01.2024, доработана: 22.03.2024, принята к публикации: 25.03.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Активизация природных катаклизмов в мире требует разработки новых подходов к изучению геологических процессов, в частности, на границах литосферных плит. Геодинамика исследуемого региона определяется столкновением Евразийской и Аравийской литосферных плит, а также сложной историей развития Альпийско-Гималайского пояса и прилегающих территорий. Землетрясение магнитудой 7,8 произошло на юго-востоке Турции и северо-западе Сирии 6 февраля 2023 года. Это самое смертоносное стихийное бедствие в современной истории Турции. Землетрясения (включая второе событие 6 февраля 2023 года магнитудой 7,7) нанесли ущерб на сумму более 100 миллиардов долларов США. **Целью исследования** является снижение геоэкологического риска опасных природных и природно-техногенных процессов в литосфере и выявление их связей с глубинной геодинамикой. **Методы исследования.** Построение геодинамических моделей глубинного строения районов стихийных бедствий является важным вкладом в изучение активных континентальных окраин и необходимо для прогнозирования землетрясений, оценки геоэкологических рисков и разработки соответствующих мероприятий, что требует анализа всех имеющихся геолого-геофизических данных и постановки и решения задач механико-математического моделирования. **Результаты исследования.** Построены геодинамические модели районов с опасными природными процессами с целью смягчения последствий стихийных бедствий и катастроф. На основе анализа геолого-геофизических данных, сейсмотомографии и метода аналогий можно прогнозировать сильное землетрясение в регионе Стамбула через несколько лет (1–10 лет). На той же основе делается заключение, что, если сильное землетрясение в регионе Восточно-Анатолийского разлома не произойдет через 1–2 года, то оно случится только через 100 лет.

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

**Для цитирования:** Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 77-89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

Original paper

# Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region

V.B. Svalova <sup>1,2</sup>, V.B. Zaalishvili <sup>1,3</sup>

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

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

<sup>3</sup> North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, 44-46 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation

Received: 19.01.2024, revised: 22.03.2024, accepted: 25.03.2024

**Abstract: Relevance.** The intensification of natural disasters in the world requires the development of new approaches to the study of geological processes, in particular, at the boundaries of lithospheric plates. The geodynamics of the region is determined by the collision of the Eurasian and Arabian lithospheric plates, as well as the complex history of the development of the Alpine-Himalayan belt and adjacent territories. A magnitude 7.8 earthquake struck southeastern Turkey and northwestern Syria on February 6, 2023. It is the deadliest natural disaster in Turkey's modern history (46,100 in Turkey and more than 6,700 in Syria). The earthquakes caused more than US\$100 billion in damage. **The aim of the study is** to mitigate the geoeological risk of dangerous natural-technological processes in the lithosphere and identify their connections with deep geodynamics. **Research methods.** The construction of geodynamic models of the deep structure of natural disaster areas is an important contribution to the study of active continental margins and is necessary for predicting earthquakes, assessing geo-ecological risks and developing appropriate measures, which requires the analysis of all available geological and geophysical data and the formulation and solution of mechanical and mathematical modeling problems. **Results.** Geodynamic models of areas with hazardous natural processes have been constructed in order to mitigate the consequences of natural disasters. Based on the analysis of geological and geophysical data, seismic tomography and the method of analogies, it is possible to predict a strong earthquake in the Istanbul region in a few years (1-10 years). On the same basis, it is concluded that if a strong earthquake in the East Anatolian Fault region does not occur in 1-2 years, then it will occur only in 100 years.

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

**For citation:** Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 77-89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

## Введение

Активизация природных катастроф в мире требует разработки новых подходов к исследованию геологических процессов, в частности, на границах литосферных плит, характеризующихся землетрясениями, повышенной сейсмичностью, вулканизмом, оползневыми процессами, цунами и другими опасными природными процессами и катастрофами. Построение геодинамических моделей глубинного строения для регионов с опасными природными процессами и катастрофами вносит большой вклад в изучение глубинной геодинамики активных континентальных

окраин, необходимый для оценки геоэкологических рисков и подготовки действий населения на случай природных бедствий и катастроф.

Одной из основных фундаментальных и прикладных проблем современной науки является прогноз, предупреждение и снижение геоэкологического риска опасных природных и природно-техногенных процессов в литосфере и выявление их связей с глубинной геодинамикой.

На базе геодинамических моделей строится прогноз напряженно-деформированного состояния литосферы для регионов с опасными природными процессами, стихийными бедствиями и катастрофами и разрабатывается система комплексного геоэкологического мониторинга [Гончаров и др., 2015; Свалова, 2019].

### Турецко-сирийское землетрясение 2023 г.

Землетрясение магнитудой 7,8 произошло на юго-востоке Турции и северо-западе Сирии 6 февраля 2023 года в 04:17 по местному времени. Эпицентр находился в 37 км к западу-северо-западу от Газиантепа. По данным Геологической службы США, гипоцентр землетрясения находился на глубине 10,0 км. За этим землетрясением последовало землетрясение магнитудой 7,7 в 13:24. Это землетрясение произошло в 95 км к северо-северо-востоку от первого.

Землетрясение магнитудой 7,8 является крупнейшим в Турции после землетрясения той же магнитуды в Эрзинджане 1939 года и вторым по силе землетрясением в стране после землетрясения 1668 года в Северной Анатолии. Были нанесены обширные повреждения на площади около 350 000 км<sup>2</sup>. Пострадали 14 миллионов человек (16 процентов населения Турции). Около 1,5 млн человек остались без крова.

Подтверждено более 52 800 смертей: более 46 100 в Турции и более 6 700 в Сирии. Это самое смертоносное стихийное бедствие в современной истории Турции. Землетрясения причинили ущерб на сумму более 100 миллиардов долларов США.

Место землетрясения связано с тройным сочленением Анатолийской, Аравийской и Африканской плит (рис. 1, 2).

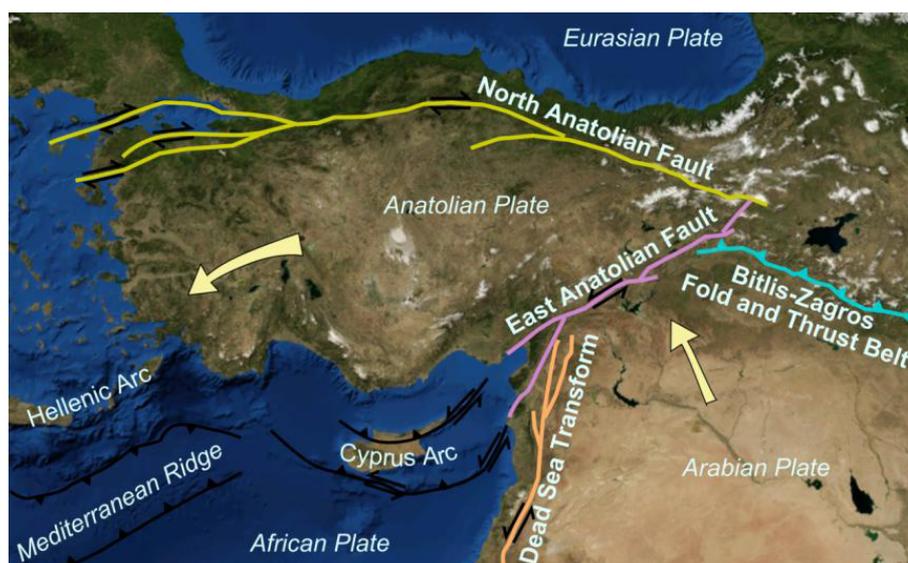


Рис. 1. Крупнейшие системы активных разломов Ближнего Востока: Северо-Анатолийская – Загросская и Леванто-Восточно-Анатолийская. (USGS) / Fig. 1. The largest systems of active faults in the Middle East: North Anatolian – Zagros and Levant – East Anatolian. (USGS)

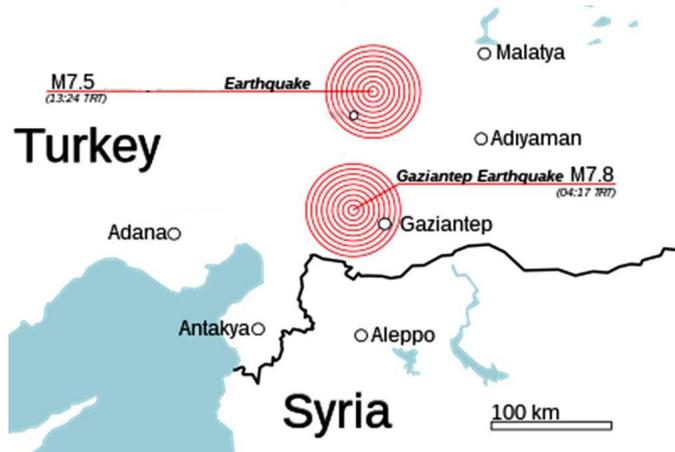


Рис. 2. Расположение эпицентров первого и второго землетрясений. (USGS) /  
Fig. 2. Epicenter locations of the first and second major earthquakes. (USGS)

Восточно-Анатолийский разлом представляет собой левосторонний трансформный разлом протяженностью 700 км с северо-востока на юго-запад и образует границу между Анатолийской и Аравийской плитами. Этот внутриконтинентальный трансформный разлом является вторым по величине разломом в Турции.

Скорость подвижек уменьшается с востока на запад от 10 мм в год до 1–4 мм в год. К разлому приурочены сильные землетрясения в 1789 г. (M 7,2), 1795 г. (M 7,0), 1872 г. (M 7,2), 1874 г. (M 7,1), 1875 г. (M 6,7), 1893 г. (M 7,1) и 2020 г. (M 6,8) (рис. 3). С 1905 г. здесь произошло только пять землетрясений (1905, 1945, 1986, 1998) магнитудой 6,0 и более. Все эти землетрясения произошли вдоль Восточно-Анатолийского разлома или в его окрестностях.

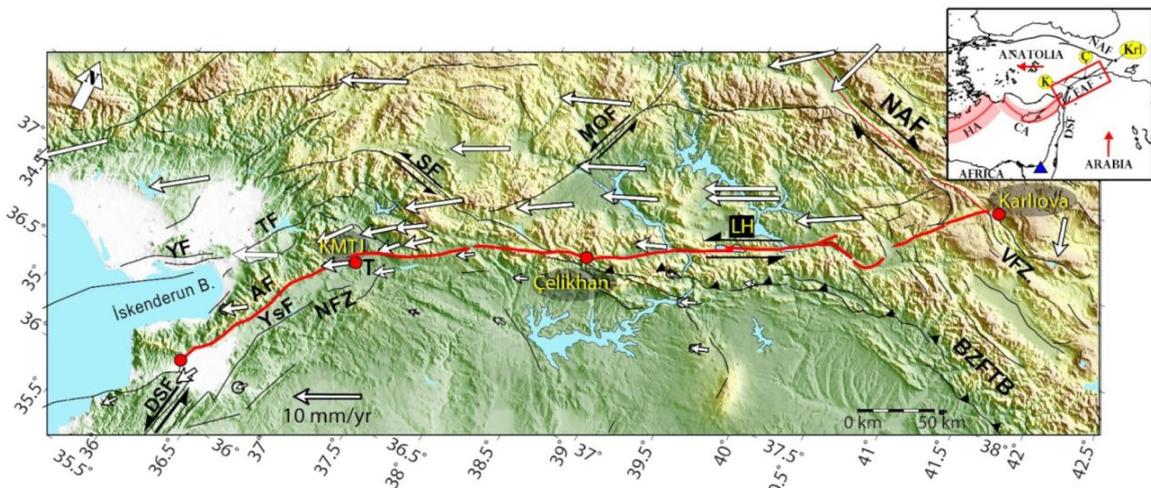


Рис. 3а. Тектоническая обстановка в районе Восточно-Анатолийского разлома (обозначена ярко-красной линией). Черные стрелки вдоль оси указывают на относительное движение стенок разлома. Белые стрелки указывают скорости движения в фиксированной системе отсчета, определенные с помощью GPS (длина стрелок указывает на величину скорости) [Güvercin et al., 2022] /

Fig. 3a. Tectonic setting in the region of the East Anatolian Fault (indicated by a bright red line). The black arrows along the axis indicate the relative motion of the fault walls. The white arrows indicate the speeds of movement in a fixed frame of reference, determined using GPS (the length of the arrows indicates the magnitude of the speed) [Güvercin et al., 2022]

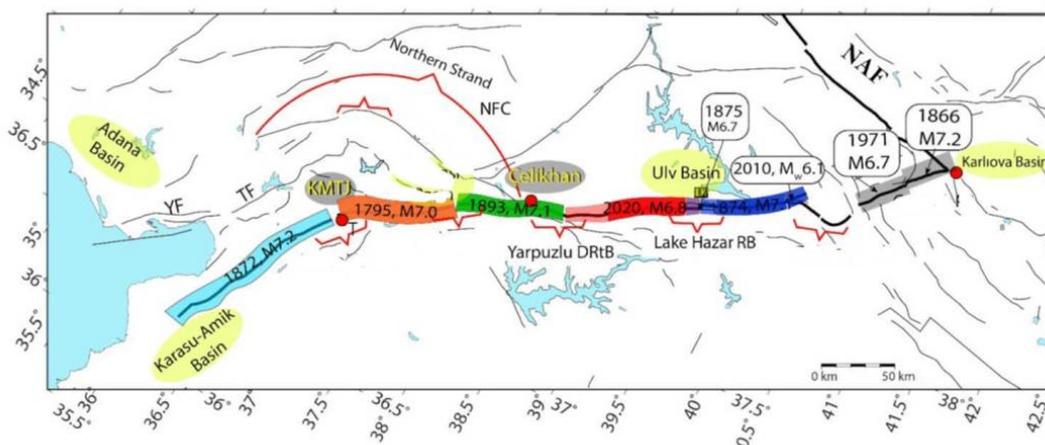


Рис. 3б. Участки Восточно-Анатолийского разлома с указанием дат и эпицентров крупнейших землетрясений до события 6 февраля 2023 г. NAF – Северо-Анатолийский разлом [Güvercin et al., 2022] /

Fig. 3b. Sites on the East Anatolian Fault, showing the dates and epicenters of the largest earthquakes before the event of February 6, 2023. NAF – North Anatolian Fault [Güvercin et al., 2022]

Северо-Анатолийский разлом, первый по величине сдвиговый разлом в Турции, вызвал 11 крупных землетрясений в 20 веке (рис. 4) [Güvercin et al., 2022].

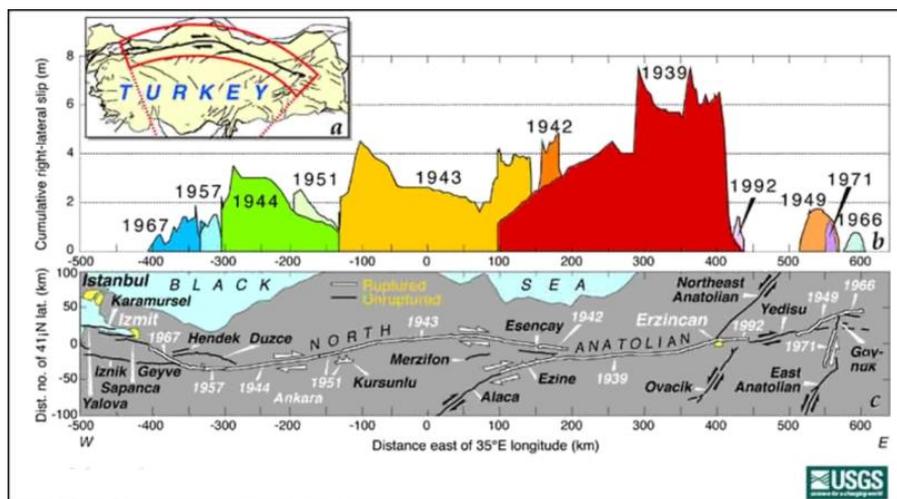


Рис. 4. Активные разломы в Турции, Северо-Анатолийский разлом выделен жирным шрифтом. GPS-наблюдения установили скорость смещения  $24 \pm 4$  мм/год по Северо-Анатолийскому разлому. (b) Кумулятивный правосторонний сдвиг, связанный с землетрясениями с магнитудой  $M \geq 6,7$ ; последовательность разломов изменяется от теплых к холодным цветам.

Проскальзывание вдоль толчков 1949, 1966 и 1971 годов является приблизительным.

(c) Область, отмеченная сплошной красной линией на (a), проецируется относительно Анатолии-Евразии [Ross et al., 1997] /

Fig.4. Active faults in Turkey with the North Anatolian fault in bold. GPS observations establish a  $24 \pm 4$  mm/yr deep slip rate on the North Anatolian fault. (b) Cumulative right-lateral slip associated with  $M \geq 6,7$  earthquakes; the sequence ruptured from warm to cool colors. Slip in the 1949, 1966, and 1971 shocks is approximate. (c) The region inscribed by the solid red line in (a) is projected relative to the Anatolia-Eurasia rotation pole, so that a transform fault would strike due east-west; the North Anatolian fault is seen to deviate less than 40 km from being a simple right-lateral transform [Ross et al., 1997]

Турция расположена в сейсмоопасной зоне [Duman et al., 2018], ее территорию пересекает активная Северо-Анатолийская зона разломов (САЗР), которая разделяет Евразийскую и Анатолийскую тектонические плиты, скользящие относительно друг друга со скоростью 2 см в год. Вдоль нее постоянно происходят землетрясения, и активность постепенно смещается все дальше и дальше на запад, в Мраморное море, в сторону Стамбула.

Сегмент этой зоны, примыкающий к городу, не активировался 250 лет (рис. 5), и это дает два следующих варианта развития событий.

В первом случае происходит постоянное и малоамплитудное скольжение плит относительно друг друга и снимается тектоническое напряжение в виде «тихого землетрясения». Во втором случае отсутствие подвижки означает накопление напряжения в зоне разлома, которое при достижении критического значения может быть снято резким толчком огромной силы. И это означает неминуемую катастрофу для Стамбула, города с населением 14 миллионов человек. Поэтому изучение и мониторинг состояния САЗР жизненно важны для Турции.

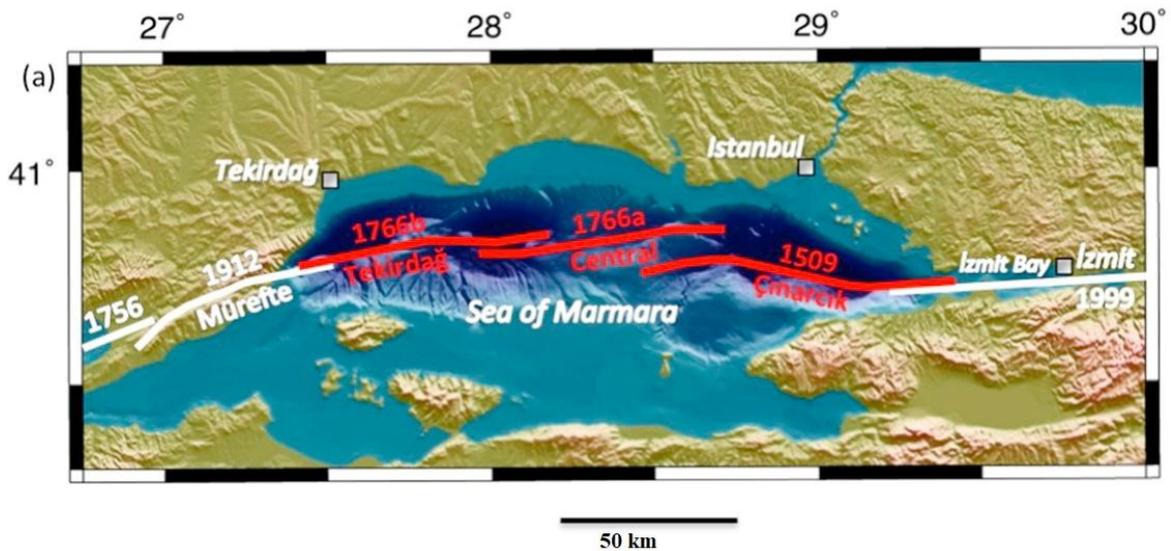


Рис. 5. Мраморное море. Красная линия – разлом, бездействующий с 1766 г. (USGS) /

Fig. 5. Sea of Marmara. Red line – fault, inactive since 1766. (USGS)

### Методика исследований. Анализ геолого-геофизических данных и геодинамические модели опасных природных процессов

Геолого-геофизические и сейсмотомографические исследования позволяют связать сложную геодинамику и напряженно-деформированное состояние района с подъемом мантийного потока от границы ядра [Becker, Boschi, 2002; Ershov, Nikishin, 2004; Bijwaard et al., 1998; Grand et al., 1997; Zhao, 2001; Zhou, 1996; Koulikov et al., 2012; Mertoglu et al., 2016]. (Рис. 6а). Этот апвеллинг огромного мантийного потока подтверждается магматизмом и базальтовым вулканизмом [Ershov, Nikishin, 2004; Sharkov, Lebedev, 2021].

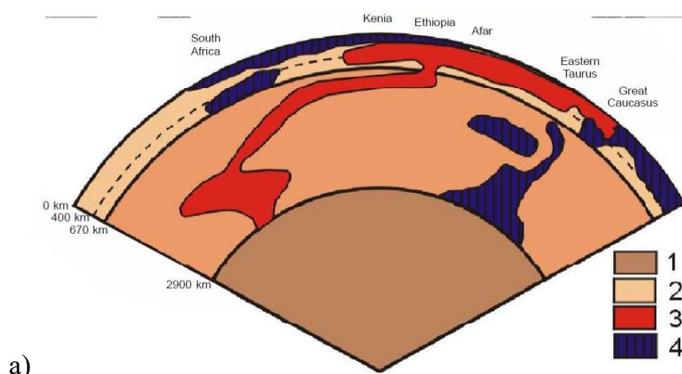


Рис. 6а. Схематический сейсотомографический разрез мантии вдоль 120-градусного сегмента большой окружности, проходящей через точку с координатами 0° с.ш. и 35° в.д. по азимуту 10°, 1 – ядро Земли; 2 – мантия; 3 – горячие низкоскоростные зоны; 4 – холодные зоны высоких скоростей [Bijwaard et al., 1998; Zhou, 1996] /

Fig. 6a. Schematic seismotomographic section across the mantle along 120° segment of the great circle passing through the point with coordinates 0° N and 35° E at azimuth 10°, 1 – the Earth core; 2 – mantle; 3 – hot low-velocity zones; 4 – cold high-velocity zones [Bijwaard et al., 1998; Zhou, 1996]

Поверхностные скорости необходимо анализировать из разных источников [Милюков и др., 2015; Несмеянов, 2004; Рогожин и др., 2015; Уломов и др., 2007; Хаин и др., 2005; Stern, Johnson, 2010]. Для целей механико-математического моделирования вертикальные и горизонтальные скорости необходимо оценивать детально и в больших масштабах в зависимости от области моделирования.

Сейсотомографические данные подтверждают существование литосферного окна под восточной Анатolieй, через которое поднимается горячий материал астеносферы, и это помогает прояснить глубинное строение под восточной Анатolieй в районе Восточно-Анатолийского разлома [Medved et al., 2021].

Сейсотомографический разрез [Medved et al., 2021] был выполнен за год до сильных землетрясений в Восточно-Анатолийском разломе и, по всей видимости, демонстрирует очаг землетрясения. Было бы полезно проанализировать имеющиеся данные более детально.

Важно отметить, что на глубине 50 км зона Битлиса, маркирующая коллизия Евразийской и Аравийской плит, характеризуется выпуклостью расплавленного слоя к Кавказу, что говорит о направлении движения вещества.

Поле скоростей Северного Кавказа характеризуется горизонтальным смещением в северо-восточном направлении со скоростью 26–28 мм/год. Относительно неподвижной Евразии выявлено общее сжатие региона со скоростью 1–2 мм/год, что является источником современной геологической и сейсмической активности в приграничном районе Кавказа и Восточно-Европейской платформы.

Современные вертикальные движения Северо-Кавказского региона характеризуются небольшими вертикальными подъемами порядка 2,5 мм/год в низменной части Осетии, самыми высокими для региона скоростями подъема около 3,5–4,5 мм/год в горной части Северного Кавказа и умеренным устойчивым подъемом 2,9 мм/год в северной части северного склона Большого Кавказа [Милюков и др., 2015] (рис. 6б).

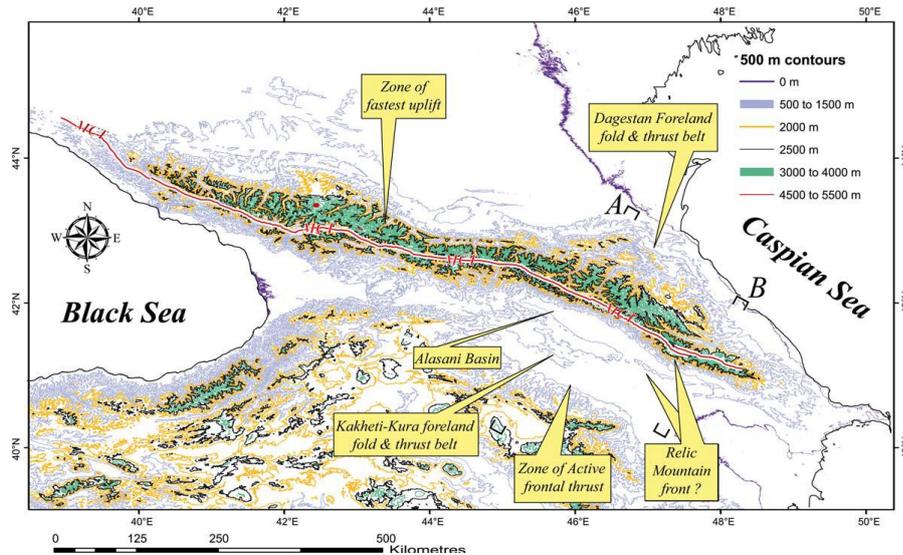


Рис. 6б. Кавказские разломы и топографическая карта. Зона наивысшего рельефа (зеленый цвет) и зона быстрого подъема [Sosson et al., 2010] /  
 Fig. 6b. Caucasus faults and topography map. The zone of highest topography (green colour) and zone of fastest uplift [Sosson et al., 2010]

На основе геодинамического и сейсмического анализа Кавказского региона делается среднесрочный прогноз сильных землетрясений. Так в 2007 г. Уломов сделал прогноз сильного землетрясения интенсивностью 8–9 баллов на северо-востоке Кавказа с наиболее вероятным интервалом времени возникновения в 2013–2036 гг. [Уломов и др., 2007] (рис. 7).

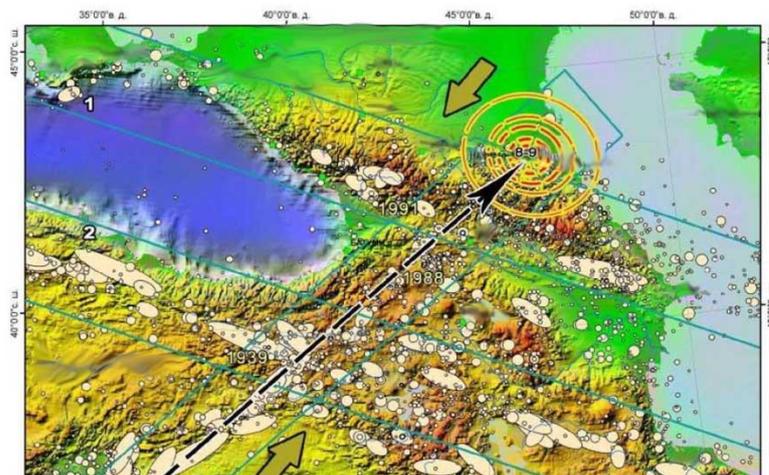


Рис. 7. Фрагмент карты Иран–Кавказ–Анатолийского региона. Направление миграции очагов землетрясений вдоль профиля Кипр–Кавказ указано пунктирной стрелкой. Крупные стрелки иллюстрируют направления взаимодействия Аравийской и Евразийской литосферных плит. Датой помечены относительно недавние очень крупные землетрясения в Турции (Эрзинжан, 1939), Армении (Спитак, 1988) и Грузии (Рачинское, 1991). Условные изосейсты на востоке Северного Кавказа иллюстрируют ожидавшийся сейсмический эффект интенсивностью 8–9 баллов [Уломов и др., 2007] /

Fig. 7. Fragment of the map of Iran-Caucasus-Anatolian region. Direction of migration of earthquake sources along the Cyprus-Caucasus profile indicated by the dotted arrow. Large arrows illustrate the directions of mutual actions of the Arabian and Eurasian lithospheric plates. The dates are marked relative to but recent very large earthquakes in Turkey (Erzincan, 1939), Armenia (Spitak, 1988) and Georgia (Racha-Java, 1991). Conditional isoseists in the east of the Northern Caucasus illustrate the expected seismic effect with an intensity of 8–9 points [Ulomov et al., 2007]

## Результаты исследования

Геодинамическая модель Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона определяется мантийным потоком, поднимающимся с поверхности ядра и распространяющимся под литосферой, создавая сложные поверхностные скорости в Анатолии на запад, в Аравийской плите на восток и на Кавказе на север. Этот поток будет продолжать перемещать вещество вдоль Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов.

По всей видимости, цепочки землетрясений трассируют распространение глубинных потоков астеносферы. Ключом к решению проблемы может стать карта активных и сейсмогенных разломов как маркеров областей максимальных напряжений и нарушения пределов прочности вещества в литосфере.

Существует разная частота сильных землетрясений вдоль разломов, что объясняется различной толщиной коры и различной реологией геологической среды разломов. Глубина границы Мохо Восточно-Анатолийского разлома около 40 км, а Северо-Анатолийского около 50 км [Güvercin et al., 2022]. Вдоль Северо-Анатолийского разлома сильные землетрясения происходят каждые 1–10 лет (1939, 1942, 1943, 1944, 1953, 1957, 1966, 1967, 1971, 1992, 1999) с расстоянием между гипоцентрами около 100 км с направлением на запад (рис. 4) [Allen, 1969; Ross et al., 1997].

Землетрясение 1999 года в Измите было землетрясением магнитудой 7,6, произошедшим в провинции Коджаэли в Турции 17 августа 1999 года. В результате погибло от 17 127 до 18 373 человек, ущерб оценивается в 6,5 миллиардов долларов США. Оно было названо в связи с близостью землетрясения к городу Измит. Землетрясение произошло в 03:01 по местному времени на небольшой глубине 15 км. Землетрясение длилось 37 секунд и широко известно как одно из самых смертоносных стихийных бедствий в современной истории Турции.

Землетрясение 1999 года было частью сейсмической последовательности вдоль Северо-Анатолийского разлома, которая началась в 1939 году, вызвав сильные землетрясения, которые постепенно перемещались с востока на запад в течение 60 лет. Необходимо отметить, что именно указанное землетрясение способствовало установлению так называемого налога на землетрясение, направленного на оказание помощи пострадавшим от землетрясения.

В связи с тем, что Измитское землетрясение 1999 г. произошло в 80 км к востоку от Стамбула, ожидать землетрясения в районе Стамбула, учитывая рассмотренную выше последовательность событий, можно через несколько лет (1–10 лет). Таким образом, на основе способа аналогий с высокой вероятностью прогнозируется сильное землетрясение в районе Стамбула через несколько лет (1–10 лет). Отсюда, Стамбул можно считать «горячим пятном» сейсмического риска.

Регион наибольшей сейсмичности в Турции (красный цвет на рис. 8) можно рассматривать как «горячую зону» сейсмического риска, а крупные города как – «горячие пятна» сейсмического риска. Стамбул – «горячее пятно» сейсмического риска (рис. 8). В любом случае, на наш взгляд, необходимо проверить и укрепить здания и сооружения в городах из «горячей зоны» [Svalova, 2018; Svalova et al., 2019].

Анализ данных показывает, что Восточно-Анатолийский разлом производил сильные землетрясения 1789 (M 7.2), 1795 (M 7.0), 1872 (M 7.2), 1874 (M 7.1), 1875 (M 6.7), 1893 (M 7.1), 2020 (M 6.8), 2023 г. (M 7.8, M 7.7) с повторяемостью групп (1790 – 1880 – 2020) около 100 лет. При этом внутри групп, как правило, происхо-

дят 2–4 близких по времени сильных землетрясения. Отсюда, можно ожидать, что сильное землетрясение в пределах Восточно-Анатолийского нарушения или разлома, если не произойдет через 1–2 года, то с большой вероятностью произойдет только через 100 лет.

Необходимо отметить определенную закономерность в распределении землетрясений в региональных нарушениях (разломах), отражающую реологическое взаимодействие глубинных мантийных потоков и прочностных свойств пород в областях очагов землетрясений в литосфере. Причем эти закономерности по-разному проявляются на Северо-Анатолийском и Восточно-Анатолийском разломах, что объясняется различной толщиной коры в областях разломов и различными свойствами глубинных мантийных потоков (скорости и направления движения).

Таким образом, анализ результатов исследований позволяет дать объяснение механизма формирования цепочек и групп землетрясений вследствие глубинных мантийных потоков, имеющих большую силу и длительность.

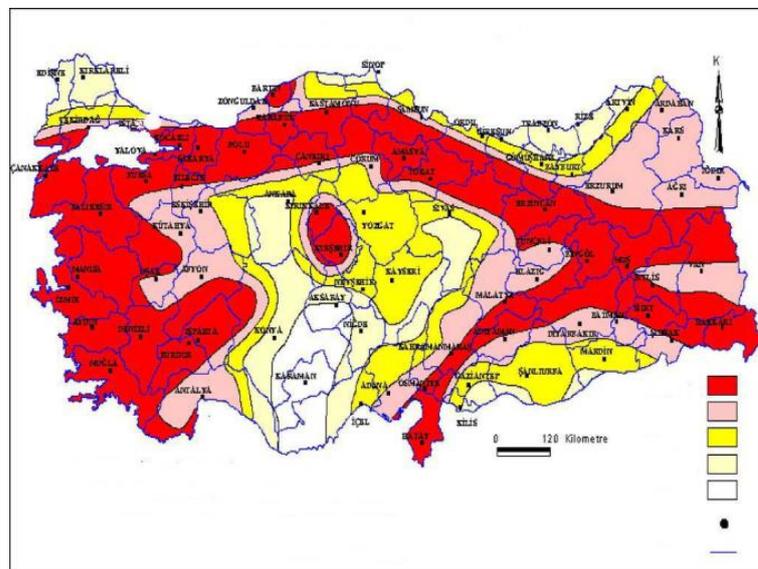


Рис. 8. Карта зон землетрясений Турции. Стамбул как «горячее пятно» риска землетрясений (белый круг на северо-западе страны). «Горячая зона» опасности землетрясений (красный цвет) в Турции. Основа: Карта зон землетрясений. Отдел исследования землетрясений.

Главное управление по делам стихийных бедствий, Турция (1997). Уровень сейсмической опасности: красный – очень высокий, розовый – высокий, желтый – средний, светло-желтый – низкий, белый – очень низкий /

Fig. 8. Map of earthquake zones in Turkey. Istanbul as an earthquake risk hotspot (white circle in the North-West). Earthquake hazard hot zone (red) in Turkey. Base: Map of earthquake zones. Department of Earthquake Research. General Directorate of Disaster Affairs, Turkey.

To the right of the legend is the degree of seismic hazards. Red is very high, pink is high, yellow is medium, light yellow is low, white is very low

## Выводы

Геодинамическая модель региона с опасными природными процессами дает возможность делать предположительный среднесрочный прогноз о возможных сильных землетрясениях в регионе. Аналогия с предшествующими землетрясениями свидетельствует о развитии цепочки землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома, которая характеризуется определенным местоположением и временем

активизации. На основе метода аналогий с высокой вероятностью прогнозируется сильное землетрясение в районе Стамбула через несколько лет (1–10 лет).

Сильное землетрясение в регионе Восточно-Анатолийского разлома в 2023 г. не ожидалось и не прогнозировалось и явилось полной неожиданностью. В то же время Восточно-Анатолийский разлом стабильно продуцировал сильные землетрясения в 1789...2023 годах. Можно рассматривать эти сильные землетрясения в виде групп в окрестностях около 1790 года, 1880 года, 2020 года. Повторяемость групп событий соответствует (1790 – 1880 – 2020) экспозиции около 100 лет. При этом внутри групп происходят 2–4 близких по времени сильных землетрясения. Отсюда можно прогнозировать, что сильное землетрясение на Восточно-Анатолийском разломе, если не произойдет в ближайшие несколько лет, то с большей вероятностью произойдет только через 100 лет.

### Литература

1. Гончаров М.А., Короновский Н.В., Разницин Ю.Н. Свалова В.Б. Вклад мантийного диапиризма в процесс формирования новообразованных впадин Средиземноморья и Карибского бассейна и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов. // Геотектоника. – 2015. – № 6. – С. 80–93.
2. Милуков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. // Геотектоника. – 2015. – № 3. – С. 56–65.
3. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, – 2004. 780 с.
4. Рогожин Е.А., Горбатов А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36–49.
5. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 77–93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485.
6. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Л.С. Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // Физика земли. – 2007. – № 7. – С. 31–45.
7. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, – 2005. 560 с.
8. Allen C.R. Active faulting in northern Turkey. California Institute of Technology, California. – 1969. pp. 32–34.
9. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. – 2002. – Vol. 3. Issue 1. – pp. 1–48. DOI: 10.1029/2001GC000168.
10. Ershov A.V., Nikishin A.M. Recent geodynamics of the Caucasus-Arabia-East Africa region. // Geotectonics. – 2004. – No. 2. – pp. 55–72.
11. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography. // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Vol. 103. – pp. 30055–30078.
12. Duman T.Y. et al. Seismotectonic database of Turkey. // Bulletin of earthquake engineering. – 2018. – Vol. 16. No. 8. – pp. 3277–3316. DOI: 10.1007/s10518-016-9965-9.
13. Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. // GSA Today. – 2019. – Vol. 7. No. 4. – pp. 1–7.
14. Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.Ö., Doğan U., Ergintav S. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault. // Geophysical Journal International. – 2022. – Vol. 230. No. 1. – pp. 50–69.

15. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. // *Solid Earth*. – 2012. – No. 3. – pp. 327–337.
16. Medved I., Koulakov I., Polat G. Crustal structure of the eastern Anatolia region (Turkey) based on seismic tomography. // *Geosciences (Switzerland)*. – 2021. – Vol. 11. No. 2. – pp. 1–12.
17. Mertoglu O., Sakir S., Nilgun B. Geothermal Energy Use, Country Update for Turkey. // *European Geothermal Congress 2016 Strasbourg, France, 19–24 Sept 2016*. – 10 p.
18. Sosson M., Rolland Y., Müller C., Danelian T., Melkonyan R., Kekelia S., Adamia Sh., Babazadeh V., Kangarli T., Avagyan A., Galoyan Gh., Mosar J. Subductions, obduction and collision in the Lesser Caucasus (Armenia, Azerbaijan, Georgia), new insights. // *Geological Society, London, Special Publications*. – 2010. – Vol. 340. No. 1. – pp. 329–352.
19. Sharkov E., Lebedev V. Caucasian-Arabian Segment of Alpine-Himalayan Convergence: an Example of Continental Collision above Mantle Plume. // *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*. V. Svalova (ed.) Springer book: 89082526. – 2021. – pp. 381–390.
20. Ross S. Stein, Aykut A. Barka, James H. Dieterich. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. // *Geophysical Journal International*. – 1997. – Vol. 128. Issue 3. – pp. 594–604. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x.
21. Stern R.J., Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis. // *Earth-Science Reviews*. – 2010. – Vol. 101. – pp. 29–67. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.01.002.
22. Svalova V. (editor). Earthquakes – Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. InTech. – 2018. 334 p. DOI: 10.5772/intechopen.71298.
23. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2019. – Vol. 9. No. 2. – pp. 109–127. DOI: 10.23671/VNC.2019.2.31981.
24. Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2001. – Vol. 192. Issue 3. – pp. 423–436.
25. Zhou H. A high-resolution P wave model for the top 1200 km of the mantle. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 1996. – Vol. 101. Issue 12. – pp. 27791–27810. DOI: 10.1029/96JB02487.

## References

1. Goncharov M.A., Koronovsky N.V., Raznitsin Yu.N. Svalova V.B. The contribution of mantle diapirism to the process of formation of the newly formed basins of the Mediterranean and the Caribbean and the surrounding centrifugal-vergent folded-cover orogens. *Geotectonics*. 2015. No. 6. pp. 80–93. (In Russ.)
2. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. *Geotectonics*. 2015. No. 3. pp. 56–65. (In Russ.)
3. Nesmeyanov S.A. *Engineering geotectonics*. Moscow. Nauka. 2004. 780 p. (In Russ.)
4. Rogozhin E.A., Gorbaticov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. Structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)
5. Svalova V.B. Geothermy and seismicity of the Caucasus region and the inverse problem of geodynamics. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77–93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485. (In Russ.)
6. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. Towards the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Physics of the Earth*. 2007. No. 7. pp. 31–45. (In Russ.)

7. Khain V.E., Lomize M.G. Geotectonics with the basics of geodynamics. Moscow. KDU. 2005. 560 p. (In Russ.)
8. Allen C.R. Active faulting in northern Turkey. California Institute of Technology, California. 1969. pp. 32–34.
9. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2002. Vol. 3. Issue 1. pp. 1–48. DOI: 10.1029/2001GC000168.
10. Ershov A.V., Nikishin A.M. Recent geodynamics of the Caucasus-Arabia-East Africa region. *Geotectonics*. 2004. No. 2. pp. 55–72.
11. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103. pp. 30055–30078.
12. Duman T.Y. et al. Seismotectonic database of Turkey. *Bulletin of earthquake engineering*. 2018. Vol. 16. No. 8. pp. 3277–3316. DOI: 10.1007/s10518-016-9965-9.
13. Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. *GSA Today*. 2019. Vol. 7. No. 4. pp. 1–7.
14. Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.Ö., Doğan U., Ergintav S. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault. *Geophysical Journal International*. 2022. Vol. 230. No. 1. pp. 50–69.
15. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. *Solid Earth*. 2012. No. 3. pp. 327–337.
16. Medved I., Koulakov I., Polat G. Crustal structure of the eastern Anatolia region (Turkey) based on seismic tomography. *Geosciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 1–12.
17. Mertoglu O., Sakir S., Nilgun B. Geothermal Energy Use, Country Update for Turkey. European Geothermal Congress 2016 Strasbourg, France, 19–24 Sept 2016. 10 p.
18. Sosson M., Rolland Y., Müller C., Danelian T., Melkonyan R., Kekelia S., Adamia Sh., Babazadeh V., Kangarli T., Avagyan A., Galoyan Gh., Mosar J. Subductions, obduction and collision in the Lesser Caucasus (Armenia, Azerbaijan, Georgia), new insights. *Geological Society, London, Special Publications*. 2010. Vol. 340. No. 1. pp. 329–352.
19. Sharkov E., Lebedev V. Caucasian-Arabian Segment of Alpine-Himalayan Convergence: an Example of Continental Collision above Mantle Plume. *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*. V. Svalova (ed.) Springer book: 89082526. 2021. pp. 381–390.
20. Ross S. Stein, Aykut A. Barka, James H. Dieterich. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 128. Issue 3. pp. 594–604. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x.
21. Stern R.J., Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis. *Earth-Science Reviews*. 2010. Vol. 101. pp. 29–67. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.01.002.
22. Svalova V. (editor). Earthquakes – Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. InTech. 2018. 334 p. DOI: 10.5772/intechopen.71298.
23. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 2. pp. 109–127. DOI: 10.23671/VNC.2019.2.31981.
24. Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. Vol. 192. Issue 3. pp. 423–436.
25. Zhou H. A high-resolution P wave model for the top 1200 km of the mantle. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1996. Vol. 101. Issue 12. pp. 27791–27810. DOI: 10.1029/96JB02487.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007

Оригинальная статья

## Эмпирические модели для вероятностных оценок спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях

Ю.К. Чернов 

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

Статья поступила: 14.03.2024, доработана: 11.04.2024, принята к публикации: 15.04.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В последнее время появились новые данные, указывающие на значительную вариабельность соотношений между спектрами колебаний «мягких» и «твердых» грунтов и их зависимость от сочетания таких факторов как магнитуда землетрясения, расстояние до очага и частота спектральных составляющих. Но эти оценки имеют предварительный характер и должны уточняться. Поэтому настоящие исследования, направленные на решение данной задачи, представляются актуальными. **Цель исследований.** Совершенствование моделей для вероятностного описания движений разных типов грунтов во время землетрясений. **Объект исследований.** Эмпирические функции затухания с расстоянием спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях. **Методы исследования.** Комплексный анализ 3472-х инструментально зарегистрированных спектров землетрясений разной величины и удаленности, результатов макросейсмических обследований 75-ти сильных землетрясений в разных районах мира, а также 24-х известных зависимостей макросейсмической интенсивности сотрясений от магнитуды землетрясения ( $M$ ) и расстояния до очага ( $D$ ). Результирующие функции затухания спектров с расстоянием строились методом подбора в виде полиномов, оптимальным образом аппроксимирующих весь объем данных. Все оценки сделаны отдельно для землетрясений разных магнитуд, частот спектральных составляющих ( $f$ ) и отдельно для «мягких» и «твердых» грунтов. Разработанные модели тестировались на предмет их реалистичности и надежности. **Результаты исследования.** Уточненные варианты зависимостей наиболее вероятных уровней спектральной плотности Фурье  $|S|(M,D,f)$  колебаний «мягких» и «твердых» грунтов в целом подтвердили общий характер и структуру зависимостей, установленных на предварительном этапе. Количественные же параметры этих зависимостей при различных сочетаниях  $M$ ,  $D$  и  $f$  могут значительно (до 50%) отличаться от предварительных оценок. Разница в уточненных и предварительных оценках спектров может существенно влиять на вероятностные оценки PSHA, что делает актуальной ревизию результатов предыдущих этапов данного цикла исследований.

**Ключевые слова:** землетрясения; сейсмическая опасность, вероятные спектры колебаний, «мягкие» и «твердые» грунты.

**Для цитирования:** Чернов Ю.К. Эмпирические модели для вероятностных оценок спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 90-106. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007

DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007

Original paper

## Empirical models for probabilistic estimates of the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes

Yu.K. Chernov 

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

Received: 14.03.2024, revised: 11.04.2024, accepted: 15.04.2024

**Abstract: Relevance.** Recently, new data have appeared indicating a significant variability in the ratios between the vibration spectra of “soft” and “hard” soils and their dependence on a combination of factors such as the earthquake magnitude, the distance to the source and the frequency of spectral components. But these estimates are preliminary and should be clarified. Therefore, the present research aimed at solving this problem seems relevant. **Aim.** Improving models for probabilistic description of motions of different types of soils during earthquakes. **Research object.** Empirical attenuation functions with the distance of the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes. **Methods.** A comprehensive analysis of 3,472 instrumentally recorded spectra for earthquakes of different magnitude and distance, the results of macroseismic surveys of 75 strong earthquakes in different parts of the world, as well as 24 known dependencies of the macroseismic earthquake intensity on the earthquake magnitude ( $M$ ) and the distance to the source ( $D$ ). The resulting attenuation functions of the spectra with distance were constructed by the selection method in the form of polynomials optimally approximating the entire volume of data. All estimates are made separately for earthquakes of different magnitudes, frequencies of spectral components ( $f$ ) and separately for “soft” and “hard” soils. The developed models were tested for their realism and reliability. **Results.** The refined variants of the dependences of the most probable levels of the Fourier spectral density  $ISI(M,D,f)$  of “soft” and “hard” soils vibrations generally confirmed the common nature and structure of the dependences established at the preliminary stage. The quantitative parameters of these dependences for different combinations of  $M$ ,  $D$  and  $f$  can differ significantly (up to 50%) from the preliminary estimates. The difference in the refined and preliminary estimates of the spectra can significantly affect the probabilistic estimates of the PSHA, which makes it relevant to revise the results of previous stages of this research cycle.

**Keywords:** earthquakes; seismic hazard, probable vibration spectra, “soft” and “hard” soils.

**For citation:** Chernov Yu.K. Empirical models for probabilistic estimates of the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 90-106. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007

### Введение

Местные грунтово-геоморфологические условия оказывают значительное влияние на интенсивность, спектральный состав и другие характеристики сейсмических сигналов, регистрируемых при землетрясениях. Поэтому изучение «грунтового фактора» всегда было одним из приоритетных направлений в инженерной сейсмологии. За почти уже столетие таких исследований накоплены обширные знания в данной области, которые, в том числе, успешно используются в практической деятельности. Развитие данной области сейсмологии активно продолжается и в на-

стоящее время. Усилиями многих исследователей добываются новые данные, которые способствуют дальнейшему расширению и углублению понимания природных процессов и закономерностей (см., например, [Boore, Atkinson, 2008; Sokolov, Wenzel, 2008; Akkar et al., 2014; Danciu et al., 2016]), что, в свою очередь, способствует повышению защищенности общества и окружающей среды от вредного воздействия землетрясений. Так, например, в процессе проводимых в Геофизическом институте ВНИЦ РАН исследований были выявлены особенности спектров колебаний грунтов разных типов, которые, помимо познавательного значения, представляют интерес и с точки зрения совершенствования практических оценок сейсмической опасности. Например, в [Чернов, 2022] показано, что функции затухания с расстоянием спектров и производные от них спектральные характеристики или отношения спектров «мягких» и «твердых» грунтов (т.е. грунтов, близких к грунтам II и I категории СНиП по сейсмическим свойствам) не являются квази постоянными, а подвержены значительным флуктуациям в зависимости от определенных сочетаний таких параметров, как магнитуда землетрясения ( $M$ ), удаленность от очага ( $D$ ) и частота спектральной составляющей ( $f$ ). Важно подчеркнуть, что в данном случае речь идет о вероятностных (статистических) оценках, базирующихся на доступной исходной информации о  $M$ ,  $D$  и  $f$ , а не об оценках, получаемых посредством детерминистских расчетов при помощи разного рода моделей (см., например, [Фачиолли, Розендитц, 1981; Штейнберг и др., 1993; Заалишвили, 2009; Заалишвили и др., 2022]), где учитываются различные (но обычно трудно контролируемые) параметры, такие, например, как углы подхода и спектральный состав сейсмических волн, геометрия границ и физико-механические свойства грунтовых слоев и др. Данное обстоятельство делает вышеуказанные статистические модели более удобными и корректными при производстве оценок, например, в рамках, вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA) территорий, в то время, как возможности в принципе более точных детерминистских построений здесь ограничены из-за недостатка исходных данных, необходимых для таких расчетов.

Новые функции затухания с расстоянием спектров в тестовом режиме были испытаны при кумулятивных вероятностных оценках возможных макросейсмических балльности и других характеристик сейсмических воздействий для ряда территорий Северного Кавказа [Чернов, 2023]. Во всех случаях получены результаты, говорящие о значительной вариабельности относительных оценок (например, «приращений балльности» в условиях «мягких» грунтов по сравнению с «твердыми») в зависимости от расположения расчетной точки и от периода повторяемости расчетного воздействия. В связи с этим встал вопрос насколько на данную вариабельность влияют именно новые функции затухания спектров. Первоначально этот вопрос был рассмотрен в порядке численного эксперимента, где в расчетах использованы умозрительные функции затухания, похожие на вышеозначенные «реальные» функции, но с некоторыми отклонениями от них. Эти эксперименты показали чувствительность результатов построений PSHA к точности исходных моделей сильных движений. Принимая во внимание это важное обстоятельство и возвращаясь к разработанным на предыдущем этапе «реальным» моделям следует подчеркнуть, что эти модели имеют предварительный характер и еще должны уточняться. В свете изложенного становится очевидной актуальность уточнения предварительных оценок. Решению этой задачи и посвящено настоящее исследование, которое является продолжением вышеописанных работ, конечная цель которых –

получение новых знаний о влиянии «грунтового фактора» на формирование поля колебаний грунта при землетрясениях и совершенствование на этой базе методов прогнозирования долговременной сейсмической опасности и сейсмического риска.

### Информационная база и методика исследований

Так же, как и предварительные оценки, настоящее исследование базируется на анализе достаточно большого объема эмпирических данных о реальных землетрясениях. Различие состоит в том, что в данной работе общий объем исходных данных расширен в количественном и качественном отношении, а также в иных (более точных) способах их обработки.

В работе используются исходные данные двух типов. Первый – это данные инструментальной регистрации сильных движений. Основной объем здесь составляют те же спектры колебаний «мягких» и «твердых» грунтов, что и использованные на предыдущих этапах и подробно описанные [Чернов, 2022]. К этому основному объему добавлено еще некоторое количество спектров землетрясений  $M=5-7$ , зарегистрированных на близких расстояниях, а также спектров с  $M=3-4$ , увеличение числа которых тоже способствует повышению качества дальнейшего анализа. Эти дополнительные спектры заимствованы из баз сильных движений Strong-Motion Virtual Data Center (VDC) и Strong-Motion...; European Strong-Motion Database (ESD) и из данных по регистрации сильных движений, полученных в Институте сейсмологии АН Узбекистана (ранее Институте сейсмологии АН УзССР), в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ранее Институт морской геологии и геофизики ДВО АН СССР) и Института физики Земли РАН (ранее Института физики земли АН СССР). В таблице 1 приведены общие характеристики сформированного в итоге массива данных этого типа.

Таблица 1 / Table 1

**Обобщенные характеристики использованных в работе данных  
по инструментальной регистрации колебаний грунта при землетрясениях  
с оценками спектров Фурье /**  
**Generalized characteristics of the data used in the research on instrumental registration  
of ground vibrations during earthquakes with estimates of Fourier spectra**

«Мягкие» грунты / «Soft» soils			«Твердые» грунты / «Hard» soils		
Магнитуды землетрясений / Magnitude of earthquakes	Расстояния до очага (км) / Distances to the source (km)	Количество спектров / Quantity of spectra's	Магнитуды землетрясений / Magnitude of earthquakes	Расстояния до очага (км) / Distances to the source (km)	Количество спектров / Quantity of spectra's
7 (6,5–7,3)	0,5–584	1052	7 (6,5–7,3)	0,5–658	321
6 (5,5–6,4)	0,5–405	617	6 (5,5–6,4)	0,5–423	352
5 (4,5–5,4)	0,5–201	279	5 (4,5–5,4)	1–248	228
4 (3,5–4,4)	0,5–154	276	4 (3,5–4,4)	0,5–31	102
3 (2,5–3,4)	2–48	182	3 (2,5–3,4)	2–18	63

Общее количество добавленных (по сравнению с предыдущим этапом) спектров относительно невелико (~ 3%), но их значение в действительности более существенно, так как они улучшают статистику именно в краевых сегментах рядов данных, где имеется их дефицит и наблюдаются наибольшие погрешности статистических построений.

Для производства расчетов рассматриваемые спектры Фурье представлены (параметризованы) в виде наборов уровней спектральной плотности Фурье ( $|S|$ ) ускорений колебаний грунта для 18-ти спектральных составляющих, частоты которых ( $f$ ) равномерно (в логарифмическом масштабе) распределены в инженерном диапазоне  $f = 0,28\text{--}22$  Гц. В итоге так же, как и в работе [Чернов, 2022] для дальнейшего анализа был подготовлен общий массив данных, состоящий из 18-ти отдельных массивов значений  $|S|(M,D,f)$ . В графическом виде примеры таких массивов показаны на рисунке 1.

Второй тип исходных данных – это независимые эмпирические и модельные определения макросейсмических интенсивностей сотрясений ( $I$ ) грунтов разных типов («мягких» и «твердых») при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. Одной из составляющих «эмпирических» данных, относящихся к «мягким» грунтам, являются разработанные разными авторами 24 известные в мире зависимости  $I$  от магнитуды землетрясения и расстояния.

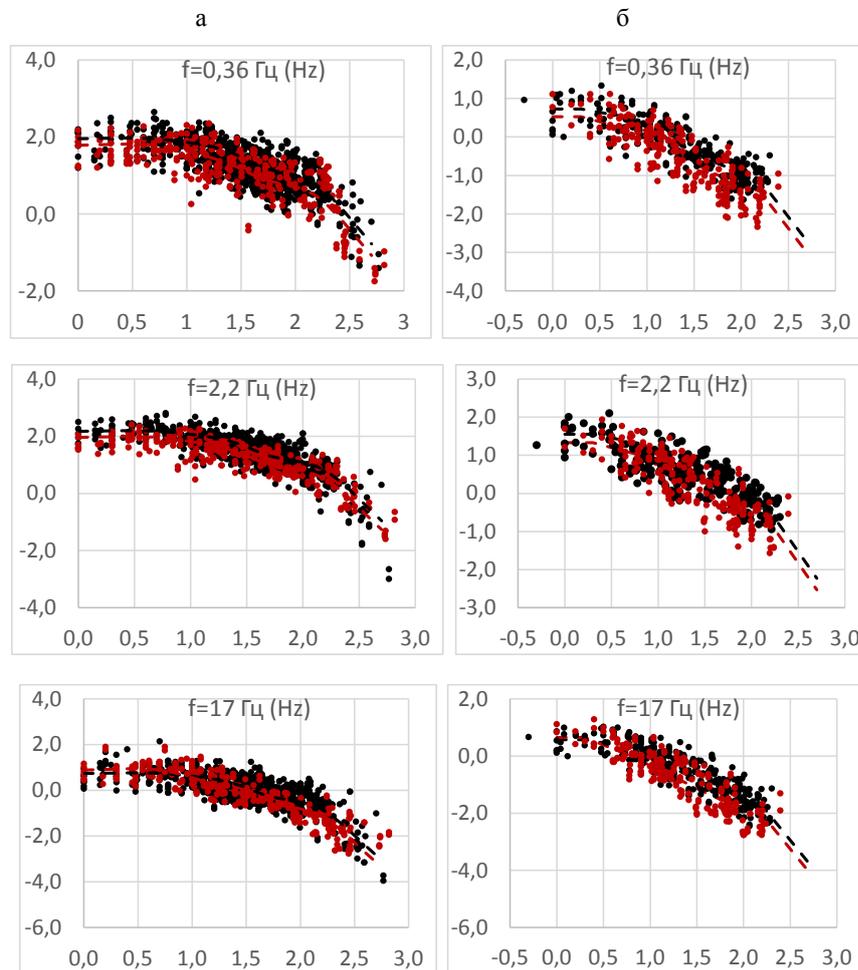


Рис. 1. Примеры уровней спектральной плотности Фурье ( $|S|$ ) ускорений колебаний «мягких» (черный цвет) и «твердых» (красный цвет) грунтов для различных спектральных составляющих ( $f$ ) при землетрясениях с магнитудами  $M=7$  (а) и  $M=5$  (б) и расстояниями до очага ( $D$ ). Кружки – исходные массивы данных, пунктирные линии – аппроксимирующие модели. Оси абсцисс –  $\lg D$  ( $D$  в км), оси ординат –  $\lg |S|$  ( $|S|$  в см/с) /

Fig. 1. Examples of Fourier spectral density levels ( $|S|$ ) of accelerations of vibrations of “soft” (black) and “hard” (red) soils for various spectral components ( $f$ ) in earthquakes with magnitudes  $M=7$  (a) and  $M=5$  (b) and distances to the source ( $D$ ). Circles are the initial data arrays, stipple lines approximating models. Abscissa axes –  $\lg D$  ( $D$  at km), ordinate axes –  $\lg |S|$  ( $|S|$  at cm/s)

Вторая составляющая здесь – это примерно 2500 оценок величины  $I$  в конкретных пунктах наблюдений, сделанных в процессе макросейсмических обследований 35-ти сильных землетрясений в разных районах мира. Сюда же относятся макросейсмические описания Алтайского землетрясения 2003 г., Нефтегорского 1995 г., Нортриджского 1994 г., Рачинского 1991 г., Приморского 1990 г., Спитакского 1988 г., Газлийских 1976 г. и 1984 г., Папского 1984 г., Назарбекского 1980 г., Империл Велли 1979 г., Исфара-Баткенского и Таваксайского 1977 г., Сан-Фернандо 1971 г., Дагестанского 1970 г., Ташкентского 1966 г., Ашхабадского 1948 г., Лесогорско-Углегорского 1924 г., Ахалкалакского 1899 г. и других сильных землетрясений. Прямые и пролонгированные ссылки на первоисточники этих данных можно найти в [The Northridge..., 1994; Геодакян и др., 1991; Газлийские..., 1986; Папское..., 1986; Исфара-Баткенское..., 1986; Назарбекское..., 1984; *Reagor et al.*, 1982; San Fernando..., 1973; Дагестанское..., 1981; Ташкентское..., 1971; Сейсмическое..., 1980; Рустанович, 1967; Геодинамика..., 1997; Tatevossian et al., 1977; Составление..., 1999].

Все исходные макросейсмические данные объединены в массивы значений  $I$  с одинаковыми  $M$ . При этом указанные в первоисточниках расстояния «до разрыва», «до эпицентра» и «до гипоцентра» по аналогичным с предыдущими этапами процедурам пересчитаны в расстояния «до очага». По массивам макросейсмических данных методами подбора определены функции, оптимальным образом аппроксимирующие исходные данные при всех рассматриваемых  $I$ ,  $M$ ,  $D$ . Аппроксимирующие функции подбирались в виде многочленов с приемлемым (обычно не ниже 0,9) уровнем достоверности аппроксимации.

Вышеописанные построения касаются зависимостей макросейсмической балльности только «мягких» грунтов ( $I_{\text{мяг}}(M,D)$ ), для которых есть представительные статистические данные. Для «твердых» же грунтов аналогичные зависимости ( $I_{\text{твер}}(M,D)$ ) сконструированы искусственным образом путем пересчета полученных функций  $I_{\text{мяг}}(M,D)$  с использованием соотношений, рекомендуемых российскими нормативами и с учетом эмпирических соотношений между спектрами Фурье и величинами  $I$  (см. ниже).

Описанные функции  $I_{\text{мяг}}(M,D)$  и  $I_{\text{твер}}(M,D)$  хотя и представляются достаточно корректными, в данном исследовании все же имеют вспомогательное значение, являясь своего рода дополнительным «камертоном» для более точной «настройки» основных для данной работы моделей спектров колебаний грунта. В этом и состоит основное отличие методики данного исследования от более простой методики предварительных оценок.

Как видно из рисунка 1 добавление к основному объему спектров из [Чернов, 2022] некоторого количества дополнительных данных (см. выше) ожидаемо не изменило общую структуру и основные качественные характеристики соотношений  $|S|(M,D,f)$ . Так, по скорости изменения с расстоянием величин  $|S|$  как для «мягких», так и для «твердых» грунтов здесь последовательно, по мере удаления от очага выделяются те же, что и на предварительном этапе ближняя, промежуточная и дальняя зоны, а также две подзоны дальней зоны. Поэтому для дальнейшего определения теперь уже количественных показателей применен тот же общий подход, что и в наших предыдущих исследованиях, т.е. результирующие модели  $|S|(M,D,f)$  составлялись из двух основных частей – вероятностных оценок уровней спектров в ближних зонах землетрясений и коэффициентов затухания с расстоянием по мере

удаления от них. Все основные количественные характеристики – уровни  $|S|$  для разных  $M$  и  $f$  в ближних зонах, промежуточных и дальних зонах, подзонах дальней зоны, а также соответствующие этим зонам коэффициенты затухания с расстоянием – подбирались так, чтобы результирующие оценки оптимальным образом соответствовали как всем инструментальным данным, так и не противоречили описанным выше зависимостям  $I(M, D)$ .

Соответствие между спектрами колебаний и балльностями сотрясений оценивалось посредством сравнения оценок по описанным выше «традиционным» функциям  $I(M, D)$  с определяемыми через спектр Фурье так называемыми «спектральными» балльностями ( $I_{ст}$ ). Оценка величин  $I_{ст}$  проводилась с использованием функции распределения вероятностей:

$$P[I \leq i] = \prod_{j=i}^{12} \prod_{f=f_{max}}^{f_j} \left(1 - \frac{1}{\sigma_{j,f} \sqrt{2\pi}} \int_{x_{min}}^{x_{j,f}} e^{-\frac{(x-a_{j,f})^2}{2\sigma_{j,f}^2}} dx\right)^{k_f} \quad (1)$$

где  $a_{j,f}$  и  $\sigma_{j,f}$  обозначают, соответственно, средние значения и стандарты величин  $x = \lg|S|$  приписанных балльности  $I=j$  на частотах, «ответственных» за интенсивность сотрясений  $f_j$ , а также средние значения и стандарты величин  $x = \lg|S|$ , приписанных балльности  $I=i$ , на частотах, больших, чем частота, «ответственная» за сейсмический эффект данной силы  $I=j$ ;  $x_{j,f}$  – значение логарифма наблюдаемого спектра на частотах  $f_j$ , а также на частотах больших частоты, «ответственной» за балльность  $I=j$ ;  $x_{min}$  – равно  $a_{j,f} - 5\sigma_{j,f}$ ;  $k_f$  – показатель степени, равный единице для частот, «ответственных» за макросейсмический эффект  $I_j$ , и меньше единицы для частот, больших, чем частота  $f_j$ , для которых  $k_f \approx k_g/k_i$ , где  $k_g$  – эмпирически определяемый коэффициент линейной регрессии  $\lg|S|$  на  $I$  для частоты  $f_j$ . Под частотами, «ответственными» за макросейсмический эффект данной силы ( $f_{отв}$ ) понимаются частоты на которых землетрясения разных магнитуд, но с одинаковой балльностью сотрясений имеют близкие уровни значений  $|S|(M,D)$  и соответственно, наименьшую дисперсию этих значений по сравнению с другими частотами рассматриваемого спектра.

Оценки наиболее вероятных значений и стандартов величин  $\lg|S|$  на частотах, «ответственных» за интенсивность сотрясений данной силы ( $f_{отв}$ ), а также самих  $f_{отв}$ , приводятся в наших предыдущих работах, ссылки на которые можно найти в [Sokolov, 2002].

Оценки  $I_{ст}$  получены двумя способами – по значениям аргумента функции (1), при которых первая производная имеет максимальные значения (Вариант 1) и по значениям аргумента, при которых функция (1) принимает значение 0,5 (Вариант 2).

Все расчеты делались отдельно для каждой спектральной составляющей и отдельно для спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов. При этом принято, что соответствующие итоговым моделям оценки  $|S|$  являются случайными величинами, имеющими логарифмически нормальное распределение при заданных  $M, D$  и  $f$ .

### Результаты и обсуждение

Для функций затухания макросейсмических интенсивностей с расстоянием получены аппроксимирующие выражения в виде:

$$I(M,D) = a (\lg D)^3 + b (\lg D)^2 + c \lg D + d, \quad (2)$$

где

для «мягких» грунтов:

$$\begin{aligned} a &= 0,0228(M)^3 - 0,4336(M)^2 + 2,6758M - 5,2142 \\ b &= -0,0394(M)^3 + 0,7570(M)^2 - 4,7581M + 8,1833 \\ c &= 0,0091(M)^3 - 0,1873(M)^2 + 1,5895M - 4,2375 \\ d &= 0,0004(M)^3 - 0,0549(M)^2 + 1,5449M + 1,1196 \end{aligned} \tag{3}$$

для «твердых» грунтов:

$$\begin{aligned} a &= 0,0325(M)^3 - 0,6292(M)^2 + 3,9171M - 7,5410 \\ b &= -0,0559(M)^3 + 1,1400(M)^2 - 7,6072M + 14,6040 \\ c &= -0,0014(M)^3 - 0,0856(M)^2 + 1,8332M - 7,0807 \\ d &= 0,0177(M)^3 - 0,3450(M)^2 + 2,9633M - 1,3031 . \end{aligned} \tag{4}$$

В выражении (2) I – в баллах MSK; D – в км.

На рисунке 2 зависимости (2)–(4) показаны в графическом виде.

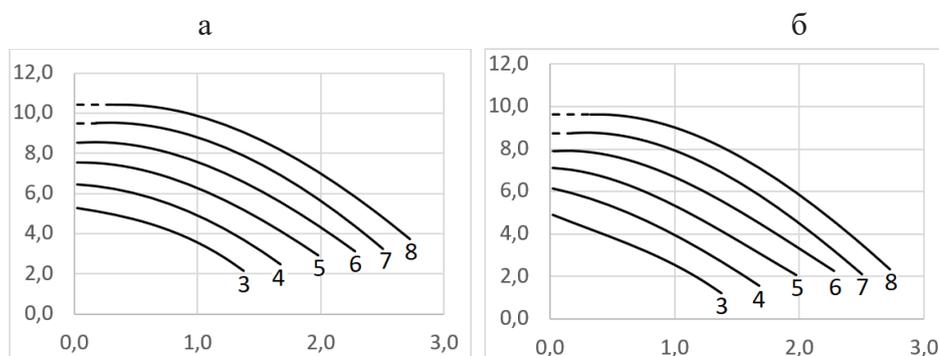


Рис. 2. Модели для описания наиболее вероятных значений макросейсмической интенсивности сотрясений (I) в условиях «мягких» (а) и «твердых» (б) грунтов на разных расстояниях до очага (D) при землетрясениях разных магнитуд (цифры около кривых). Сплошные линии – значения I, соответствующие выражениям (2)–(4), пунктир – экстраполяции. Оси абсцисс – lgD (D в км), оси ординат – I (балл MSK) /

Fig. 2. Models for describing the most probable values of the macroseismic intensity of shakings (I) in conditions of “soft” (a) and “hard” (b) soils at different distances to the source (D) in earthquakes of different magnitudes (numbers near the curves). Solid lines are the values of I corresponding to formulas (2)–(4), stipple lines are extrapolations. Abscissa axes – lgD (D at km), ordinate axes – I (MSK intensity)

Согласно уточненным аппроксимациям размеры ближних зон  $r_0'$ , (т.е. расстояний D, на которых значения  $|S|(M,D,f)$  по мере приближения к источнику достигают своих максимальных значений и при дальнейших уменьшениях D остаются относительно стабильными) одинаковые для всех спектральных составляющих и для «мягких» и для «твердых» грунтов в рассматриваемом диапазоне магнитуд (M=3–7) могут быть описаны выражением:

$$\lg r_0' = 0,20M - 0,70 . \tag{5}$$

Аналогично, размеры промежуточных или переходных зон  $r_0$  (т.е. расстояний D по которым проходят границы между промежуточными и дальними зонами) для землетрясений с M=3–7 можно описать выражением:

$$\lg r_0 = 0,25M - 0,45 . \tag{6}$$

В выражениях (5) и (6)  $r_0'$  и  $r_0$  – в км.

Размеры дальней зоны (т.е. значения  $D$ , по которым проходит граница между собственно дальней зоной и первой подзоной дальней зоны) и размеры самой первой подзоны дальней зоны (т.е. пограничные расстояния  $D$  между первой и второй подзонами дальней зоны) не зависят от магнитуды землетрясения, от типа грунта («мягкий» или «твердый») и от частоты спектральной составляющей и равны 50 км и 200 км, соответственно. Вторая подзона дальней зоны – это расстояния  $D > 200$  км для всех типов грунтов,  $M$  и  $f$ .

Наиболее вероятные значения величин  $|S|$  в зависимости от  $f$  в ближних зонах землетрясений с  $M=3-7$ , согласно уточненным аппроксимациям, можно оценить по аналитическим выражениям в виде полиномов:

$$\lg|S|(M,f) = a M^2 + b M + c, \quad (7)$$

где,

для «мягких» грунтов:

$$\begin{aligned} a &= -0,0163(\lg f)^4 + 0,0190(\lg f)^3 - 0,0072(\lg f)^2 + 0,0549\lg f - 0,0570 \\ b &= 0,1919(\lg f)^4 - 0,0840(\lg f)^3 + 0,0082(\lg f)^2 - 1,0790\lg f + 1,1403 \\ c &= -0,7093(\lg f)^4 - 0,2308(\lg f)^3 - 0,7075(\lg f)^2 + 5,0141\lg f - 2,9535 \end{aligned} \quad (8)$$

для «твердых» грунтов:

$$\begin{aligned} a &= -0,0088(\lg f)^4 + 0,0085(\lg f)^3 - 0,0070(\lg f)^2 + 0,0583\lg f - 0,0615 \\ b &= 0,0864(\lg f)^4 + 0,0413(\lg f)^3 + 0,0612(\lg f)^2 - 1,1269\lg f + 1,1956 \\ c &= -0,4329(\lg f)^4 - 0,6930(\lg f)^3 - 0,5517(\lg f)^2 + 5,1972\lg f - 3,3934. \end{aligned} \quad (9)$$

В выражениях (7)–(9)  $|S|$  – в см/с;  $f$  – в Гц.

В графическом виде зависимости (7)–(9) показаны на рисунке 3.

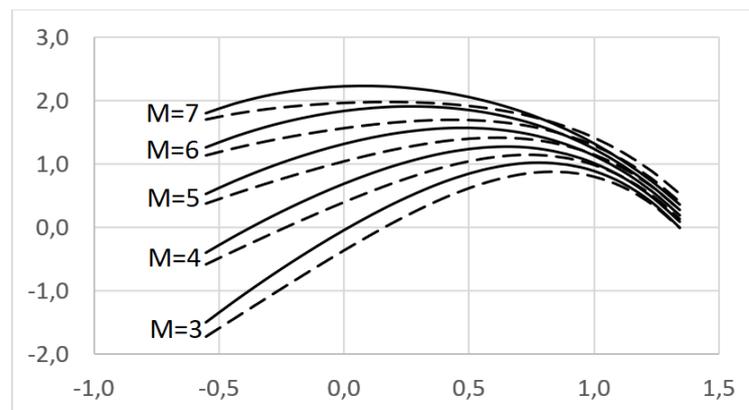


Рис. 3. Соответствующие моделям настоящего исследования (выражения (7)–(9)) наиболее вероятные уровни спектральной плотности Фурье ( $\lg|S|$ ) ускорений колебаний на различных частотах ( $f$ ) «мягких» (сплошные линии) и «твердых» (пунктир) грунтов в ближних зонах землетрясений разных магнитуд ( $M$ ). Ось абсцисс –  $\lg f$  ( $f$  в Гц), ось ординат –  $\lg|S|$  ( $|S|$  в см/с) /

Fig. 3. Corresponding to the models of current research (formulas (7)–(9)), the most probable levels of the Fourier spectral density ( $\lg|S|$ ) of vibration accelerations at various frequencies ( $f$ ) of “soft” (solid lines) and “hard” (stipple lines) soils in the near field of earthquakes of different magnitudes ( $M$ ). The abscissa axis is  $\lg f$  ( $f$  at Hz), the ordinate axis is  $\lg|S|$  ( $|S|$  at cm/s)

Сравнивая графики на рисунке 3 с такими же оценками из [Чернов, 2022] можно видеть, что основная их особенность состоит в том, что соотношения в уровнях спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов не являются постоянной (или приблизительно постоянной) величиной, а существенно меняются при изменении  $M$  и  $f$ . Причем уровни спектров колебаний «твердых»

грунтов в высокочастотной области выше, чем спектров колебаний «мягких» грунтов и это превышение тем больше, чем выше магнитуда землетрясения. Есть и различия. Так, согласно уточненным моделям  $|S|(M,D,f)$ , в ближних зонах землетрясений с  $M=6-7$  в области средних и низких частот спектры «мягких» грунтов превышают спектры «твердых» грунтов, в то время как по предварительной версии между ними был приблизительный паритет. Данное изменение в значительной степени связано с дополнительным учетом в новых процедурах аппроксимации функций  $I(M,D)$ , согласно которой при реальных землетрясениях  $I_{\text{мяг}}(M,D)$  обычно выше, чем  $I_{\text{твер}}(M,D)$ .

Для проверки качества новых моделей, получаемые на их основе оценки сопоставлены с данными инструментальной регистрации землетрясений при  $D \leq r_0$ . При этом для повышения репрезентативности в выборки для землетрясений с  $M=5$  включены спектры, зарегистрированные на расстояниях  $D \leq 4,0$  км, т.е. немного заходящие в пределы промежуточной зоны. При этом спектры промежуточной зоны пересчитаны в ближнюю зону по коэффициентам затухания, определенным в процессе настоящего исследования (см. ниже). Примеры таких сопоставлений приведены на рисунке 4, на котором видна хорошая корреляция модельных оценок с центрами распределения (средними значениями) реальных массивов  $\lg|S|(f)$ .

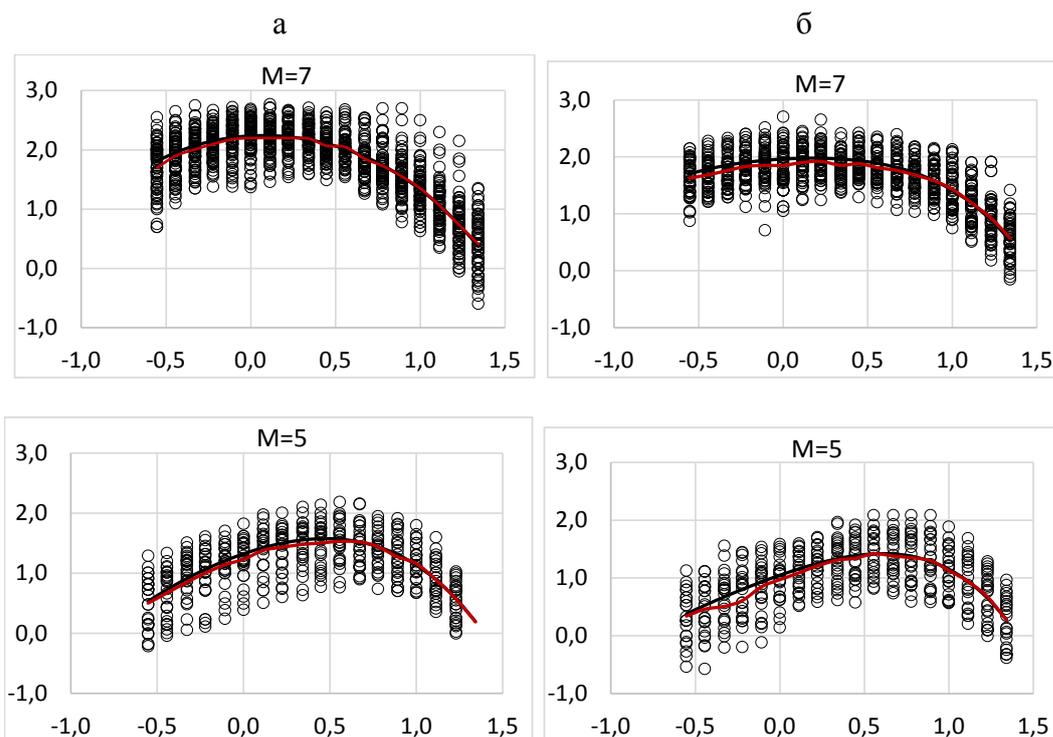


Рис. 4. Примеры сопоставления уровней спектральной плотности Фурье ( $|S|$ ) ускорений колебаний «мягких» (а) и «твердых» (б) грунтов (пустые кружки), зарегистрированных на различных частотах ( $f$ ) в ближних зонах землетрясений разных магнитуд ( $M$ ), с соответствующими оценками по аппроксимирующим моделям настоящего исследования (линии черного цвета).

Линии красного цвета – средние значения, рассчитанные по реальным массивам  $|S|(f)$ .

Оси абсцисс –  $\lg f$  ( $f$  в Гц), оси ординат –  $\lg|S|$  ( $|S|$  в см/с) /

Fig. 4. Examples of comparisons of Fourier spectral density levels ( $|S|$ ) of vibration accelerations of “soft” (a) and “hard” (b) soils (empty circles) recorded at different frequencies ( $f$ ) in the near fields of earthquakes of different magnitudes ( $M$ ) with relevant estimates based on approximating models of current research (black lines). Red lines are the average values calculated from real arrays  $|S|(f)$ .

The abscissa axes are  $\lg f$  ( $f$  at Hz), the ordinate axes are  $\lg|S|$  ( $|S|$  at cm/s)

Согласно новым аппроксимациям (несколько отличающимся от предварительных вариантов), коэффициенты затухания с расстоянием ( $n = \Delta \lg |S| / \Delta \lg D$ ) в дальних зонах не зависят от магнитуды землетрясения и типа грунта («мягкие» и «твердые») и зависят от частоты спектральной составляющей. Для землетрясений с  $M=6-7$  во всем рассматриваемом диапазоне частот (0,28-22 Гц) их можно оценить по выражению:

$$n = -0,225 \lg f - 1,324, \quad (10)$$

где  $f$  – частота в Гц.

Выражение (10) справедливо также и для землетрясений меньших магнитуд в области частот, больших, чем корнер-частота ( $f_c$ ) по Бруну [Брун, 1981]. В области частот  $f < f_c$  значения  $n$  постоянны и равны коэффициенту затухания при  $f = f_c$ .

Коэффициенты затухания с расстоянием, рассчитанные для первой и второй подзон дальней зоны, также не зависят от типа грунта и приняты равными  $n^{**}(f) = 0,75 n(f)$  и  $n^{***}(f) = 2,5 n(f)$ , соответственно.

В промежуточных зонах коэффициенты затухания спектров «мягких» грунтов приняты равными  $n^*(f) = 0,35 n(f)$ .

В промежуточных зонах коэффициенты затухания спектров «твердых» грунтов приняты равными:

$$n^* = 0,1369(\lg f)^4 + 0,1997(\lg f)^3 - 0,8922(\lg f)^2 - 0,1130 \lg f - 0,5106, \quad (11)$$

где  $f$  – частота в Гц.

Выражение (11) справедливо во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд ( $M=3-7$ ) и частот  $f=0,28-22$  Гц.

На рисунке 1 приведены примеры оценок наиболее вероятных значений  $|S|(M,D,f)$  для отдельных спектральных составляющих, выполненные с использованием описанных выше моделей спектров в ближних зонах и коэффициентов затухания с расстоянием за ее пределами. Этот рисунок показывает хорошее соответствие расчетных данных реально наблюдаемым параметрам колебаний «мягких» и «твердых» грунтов.

Стандартные отклонения случайных величин  $\lg |S|(M,D,f)$  примерно одинаковы для «мягких» и «твердых» грунтов и находятся в интервале  $\sigma_{\lg |S|} = 0,29-0,41$  при всех рассмотренных  $M$ ,  $D$  и  $f$ .

Для выяснения реалистичности и надежности полученных результатов выполнен тест на согласованность моделей настоящего исследования с независимыми данными другого вида. Сопоставлялись значения «спектральной» балльности (см. выше), рассчитанные по модельным спектрам настоящего исследования, показанным на рисунке 2, с реальными оценками макросейсмической интенсивности сотрясений. На рисунке 5 приведены примеры таких сопоставлений, показывающие хороший уровень согласованности модельных и натуральных данных.

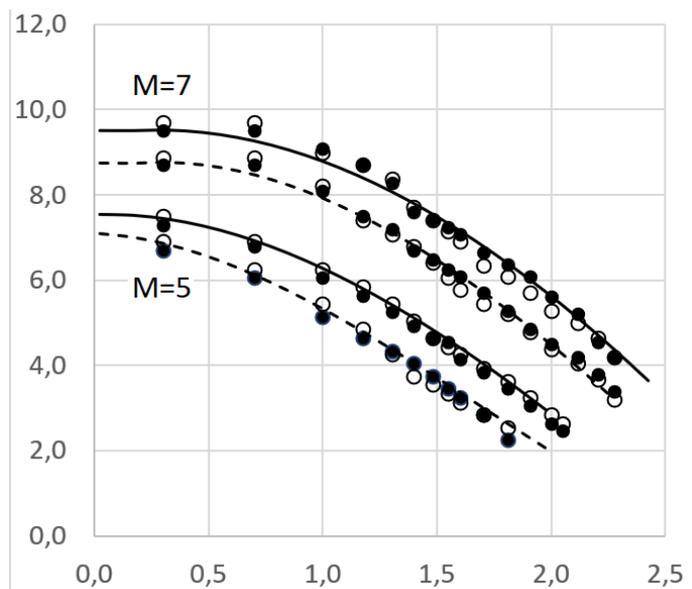
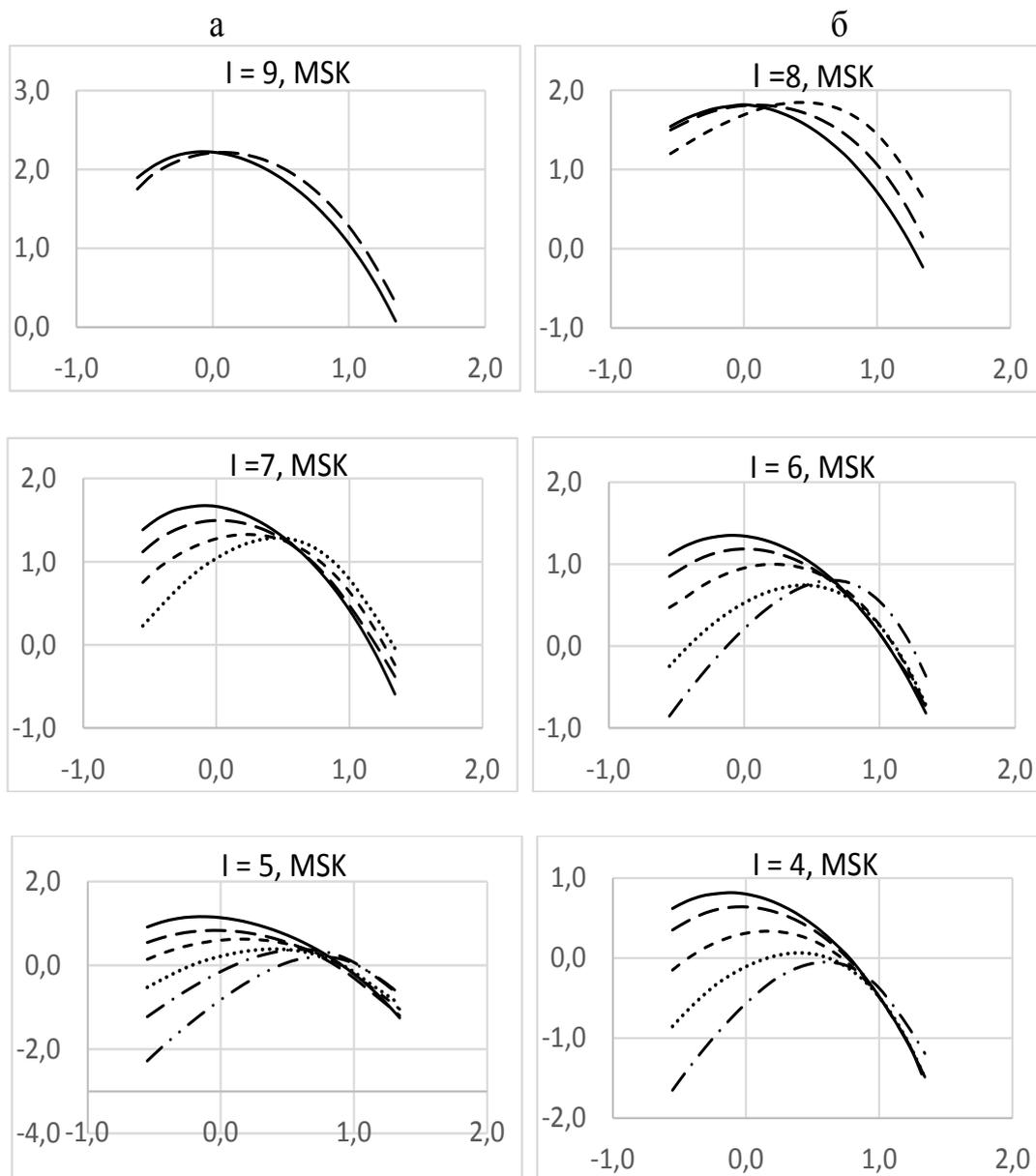


Рис. 5. Примеры сопоставления значений  $I_{sp}$ , рассчитанных по моделям настоящего исследования для землетрясений разных магнитуд ( $M$ ) и расстояний от очага ( $D$ ) для «мягких» и «твердых» грунтов с соответствующими эмпирическими функциями:  $I_{\text{мяг}}(M,D)$  – сплошные линии и  $I_{\text{твер}}(M,D)$  – пунктир. Пустые и залитые кружки – оценки  $I_{sp}$  по вариантам 1 и 2, соответственно. Ось абсцисс –  $\lg D$  ( $D$  в км), ось ординат –  $I_{sp}$  и  $I$  (балл MSK) /

Fig. 5. Examples of comparisons of  $I_{sp}$  values calculated using the models of current research for earthquakes of different magnitudes ( $M$ ) and distances from the source ( $D$ ) for “soft” and “hard” soils with the corresponding empirical functions  $I_{\text{soft}}(M,D)$  – solid lines and  $I_{\text{hard}}(M,D)$  – stipple lines. Empty and filled circles are  $I_{sp}$  evaluations for options 1 and 2, accordingly. The abscissa axis is  $\lg D$  ( $D$  at km), the ordinate axis is  $I_{sp}$  and  $I$  (MSK intensity)

Также сделана еще одна проверка разработанных моделей сильных движений на непротиворечивость и согласованность с другими данными. Для этого при помощи выражений (7)–(11) произведены оценки наиболее вероятных уровней спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях с разными магнитудами на расстояниях, на которых наблюдаются сотрясения силой 9, 8, 7, 6, 5 и 4 балла (см. выражения (2)–(4)). На рисунке 6 приведены примеры этих построений. Из приведенных примеров видно, что для каждого уровня  $I_{\text{мяг}}(M,D)$  и  $I_{\text{твер}}(M,D)$  существует узкая полоса частот, на которых уровни спектров колебаний при разных магнитудах резко сближаются (участки пересечения кривых  $|S|(M,D,f)$  и соответственно, дисперсия значений  $|S|(I)$  здесь по сравнению с другими частотами минимальна. В таблице 2 приведены оценки этих частот и средних уровней  $|S|(f)$  на этих частотах. В этой же таблице приведены такие же определения, неоднократно выполненные нами в предыдущие годы (см. выше), но с использованием не модельных оценок, а спектров реальных землетрясений с одновременным определением  $I$  непосредственно в пунктах регистрации спектров.



*Рис. 6. Примеры наиболее вероятных уровней спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» (а) и «твердых» (б) грунтов, рассчитанных по моделям настоящего исследования для землетрясений с магнитудами  $M=8$  (сплошная линия),  $M=7$  (длинный пунктир),  $M=6$  (короткий пунктир),  $M=5$  (точечная линия),  $M=4$  (пунктир с точкой) и  $M=3$  (пунктир с двумя точками) и расстояний  $D$ , на которых наблюдаются соответствующие макросейсмические интенсивности сотрясений ( $I$ , MSK).*

*Оси абсцисс –  $\lg f$  (в Гц), оси ординат –  $\lg|S|$  ( $|S|$  в см/с) /*

*Fig. 6. Examples of the most probable levels of Fourier spectral density of vibration accelerations of “soft” (a) and “hard” (b) soils calculated using the models of current research for earthquakes with magnitudes  $M=8$  (solid lines),  $M=7$  (long stipple line)  $M=6$  (short stipple line),  $M=5$  (dotted line)  $M=4$  (stipple line with one dot) and  $M=3$  (stipple line with two dots) and distances  $D$  at which the corresponding macroseismic intensity of shakings ( $I$ , MSK).*

*The abscissa axes are  $\lg f$  (в Hz), the ordinate axes are  $\lg|S|$  ( $|S|$  at cm/s)*

Таблица 2 / Table 2

**Сравнение характеристик массивов спектров колебаний «мягких» и «твердых» (в скобках) грунтов, рассчитанных по моделям настоящего исследования с характеристиками, полученными ранее по данным натурных наблюдений / Comparison of the characteristics of the arrays of vibration spectra of “soft” and “hard” (in parentheses) soils calculated according to the models of this research with the characteristics obtained earlier from field observations**

I MSK	Оценки по моделям настоящего исследования / Estimates based on the models of the present research		Оценки по натурным данным (предыдущие исследования) / Estimates based on natural data (previous researches)	
	Наиболее вероятные значения $\lg S $ (см/с) / The most probable values $\lg S $ (cm/s)	Частота с минимальной дисперсией $\lg S $ (Гц) / Frequency with minimal variance $\lg S $ (Hz)	Наиболее вероятные значения $\lg S $ (см/с) / The most probable values $\lg S $ (cm/s)	«Ответственная» частота (Гц) / “Responsible” frequency (Hz)
9	2,215 (–)	1,0 (–)	2,16–2,20	1,0
8	1,805 (1,788)	1,67 (1,67)	1,69–1,80	1,67
7	1,235 (1,246)	3,6 (3,6)	1,22–1,28	3,6
6	0,754 (0,754)	4,7 (4,7)	0,75–0,82	4,7
5	0,231 (0,243)	6,0 (6,0)	0,20–0,37	6,0–7,8
4	–0,151 (–0,239)	7,8 (7,8)	(–0,1)–(–0,32)	7,8–10,0

Данные таблицы 2 показывают почти полное совпадение модельных и натурных оценок. Кроме того, здесь видно также хорошее соответствие между модельными оценками спектров для «мягких» и для «твердых» грунтов. Одновременно проведенный сравнительный анализ подтверждает и правильность наших предыдущих построений относительно связи наблюдаемых макросейсмических эффектов со спектрами колебаний грунта. Попутно следует сказать, что такие же оценки, выполненные с использованием моделей предварительного этапа исследования, показали существенную рассогласованность модельных и натурных определений.

Таким образом, разностороннее тестирование разработанных в процессе настоящих исследований моделей дало устойчиво положительные результаты, что свидетельствует об их реалистичности и надежности.

## Выводы

1. Разработанные в настоящем исследовании новые варианты моделей  $|S|(M,D,f)$  «мягких» и «твердых» грунтов являются более точными и реалистичными, чем их предварительные аналоги. В то же время эти модели в целом подтверждают общий характер и структуру зависимостей, установленных на предварительном этапе, включая наличие значительной вариабельности соотношений спектров «мягких» и «твердых» грунтов в зависимости от различных сочетаний параметров  $M$ ,  $D$  и  $f$ .

2. Количественные же параметры новых моделей (уровни спектров «мягких» и «твердых» грунтов и их соотношений в ближних и промежуточных зонах землетрясений; особенно больших магнитуд и особенно в области средних и низких частот) существенно (до 50%) отличаются от предварительных оценок.

3. Такая большая разница в модельных оценках спектров может значительно влиять на вероятностные оценки PSHA, что делает актуальной задачу ревизии

определений такого типа, полученных на предыдущих этапах данного цикла исследований.

### Литература

1. Брун Дж.Н. Физика сильных движений, вызванных землетрясениями. // Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, – 1981. – С. 129–161.
2. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 г.г. Ташкент: Фан, – 1986. 368 с.
3. Геодакян Э.Г., Голинский Г.А., Папалашвили В.Г., Хромецкая Е.А., Шебалин Н.В. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г., карты изосейст. // Землетрясения в СССР в 1988 г. М.: Наука, – 1991. – С. 74–84.
4. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск. – 1997. 340 с.
5. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. (Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства.). М.: Наука, – 1981. 265 с.
6. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М.: Наука, – 2009. 349 с.
7. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
8. Исфара-Баткенское и Таваксайское землетрясения 1977 г. Ташкент: Фан, – 1986. 152 с.
9. Назарбекское землетрясение 11 декабря 1980 г. Ташкент: Фан, – 1984. 145 с.
10. Папское землетрясение 1984 г. Ташкент: Фан, – 1986. 136 с.
11. Рустанович Д.Н. Сейсмичность территории Туркменской ССР и Ашхабадское землетрясение 1948 г. М.: Наука, – 1967. 106 с.
12. Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, – 1980. 307 с.
13. Составление карты детального сейсмического районирования Ставропольского края. – 1–6. – М.: ИФЗ РАН, – 1999.
14. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 г. Ташкент: Фан, – 1971. 672 с.
15. Фачиолли Э., Розендиц Д. Динамика грунтов: поведение грунта при сейсмическом воздействии, включая разжижение. // Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, – 1981. – С. 66–129.
16. Чернов Ю.К. Некоторые предварительные данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 3. – С. 61–76. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004.
17. Чернов Ю.К. О новом подходе к учету влияния «грунтового фактора» при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2023 – Т. 13. № 4. – С. 55–70. DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005.
18. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. М.: Наука, – 1993. – С. 94 с.
19. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2014. – Vol. 12. No. 1. – pp. 359–387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
20. Boore D.M., Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24. No. 1. – pp. 99–138.
21. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2016. – Vol. 16. – pp. 3497–3533. DOI: 10.1007/s10518-016-9989-1.

22. Reagor B.G., Stover C.W., Algermissen S.T., Steinbrugge K.V., Hubiak P., Hopper M.G., Marnhard L.M. Preliminary evaluation of the distribution of seismic intensities, The Imperial Valley, California, Earthquake of October 15, 1979. // Geological Survey professional paper 1254, United States Government Printing Office. – 1982. – 255 p.
23. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. – 1973. 482 p.
24. Sokolov V.Yu. Seismic intensity and Fourier acceleration spectra: revised relationship. // Earthquake spectra. – 2002. – Vol. 18. No. 1. – pp. 161–187. DOI: 10.1193/1.1469037.
25. Sokolov V., Wenzel F. First step toward realistic ground-motion prediction for SW-Germany. // Proceedings of Workshop “Seismicity patterns in the Euro-Mediterranean Region”, European Center for Geodynamics and Seismology, November 17-19, 2008, Luxemburg, – 2008. – pp. 53–68.
26. Tatevossian R.E., Albini P., Camassi R., Mokrusyina N.G., Shebalin N.V., Petrossian A.E. Analyzing and improving supporting data set of the Akhalkalak, December 31, 1899, Earthquake. // Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. Ed. D. Giardini, S. Balassanian. Boston. Kluwer Academic Publishers. – 1997. – Vol. 28. – pp. 383–400.
27. The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center For Earthquake Engineering Research. Ed. J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.

## References

1. Brun J.N. Physics of strong movements caused by earthquakes. Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra. 1981. pp. 129–161. (in Russ.)
2. The Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Fan. 1986. 368 p. (in Russ.)
3. Geodakian E.G., Golinsky G.A., Papalashvili V.G., Khrometskaya E.A., Shebalin N.V. The Spitak earthquake of December 7, 1988, maps of the isoseist. Earthquakes in the USSR in 1988. Moscow. Nauka. 1991. pp. 74–84. (in Russ.)
4. Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Vol. VI. Problems of seismic hazard in the Far Eastern region. Yuzhno-Sakhalinsk. 1997. 340 p. (in Russ.)
5. Dagestan earthquake on May 14, 1970 (Devastating consequences. Engineering seismology. Issues of earthquake engineering.). Moscow. Nauka. 1981. 265 p. (in Russ.)
6. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka. 2009. 349 p. (in Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field of the day surface. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (in Russ.)
8. Isfara-Batken and Tavaksai earthquakes of 1977. Tashkent. Fan. 1986. 152 p. (in Russ.)
9. The Nazarbek earthquake on December 11, 1980. Tashkent. Fan. 1984. 145 p. (in Russ.)
10. The Pop earthquake of 1984. Tashkent. Fan. 1986. 136 p. (in Russ.)
11. Rustanovich D.N. Seismicity of the territory of the Turkmen SSR and the Ashgabat earthquake of 1948. Moscow. Nauka. 1967. 106 p. (in Russ.)
12. The seismic zoning of the territory the USSR. Moscow. Nauka. 1980. 307p. (in Russ.)
13. Compilation of the detailed seismic zoning map of the Stavropol Territory. 1–6. Moscow. IPE RAS. 1999. (in Russ.)
14. Tashkent earthquake on April 26, 1966. Tashkent. Fan. 1971. 672 p. (in Russ.)
15. Facioli E., Rosenditz D. Soil dynamics: soil behavior under seismic action, including liquefaction. Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra. 1981. pp. 66–129. (in Russ.)
16. Chernov Yu.K. Some preliminary data on the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes of different magnitudes and distances. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 61–76. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004. (in Russ.)

17. Chernov Yu.K. A new approach to taking into account the influence of the “ground factor” in probabilistic assessments of the seismic hazard of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 55–70. DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005. (in Russ.)
18. Steinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F., et al. Methods of seismic impact assessment (manual). *Problems of engineering seismology*. Issue 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5–94. (in Russ.)
19. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2014. Vol. 12. No. 1. pp. 359–387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
20. Boore D.M., Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*. 2008. Vol. 24. No. 1. pp. 99–138.
21. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2016. Vol. 16. pp. 3497–3533. DOI: 10.1007/s10518-016-9989-1.
22. Reagor B.G., Stover C.W., Algermissen S.T., Steinbrugge K.V., Hubiak P., Hopper M.G., Marnhard L.M. Preliminary evaluation of the distribution of seismic intensities, The Imperial Valley, California, Earthquake of October 15, 1979. *Geological Survey professional paper 1254*, United States Government Printing Office. 1982. 255 p.
23. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. 1973. 482 p.
24. Sokolov V.Yu. Seismic intensity and Fourier acceleration spectra: revised relationship. *Earthquake spectra*. 2002. Vol. 18. No. 1. pp. 161–187. DOI: 10.1193/1.1469037.
25. Sokolov V., Wenzel F. First step toward realistic ground-motion prediction for SW-Germany. *Proceedings of Workshop “Seismicity patterns in the Euro-Mediterranean Region”*, European Center for Geodynamics and Seismology, November 17-19, 2008, Luxemburg, 2008. pp. 53–68.
26. Tatevossian R.E., Albin P., Camassi R., Mokrusyina N.G., Shebalin N.V., Petrossian A.E. Analyzing and improving supporting data set of the Akhalkalak, December 31, 1899, Earthquake. *Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus*. Ed. D. Giardini, S. Balassanian. Boston. Kluwer Academic Publishers. 1997. Vol. 28. pp. 383–400.
27. The Northridge, California Earthquake of January 17. *Central Reconnaissance Report*. National Center for Earthquake Engineering Research. Ed. J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.

УДК 550.37

DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

Оригинальная статья

## Выявление перекрытых разрывных нарушений методом электротомографии на примере городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан)

М.Ю. Маркин 

ОО «ГеоСтройСистема», Республика Казахстан, 050000, г. Алматы,  
Алатауский район, микрорайон Саялы, дом 41/1,  
e-mail: markin\_maxim@inbox.ru

Статья поступила: 15.03.2024, доработана: 12.04.2024, принята к публикации: 15.04.2024

**Резюме:** Актуальность темы определяется необходимостью выявления разрывных нарушений, скрытых под толщами осадочных пород, и оценки их строения, что является важнейшей задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и одной из основ прогноза землетрясений и сейсмического микрорайонирования. Наблюдаемая в последние годы все более возрастающая активность литосферы связана, в том числе с активизацией тектонических разломов. Выявление подобных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценка их текущей активности является актуальной задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений. Для этого, как показал анализ опубликованной литературы, все чаще применяется метод электротомографии. **Цель работы:** на основе определения кажущегося электрического сопротивления оценить степень дезинтеграции горных пород в зонах разрывных нарушений, проявленных в границах города Усть-Каменогорск, в пределах геодинамически активной Иртышской зоны смятия. **Методы исследования:** Проведены полевые исследования разломных зон методом электротомографии. Выполнен дипольный, шлюмберже и прямой (обратный) трехэлектродный тип установки методом сопротивлений. Наблюденное электрическое поле, нормировано по параметрам установки до такой степени, чтобы кажущееся электрическое сопротивление совпадало с истинным удельным электрическим сопротивлением, называемым кажущимся удельным электрическим сопротивлением. Данный метод позволяет получить характеристики сложно построенной среды и проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. **Результаты исследования:** показано, что использованный метод электротомографии позволяет получить достаточно полное представление о строении разрывного нарушения в условиях отсутствия его выхода на поверхность; установлено, что величина кажущегося электрического сопротивления определяется главным образом типом и степенью тектонической и современной экзогенной разрушенности пород, выполняющих сместитель разлома, и это связано с периодической активизацией изученных разломов и малоамплитудными подвижками по сместителю. Определены основные характеристики простирания разломов, наклона их сместителей, характер горных пород, заполняющих зоны сместителя.

**Ключевые слова:** Иртышская зона смятия, город Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, разломы, электротомография, кажущееся электрическое сопротивление ( $\rho_k$ ).

**Благодарности:** Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской программы: «Оценка сейсмической опасности территорий, областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе».

**Для цитирования:** Маркин М.Ю. Выявление перекрытых разрывных нарушений методом электротомографии на примере городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 107-116. DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

Original paper

# Identification of overlapped ruptures by electrotomography on the example of urban agglomeration Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan)

M.Y. Markin 

Geostroyssystem LLP, 41/1 bld., Sayaly microdistrict, Alatau district,  
Almaty 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: markin\_maxim@inbox.ru

Received: 15.03.2024, revised: 12.04.2024, accepted: 15.04.2024

**Abstract:** The relevance of the topic is determined by the need to identify discontinuous faults hidden under sedimentary rock strata and assess their structure. This is the most important task in zoning territories for seismic hazard and one of the foundations of earthquake prediction and seismic microzoning. The increasing activity of the lithosphere observed in recent years is associated, among other things, with the activation of tectonic faults. The identification of such faults hidden under powerful sedimentary rock strata and the assessment of their current activity is an urgent task when zoning territories for seismic hazard and the basis for earthquake prediction. For this purpose, as the analysis of the published literature has shown, the method of electrotomography is increasingly used. **The purpose of the work:** based on the determination of the apparent electrical resistance, to assess the degree of disintegration of rocks in the zones of discontinuous disturbances manifested within the boundaries of the city of Ust-Kamenogorsk, within the geodynamically active Irtysh crushing zone. **Research methods:** Field studies of fault zones by electrotomography were carried out. The dipole, Schlumberger and direct (reverse) three-electrode type of installation by the resistance method was performed. The observed electric field, normalized according to the installation parameters to such an extent that the apparent electrical resistance coincides with the true electrical resistivity, called the apparent electrical resistivity. This method allows us to obtain the characteristics of a complexly constructed environment and interpret it within the framework of two-dimensional models. **The results of the study:** it is shown that the electrotomography method allows to obtain a fairly complete picture of the structure of the rupture in the absence of its exit to the surface; it is established that the magnitude of the apparent electrical resistance is determined mainly by the type and degree of tectonic and modern exogenous destruction of rocks performing a fault displacement, and this is due to the periodic activation of the studied faults and low-amplitude progress on the displacement. The main characteristics of the fault strike, the slope of their displacements, and the nature of the rocks filling the displacement zones are determined.

**Keywords:** Irtysh crushing zone, Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan, faults, electrotomography, apparent electrical resistivity ( $\rho_k$ ).

**Acknowledgements:** The article was prepared within the framework of the research program: "Assessment of seismic hazard in the territories of regions and cities of Kazakhstan on a modern scientific and methodological basis".

**For citation:** Markin M.Yu. Identification of overlapped ruptures by electrotomography on the example of urban agglomeration Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 107-116. DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

## Введение

Проявившиеся в последнее время серии разрушительных землетрясений в Турции и Сирии демонстрируют все более возрастающую активность литосферы, связанную, в том числе с активизацией тектонических разломов. Выявление подобных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценка их текущей

активности является актуальной задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений [Conti et al., 2021]. Одним из таких потенциально опасных районов проявления землетрясений тектонической природы является город Усть-Каменогорск (Республика Казахстан), расположенный в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС) [Маркин, 2023].

Целью данной работы является изучение строения разрывных нарушений методом электротомографии с использованием геологических данных на трех эталонных участках, соответствующих трем основным структурным подзонам Иртышской зоны смятия (рис. 1).

### Материал и методы

Объектом исследования являются разрывные нарушения на территории г. Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). В современных и в перспективных границах городская агломерация располагается полностью в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС) – одной из крупнейших тектонических структур западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса [Ермолов, Полянский, 2008; Буслев, 2011; Семинский, Зарипов, 2016 и др.]. Иртышская зона смятия представляет собой классический пример региональной сдвиговой зоны и представляет собой глубинный разлом шириной от 1,5 до 20 км, протягивающийся по территории России, Восточного Казахстана (г. Рубцовск, г. Усть-Каменогорск) в Китай (г. Фуюн) и далее в Монголию более чем на 1000 км. По особенностям внутреннего строения ИЗС подразделяется на 3 подзоны: Северо-Восточную, Осевую и Юго-Западную (рис. 1).

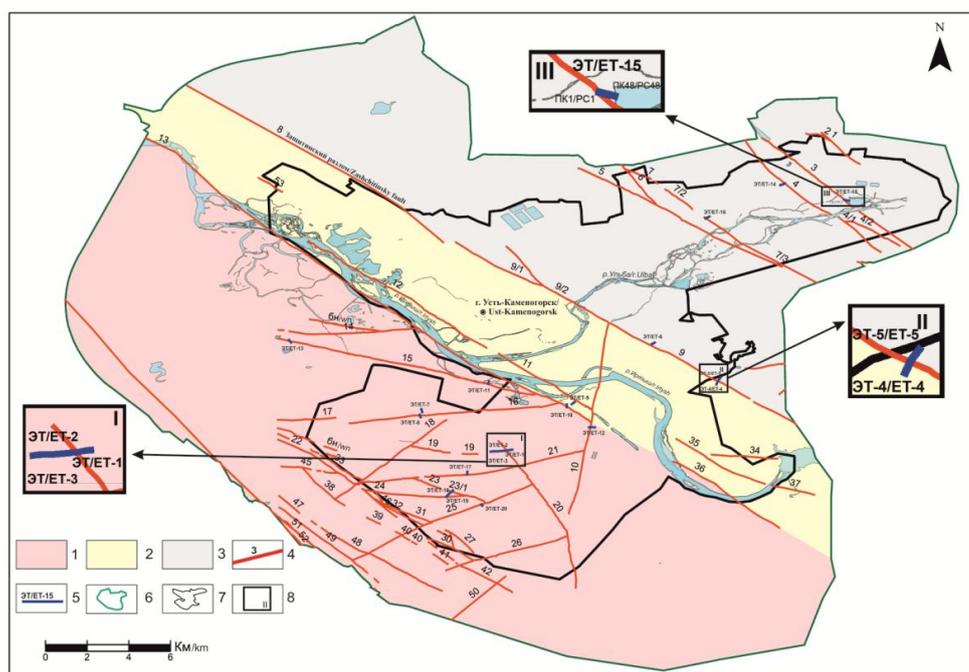


Рис. 1. Схема района работ: 1–3 – Иртышская зона смятия: 1 – Юго-Западная подзона; 2 – Осевая подзона; 3 – Северо-Восточная подзона; 4 – разрывные нарушения и их номера; 5 – профили электротомографических исследований и их номера; 7 – кадастровая граница г. Усть-Каменогорск, 8 – перспективная граница г. Усть-Каменогорск, 9 – участки исследований и их номера /  
 Fig. 1. Scheme of the work area: 1–3 – Irtysh crumpling zone: 1 – Southwestern subzone; 2 – Axial subzone; 3 – Northeastern subzone; 4 – discontinuous faults and their numbers; 5 – profiles of electrotomographic studies and their numbers; 7 – cadastral boundary of Ust-Kamenogorsk, 8 – perspective border of Ust-Kamenogorsk, 9 – research sites and their numbers

Основные разломы (Усть-Каменогорский, Защитинский и др.) имеют северо-западное простирание. Вдоль Усть-Каменогорского разлома протягивается русло р. Иртыш. Среди разрывных нарушений наиболее широкое распространение имеют продольные относительно ИЗС разломы, которые в комбинации с подчиненными поперечно-диагональными тектоническими разрывами обуславливают линейный или линзовидный складчато-блоковый характер ИЗС.

О проявлении современной геодинамической активности разломов свидетельствуют многочисленные балки, овраги, береговые уступы рек, фиксирующие изменения положения базисов эрозии, а также результаты недавних исследований соседних регионов [Шалагинов, Неведрова, 2015; Кузина и др., 2023; Санчаа, Неведрова, 2023 и др.]. На это же указывают продольные и поперечные профили рек Иртыша и Ульбы, изобилующие пережимами и сужениями, а также весьма неравномерная мощность аллювиальных отложений вследствие блокового строения подстилающих горных пород. На негативное влияние геодинамических процессов на геозкологическое состояние территорий неоднократно обращалось внимание в работах [Sengör et al., 1993; Маркин и др., 2016; Чотчаев и др., 2020; Заалишвили и др., 2022].

Работы проводились методом электротомографии (ЭТ). Выполнен дипольный, шлюмберже и прямой (обратный) трехэлектродный тип установки методом сопротивлений. Наблюдаемое электрическое поле, нормированное по параметрам установки до такой степени, чтобы кажущееся сопротивление совпадало с истинным удельным сопротивлением, называется кажущимся удельным электрическим сопротивлением ( $\rho_k$ ). Кажущееся удельное электрическое сопротивление рассчитывается исходя из разности потенциалов между приемными электродами тока в питающей линии и геометрического коэффициента установки. Таким образом, кажущееся удельное электрическое сопротивление зависит не только от геометрических параметров аномальных зон и их характеристик удельного электрического сопротивления, но и от параметров установки измерения. Метод ЭТ позволяет исследовать сложно построенные среды и проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. Различные варианты использования ЭТ подробно описаны в работах [Griffiths, Barker, 1993; Loke, Barker, 1995; Ritz et al., 1999; Тарасов и др., 2015; Парада, 2018; Бобачев и др., 2006; Бобачев, Шевнин, 2022; и др.]. При этом вынос электрода «бесконечность» производился на расстояние 5 м и более (до 500 м) перпендикулярно линии профиля. Во избежание индуктивных наводок в приемной линии использовался режим измерений на частоте 1,22–4,88 Гц с уровнем полезного сигнала не менее 5 мВ. Электротомографические профили выполнены с использованием 48-канальной установки и шагом между электродами 5 м. Максимальная длина расстановки, в зависимости от геоэлектрических условий и линейных размеров участков составила 235 м. Глубина исследования от 35 до 60 м. Работы были выполнены многоэлектродной электро-разведочной станцией СКАЛА 48К12. Привязка точек начала и конца профилей ЭТ осуществлялась с помощью спутникового приемника Garmin GPS MAP. Инверсия данных электротомографии производилась с применением программного обеспечения ZondRes2D.

## Результаты и обсуждение

Согласно рис. 1 участок I расположен в пределах Юго-Западной подзоны ИЗС. На данном участке выполнен профиль электротомографии общей протяженностью 690 метров, пересекающий разлом под № 20. Согласно полевым наблюдениям и анализу космических снимков разлом № 20 является сдвигом, его протяженность составляет 9379 км, азимут падения – 221°, угол падения – 77°.

Томографический разрез участка по профилю 1 (ЭТ-1 на рис. 1) представлен двумя геоэлектрическими слоями (рис. 2). Первый слой выделен с поверхности, залегает до глубины 10–15 м и представлен суглинками лессовидными и глинами. Значения кажущегося электрического сопротивления ( $\rho_k$ ) слоя составили от 10 до 60 Ом·м. Второй геоэлектрический слой подстилает первый и прослеживается до глубины 35–45 м. Значения  $\rho_k$  слоя составили 90–200 Ом·м. Слой представлен дресвяно-щебенистым грунтом с суглинистым, супесчаным заполнителем.

Геоэлектрический разрез по профилю 2 (ЭТ-2) представлен тремя геоэлектрическими слоями (рис. 2). Первый слой выделен с поверхности в левой части профиля, залегает до глубины 15–20 м, представлен суглинками лессовидными и глинами. Значения  $\rho_k$  слоя составили от 10 до 60 Ом·м. Второй геоэлектрический слой залегает с поверхности по всей длине профиля и подстилает первый слой в левой части профиля. Мощность слоя меняется от 20 до 40 м. Значения  $\rho_k$  слоя составили 90–400 Ом·м. Слой предположительно представлен дресвяно-щебенистым материалом с суглинистым и супесчаным заполнителем. В районе 70 пикета профиля с глубины 15–20 м выделен третий геоэлектрический слой со значением  $\rho_k$  600–1400 Ом·м. Слой подстилает дресвяно-щебенистые отложения и представлен выветрелыми, трещиноватыми гранитами и гранодиоритами. Мощность слоя составила около 30–35 м.

Геоэлектрический разрез по профилю 3 (ЭТ-3) представлен тремя геоэлектрическими слоями (рис. 2). Первый слой выделен с поверхности, залегает до глубины 7–10 м, предположительно представлен дресвяно-щебенистым материалом с суглинистым, супесчаным заполнителем. Значения кажущегося электрического сопротивления ( $\rho_k$ ) слоя составили от 200 до 600 Ом·м. Второй геоэлектрический слой подстилает первый слой. Мощность второго слоя меняется от 10 до 40 м, значения  $\rho_k$  составили 600–1400 Ом·м. Слой представлен выветрелыми, трещиноватыми гранитами и гранодиоритами. Ниже по разрезу выделен третий геоэлектрический слой. В левой части профиля кровля третьего слоя залегает с глубины 20–25 м и погружается к середине профиля до глубины 50–60 м. Значения  $\rho_k$  слоя находятся в диапазоне от 1800 до 3000 Ом·м. Слой представлен слабо выветрелыми гранитами и гранодиоритами.

На электротомографическом разрезе по профилю 2 отмечается довольно контрастный переход между породами с ненарушенной структурой и раздробленным материалом, выполняющим сместитель разлома. Мощность такой зоны по горизонтали составляет 70 метров.

Согласно рис. 1 участок II расположен в пределах Осевой подзоны ИЗС. На данном участке выполнено два профиля электротомографии 4 и 5 (ЭТ-4 и ЭТ-5) общей протяженностью 460 метров. Профили электротомографии выполнены с перекрытием на конечных электродах, имеют общее направление с северо-востока на юго-запад, вкрест простирания разрывного нарушения № 9. Согласно данным полевым наблюдениям и анализа космоснимков, общая протяженность разлома порядка 8924 км,

в кинематическом отношении разлом представлен сдвигом с азимутом простирания – 220°, азимутом падения – 130°, углом падения – 75°.

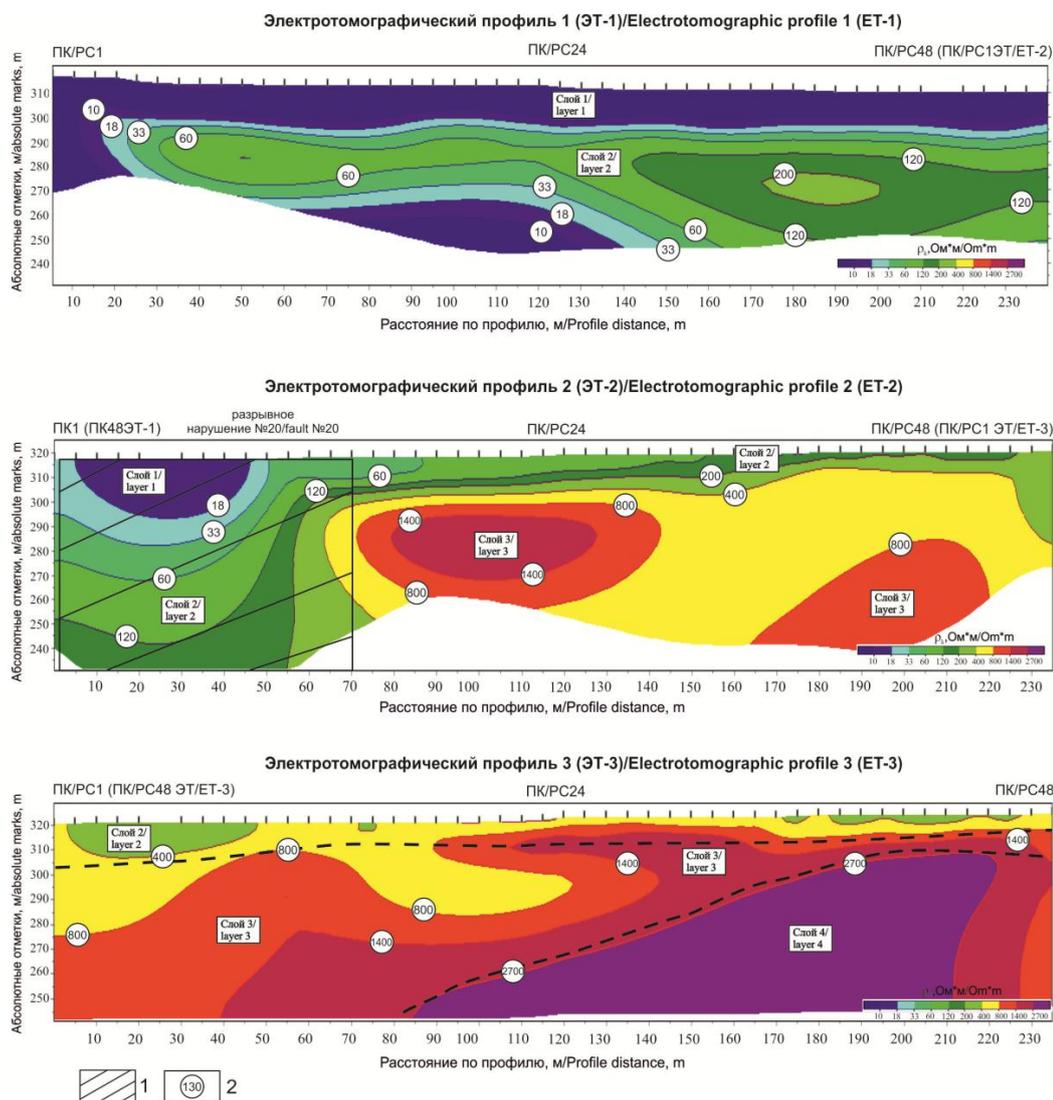


Рис. 2. Результаты электротомографических исследований в пределах эталонного участка I: числа в кружках – значение кажущегося электрического сопротивления в Ом·м; косая штриховка на профиле 2 – зона разрывного нарушения /

Fig. 2. The results of electrotomographic studies within the reference area I: the numbers in circles are the value of the apparent electrical resistance in  $\text{Om} \cdot \text{m}$ ; oblique hatching on profile 2 is the zone of discontinuity

Геоэлектрический разрез по профилям 4 и 5, согласно рис. 3, представлен двумя геоэлектрическими слоями. Первый слой выделен с поверхности до глубины 5–10 м и простирается по латерали до середины профиля 5 (ЭТ–5); представлен дресвяно-щебенистым грунтом с суглинистым, супесчаным заполнителем. Значения  $\rho_k$  слоя составили от 250 до 500 Ом·м. Второй геоэлектрический слой подстилает первый слой, в центральной и левой части профиля 5 (ЭТ–5); выделен с поверхности. Глубина залегания слоя прослеживается до 60 м. Значения  $\rho_k$  слоя составили 600–1400 Ом·м. Слой представлен выветрелыми, трещиноватыми гранитами, гранодиоритами.

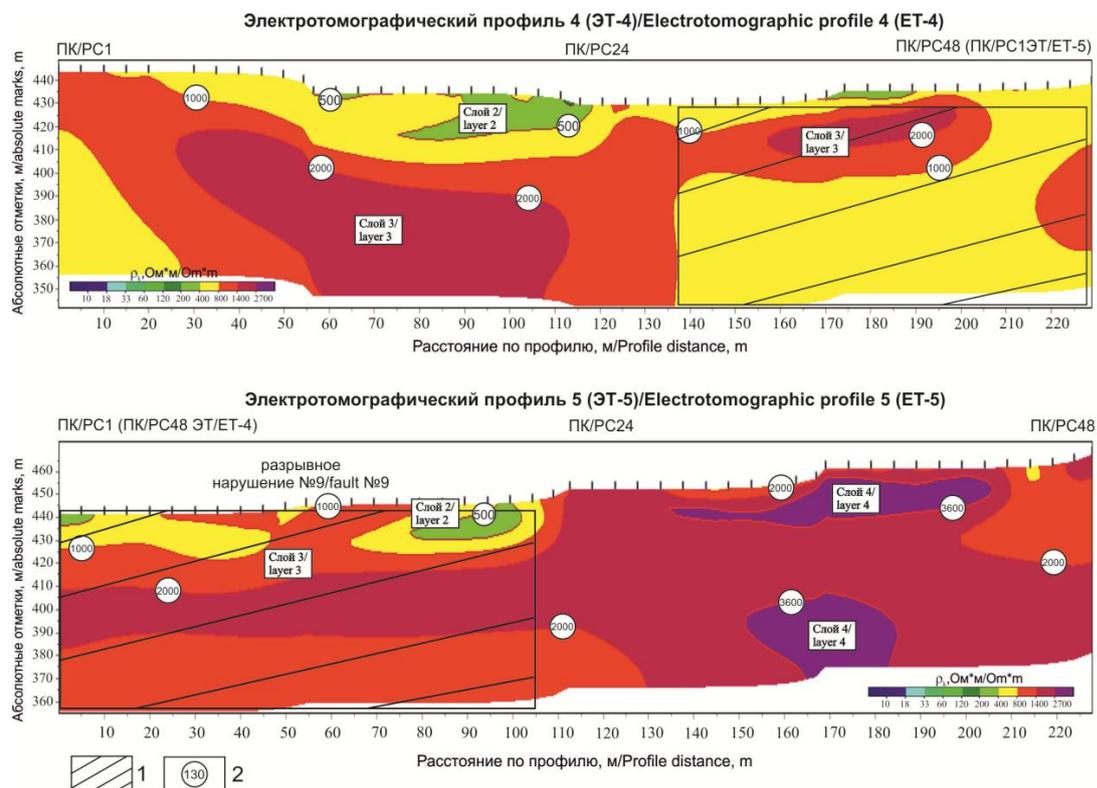


Рис. 3. Результаты электротомографических исследований в пределах эталонного участка II: пояснения смотрите на рис. 2 /

Fig. 3. The results of electrotomographic studies within the reference area II: for explanations, see Fig. 2

В левой части профиля 5 выделены высокоомные области со значениями  $\rho_k$  от 2500 до 3800 Ом·м, представленные менее трещиноватыми, более прочными гранитами и гранодиоритами. Протяженность аномальной области высокоомного участка в пределах разрывного нарушения № 9 составляет до 195 м.

Участок III расположен в границах северо-восточной подзоны ИЗС (рис. 1). На данном участке выполнен профиль электротомографии ЭТ–15, расположенный вкрест простирания разрывного нарушения №3 (рис. 4).

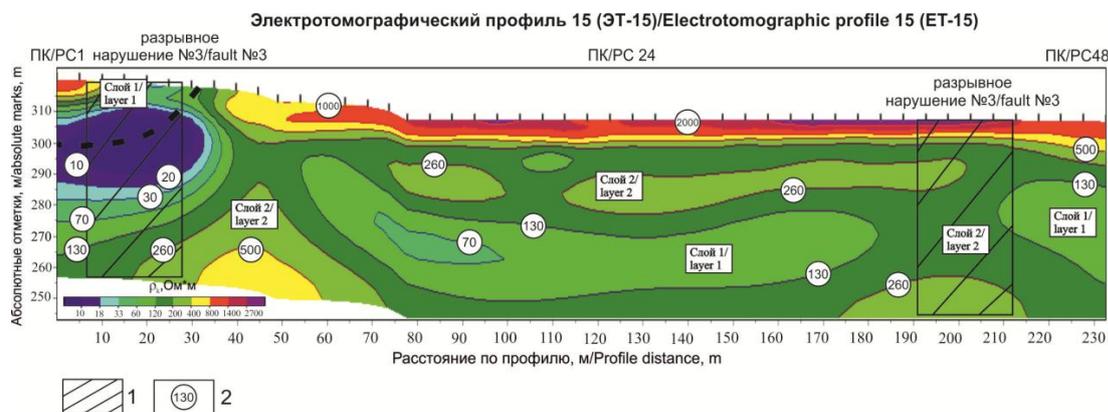


Рис. 4. Результаты электротомографических исследований в пределах эталонного участка III: пояснения смотрите на рис. 2 /

Fig. 4. The results of electrotomographic studies within the reference area III: for explanations, see Fig. 2

Согласно данным полевых маршрутов и анализа космоснимков общая протяженность разлома порядка 9348 км, по кинематическому типу разлом отнесен к сдвигу. Азимут простирания разлома – 300°, азимут падения – 210°, угол падения – 72°.

Значения  $\rho_k$  по профилю 15 (ЭТ–15) составляют от 130 до 450 Ом·м. Согласно геологической карте данного района с поверхности сместитель разлома выполнен галечниковыми отложениями с супесчаным заполнителем. Местами по разрезу выделены низкоомные области со значением  $\rho_k$  15–25 и 40–80 Ом·м. Области с такими значениями  $\rho_k$  предположительно связаны с заполнением сместителя разлома суглинистым и глинистым материалом. Юго-Западная ветвь разрывного нарушения № 3 в интервале от ПК6 до ПК29 характеризуется низкими значениями  $\rho_k$ , что обусловлено наличием в сместителе разлома суглинистого материала. Для Северо-Восточной его ветви в районе ПК 39 – 45 характерны более высокие значения  $\rho_k$ .

### Выводы

1. Малоуглубленная электротомография, использованная в пределах г. Усть-Каменогорска, позволила изучить особенности проявления и отражения разрывных нарушений в современных рыхлых отложениях.

2. Изученные разрывные нарушения характеризуются в основном северо-западным простиранием и крутыми углами наклона сместителя.

3. Горные породы в зонах разрывных нарушений раздроблены до состояния щебня, дресвы и глины с включениями новообразованных кварцево-кальцитовых жил и прожилков.

4. Величина кажущегося электрического сопротивления определяется главным образом типом и степенью тектонической и современной экзогенной разрушенности пород, выполняющих сместитель разлома, что связано с периодической активизацией изученных разломов и малоамплитудными подвижками по сместителю.

5. Используемый метод электротомографии позволяет получить достаточно полное представление о строении разрывного нарушения в условиях отсутствия его выхода на поверхность.

### Литература

1. Бобачев А.А., Шевнин В.А. Влияние приповерхностного слоя геологического разреза на результаты методов сопротивлений и вызванной поляризации. // Геофизика. – 2022. – № 6. – С. 43–48. DOI: 10.34926/geo.2022.43.40.006.

2. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.

3. Буслов М.М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов. // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. № 1. – С. 66–90.

4. Ермолов П.В., Полянский Н.В. Основные этапы тектонического развития Иртышской зоны смятия: по данным изотопного анализа циркона методом ШРИМП. // Геология и охрана недр. – 2008. – № 3. Вып. 28. – С. 17–24.

5. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. Инструментальная мера сейсмической интенсивности по данным сети К-NET. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 2. – С. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340.

6. Кузина З.Я., Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием

трехмерных программных средств. // Вестник МГТУ. – 2023. – Т. 26. № 2. – С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169.

7. Маркин М.Ю. Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.0038.

8. Маркин М.Ю., Парада С.Г., Шишкалов И.Ю. Состав и строение Малкинского ультрабазитового массива по результатам переинтерпретации аэромагнитных данных (Кабардино-Балкарская Республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 3. – С. 98–110.

9. Парада С.Г. Выявление признаков золотого оруденения на основе выделения фоновых и локальных составляющих электрических полей в Восточной части Передового хребта (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 126–40.

10. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение Гусиноозерской и сопредельных впадин Западного Забайкалья по результатам интерпретации архивных данных ВЭЗ. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 3. Вып. 55. – С. 59–69. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-59-69.

11. Семинский К.Ж., Зарипов Р.М. Нарушенность скального массива и поле удельного электрического сопротивления в близповерхностной части земной коры тектонически активных регионов (на примере Западного Прибайкалья). // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – Т. 57. № 4. – С. 30–42.

12. Тарасов В.А., Емкужев М.С., Парада С.Г., Столяров В.В. Геофизические методы при поисках золоторудной минерализации на флангах Тырнаузского рудного узла. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 1. – С. 109–117.

13. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.0059.

14. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение участка регулярных наблюдений за электромагнитными параметрами в Чуйской впадине Горного Алтая. // Вестник Алтайской науки. – 2015. – № 2. – С. 310–318.

15. Conti L., Picozza P., Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – No. 9. – Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766.

16. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. // *Journal of Applied Geophysics*. – 1993. – Vol. 29. – pp. 211–226.

17. Loke M.H., Barker R.D. Least-Squares Deconvolution of Apparent Resistivity Pseudosections. // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60. No. 6. – pp. 1682–1690.

18. Ritz M., Robain H., Pervago E. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of nearsurface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. // *Geophysical Prospecting*. – 1999. – Vol. 47. No. 2. – pp. 85–101.

19. Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altiid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. // *Nature*. – 1993. – Vol. 364. – pp. 299–307.

## References

1. Bobachev A.A., Shevnin V.A. Near-surface layer effect of a geological section on results of resistivity and induced polarization methods. *Geophysics*. 2022. No. 6. pp. 43–48. DOI: 10.34926/geo.2022.43.40.006. (In Russ.)

2. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. Electrotomography by the method of resistance and induced polarization. *Instruments and systems of exploration geophysics*. 2006. No. 2. pp. 14–17. (In Russ.)

3. Buslov M.M. Tectonics and geodynamics of the Central Asian Foldbelt: the role of Late Paleozoic large-amplitude strike-slip faults. *Russian Geology and Geophysics*. 2011. T. 52. No. 1. pp. 52–71. (In Russ.)

4. Ermolov P.V., Polyansky N.B. The main stages of the tectonic development of the Irtysh crushing zone: according to the isotope analysis of zircon by the SHRIMP method. *Geology and bowels of the earth*. 2008. No. 3. Issue 28. pp. 17–24. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. Instrumental measure of seismic intensity according to K-NET data. *Sustainable development of mountain areas*. 2022. Vol. 14. No. 2. pp. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340. (In Russ.)

6. Kuzina Z.Ya., Nevedrova N.N., Sanchaa A.M. Structural features of the upper part of the Uymon depression section of the Altai Mountains according to electrotomography data using three-dimensional software tools. *Vestnik of MSTU*. 2023. Vol. 26. No. 2. pp. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-260-169. (In Russ.)

7. Markin M.Yu. Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.0038. (In Russ.)

8. Markin M.Yu., Parada S.G., Shishkalov I.Yu. Composition and structure of the Malkin ultrabasite massif based on the results of reinterpretation of aeromagnetic data (Kabardino-Balkarian Republic). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 3. pp. 98–110. (In Russ.)

9. Parada S.G. Revealing indications of golden mineralization on the base of isolation of the background and local components of electric fields at the eastern part of the foremost ridge (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. No. 4. pp. 126–40. (In Russ.)

10. Sanchaa A.M., Nevedrova N.N. Geoelectrical structure of the Gusinozerskaya and adjacent depressions of Western Transbaikalia based on archival data vertical electrical soundings interpretation. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2023. No. 3. Issue 55. pp. 59–69. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-59-69. (In Russ.)

11. Seminskiy K.Zh., Zaripov R.M. Rock massif fracturing and the field of specific electrical resistivity in the near-surface Earth crust in tectonic active regions (on example of West Pribaikalie). In: *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2016. Vol. 57. No. 4. pp. 30–42. DOI: 10.21285/0130-108X-2016-57-4-30-42. (In Russ.)

12. Tarasov V.A., Emkuzhev M.S., Parada S.G., Stolarov V.V. Geophysical methods in exploration of gold-bearing mineralization within the flanks of the Tynnyauz ore cluster. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Geology*. 2015. No. 1. pp. 109–117. (In Russ.)

13. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005. (In Russ.)

14. Shalaginov A.E., Nevedrova N.N. The geoelectric structure of the site of regular observations of electromagnetic parameters in the Chui depression of the Altai mountains. *Bulletin of Altai Science*. 2015. No. 2. pp. 310–318. (In Russ.)

15. Conti L., Picozza P., Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. *Frontiers in Earth Science*. 2021. No. 9. Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766.

16. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*. 1993. Vol. 29. pp. 211–226.

17. Loke M.H., Barker R.D. Least-Squares Deconvolution of Apparent Resistivity Pseudosections. *Geophysics*. 1995. Vol. 60. No. 6. pp. 1682–1690.

18. Ritz M., Robain H., Pervago E. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of nearsurface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*. 1999. Vol. 47. No. 2. pp. 85–101.

19. Sengőr A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*. 1993. Vol. 364. pp. 299–307.

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC.2024.94.67.009

Оригинальная статья

## Позднекарбоновые гипабиссальные граниты и лейкограниты Большого Кавказа: вопросы петрогенезиса

В.М. Газеев <sup>1,2</sup>, А.Г. Гурбанов <sup>1,2</sup>, И.А. Кондрашов <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии РАН, лаборатория Петрографии, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: ag.gurbanov@yandex.ru;

<sup>2</sup> Владикавказский научный центр Российской академии наук, Россия, 363110, с. Михайловское, ул. Вильямса 1, e-mail: vik.gaz.54@mail.ru

Статья поступила: 18.03.2024, доработана: 31.05.2024, принята к публикации: 03.06.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Изучение палеозойских гранитов Большого Кавказа является важной проблемой в связи с тем, что с ними в регионе связаны полиметаллическое (Эльбрусское) месторождение, а также серия молибденовых, вольфрамовых, урановых и золоторудных месторождений и рудопроявлений. Геохимическое изучение гранитов необходимо также для уточнения особенностей геодинамического развития региона. **Целью исследования** является получение аналитических данных, уточнение геодинамической позиции и рудной специализации гипабиссальных гранитов и лейкогранитов. **Объектами исследований** являлись позднекарбоновые гранитоиды «кубанского» и «пскентского» комплексов, распространенные на Центральном и Западном Кавказе. **Методы исследования** включали: изучение состава отобранных образцов количественными XRF, ICP-MS методами; их петрографическое описание, расчеты геохимических характеристик, анализ дискриминационных диаграмм. **Результаты исследования.** Установлено, что граниты и лейкограниты представлены известково-щелочными, умеренно- и высококальциевыми, разновидностями. Показано, что они являются, постколлизийными, железистыми гранитами с характеристиками близкими к гранитам А-типа. Формирование пород происходило в геодинамических условиях активной континентальной окраины. Установлено, что лейкограниты «кубанского» комплекса относятся к подтипу А2. Их расплавы образованы при плавлении корового субстрата (P-8кбар) в условиях теплового потока зоны Транскавказского поперечного поднятия. Граниты «пскентского» комплекса относятся к подтипу А1. Образование их расплавов предположительно обусловлено термальной релаксацией нижней части коры (P-16кбар) и плавлением существенно эклогитового протолита. Отмечено, что с гранитами и лейкогранитами зоны Передового хребта Большого Кавказа ассоциирует полиметаллическое оруденение. Показано, что для пород характерны повышенные концентрации сурьмы.

**Ключевые слова:** петрография, геохимия, минерагения, граниты А-типа, полиметаллические месторождения, геодинамика, Транскавказское поднятие, Большой Кавказ.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках Базовой темы Лаборатории Петрографии ИГЕМ РАН «Петрология магматических комплексов для реконструкций геодинамических режимов формирования Восточно-Европейского кратона» (рег. №№ FMMN-2024-0014, 124022400143-9) и при финансовой поддержке НИОКТР КНИО ВЦ РАН (рег. № 122041100269-2).

**Для цитирования:** Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Позднекарбоновые гипабиссальные граниты и лейкограниты Большого Кавказа: вопросы петрогенезиса. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 117-130. DOI: 10.46698/VNC.2024.94.67.009

DOI: 10.46698/VNC.2024.94.67.009

Original paper

# Late Carboniferous hypabyssal granites and leucogranites of the Greater Caucasus: issues of petrogenesis

V.M. Gazeev<sup>1,2</sup>, A.G. Gurbanov<sup>1,2</sup>, I.A. Kondrashov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geology of Ore Deposits of Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Petrography, 35 Staromonetny lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: gurbanov@igem.ru;

<sup>2</sup> Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 1 Williams Str., Mikhailovskoye village 363110, Russian Federation, e-mail: gazeev@igem.ru

Received: 18.03.2024, revised: 31.05.2024, accepted: 03.06.2024

**Abstract: Relevance.** The study of Paleozoic granites of the Greater Caucasus is an important problem due to the fact that polymetallic (Elbrus) deposits are associated with them in the region, as well as a series of molybdenum, tungsten, polymetallic, uranium and gold ore manifestation. Geochemical study of granites is also necessary to clarify the features of the geodynamic development of the region. **The aim of the study** is to obtain analytical data, clarify the geodynamic position and ore specialization of hypabyssal granites and leucogranites. The objects of research were the late carboniferous granitoids of the “Kuban” and “Pskent” complexes, common in the Central and Western Caucasus. **Research methods** included: the study of the composition of the selected samples by quantitative XRF, ICP-MS methods; their petrographic description, calculations of geochemical characteristics, analysis of discrimination diagrams. **Results.** It has been established that granites and leucogranites are represented by calcareous-alkaline, moderate- and high-potassium varieties. It is shown that they are post-collisional, ferruginous granites with characteristics close to A-type granites. The formation of rocks took place in the geodynamic conditions of the active continental margin. It has been established that the granites of the Kuban complex belong to the A2 subtype. Their melts are formed during melting of the crustal substrate ( $P-8$  kbar) under the conditions of the heat flow of the Trans-Caucasian transverse uplift zone. The granites of the “Pskent” complex belong to subtype A1. The formation of their melts is presumably due to thermal relaxation of the lower part of the crust ( $P-16$  kbar) and melting of a substantially eclogitic protolith. It is noted that polymetallic mineralization is associated with granites and leucogranites of the zone of the Advanced Ridge of the Greater Caucasus. It is shown that the rocks are characterized by increased concentrations of antimony.

**Keywords:** petrography, geochemistry, minerageny, A-type granites, polymetallic deposits, geodynamics, Trans-Caucasian uplift zone, Greater Caucasus.

**Acknowledgments:** *The work was performed within the framework of the Basic Topic of the Laboratory of Petrography of IGEM RAS “Petrology of magmatic complexes for reconstructions of geodynamic regimes of the formation of the East European craton” (reg. No.No. FMMN-2024-0014, 124022400143-9) and with the financial support of the NIOKTR KNIO VSC RAS (reg. No. 122041100269-2).*

**For citation:** Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Late Carboniferous hypabyssal granites and leucogranites of the Greater Caucasus: issues of petrogenesis. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 117-130. DOI: 10.46698/VNC.2024.94.67.009

## Введение

Петролого-геохимическое изучение палеозойских гранитоидных образований Большого Кавказа (БК) является важной проблемой. Ее актуальность определяется тем, что с палеозойскими гранитами в регионе БК связаны: полиметаллические, вольфрамовые и молибденовые месторождения, урановые и золото-мышьяковые рудопроявления. Целью исследования является изучение позднекарбонových гипабиссальных лейкогранитов «кубанского» комплекса (КК), выделяемых на разномасштабных геологических картах Центрального Кавказа с 1970-х годов. Уточнение петро-геохимического типа гранитов, условий генерации расплавов и минерагенической специализации, а также их геохимическое сравнение с гипабиссальными гранитоидами «пскентского» комплекса. Объектами для исследования выбраны лейкограниты КК распространенные в Бечасынской и Тырнауз–Джентинской (Передового хребта) зонах БК в долинах и междуречьях Кестанты–Баксан–Малка–Кубань–Даут. Гранит-порфиры слагают дайки протяженностью от сотен метров до 3,0–5,0 км, реже образуют тела вытянутой формы протяженностью до 2 км, и мощностью до 450 м. Позднекарбонový возраст гранитов КК обосновывается на геологических данных. Их тела прорывают отложения среднего карбона и трансгрессивно перекрываются конгломератами раннепермской красноцветной толщи. В бассейнах рек Кубань, Даут, Худес с гранитами КК ассоциируют Эльбрусское полиметаллическое месторождение и рудопроявления (рис. 1) [Вольфсон, Лезин, 1960]. Для сравнения с лейкогранитами КК опробованы гранитоиды распространенные на Западном Кавказе в долинах рек Пскент, Бескес, Андрюк «пскентского» (ПК) гипабиссального монцодиорит–гранитного комплекса. Здесь они образуют пластообразные тела, штоки и дайки мощностью от первых метров и до нескольких сотен метров и протяженностью до 1 км среди отложений андрюкской свиты (Тоханский покров) Передового хребта. Возраст пород, согласно значениям датировок К-Аг методом, варьирует в интервалах 299–315–326±5 млн лет и считается среднекарбонovým [Лаврищев и др., 2000].

## Материал и методы его исследования

Изучена коллекция образцов гранит-порфиров, собранная в 2017–2023 гг. по долинам рек Кестанты, Шаукол, Худес, Джаланкол, Даут, Бескес, Андрюк. Аналитические данные получены в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика» методами: рентгенофлуоресцентного анализа (*XRF*) на спектрометре «Респект-100» (22 пробы) и спектроскопии с индукционно-связанной плазмой (*ICP-MS*) на масс – спектрометре *X-Series II* (19 проб). Контроль точности анализов осуществлялся российскими и международными стандартами. Дополнительно использованы силикатные анализы гранитов КК (24 пробы) и гранитоидов ПК (11 проб) выполненные в 1984–1991 годах в химической лаборатории ФГУП «Кавказгеолсъемка». Изучение образцов включало петрографическое описание, расчеты геохимических характеристик, построение и анализ различных диаграмм.

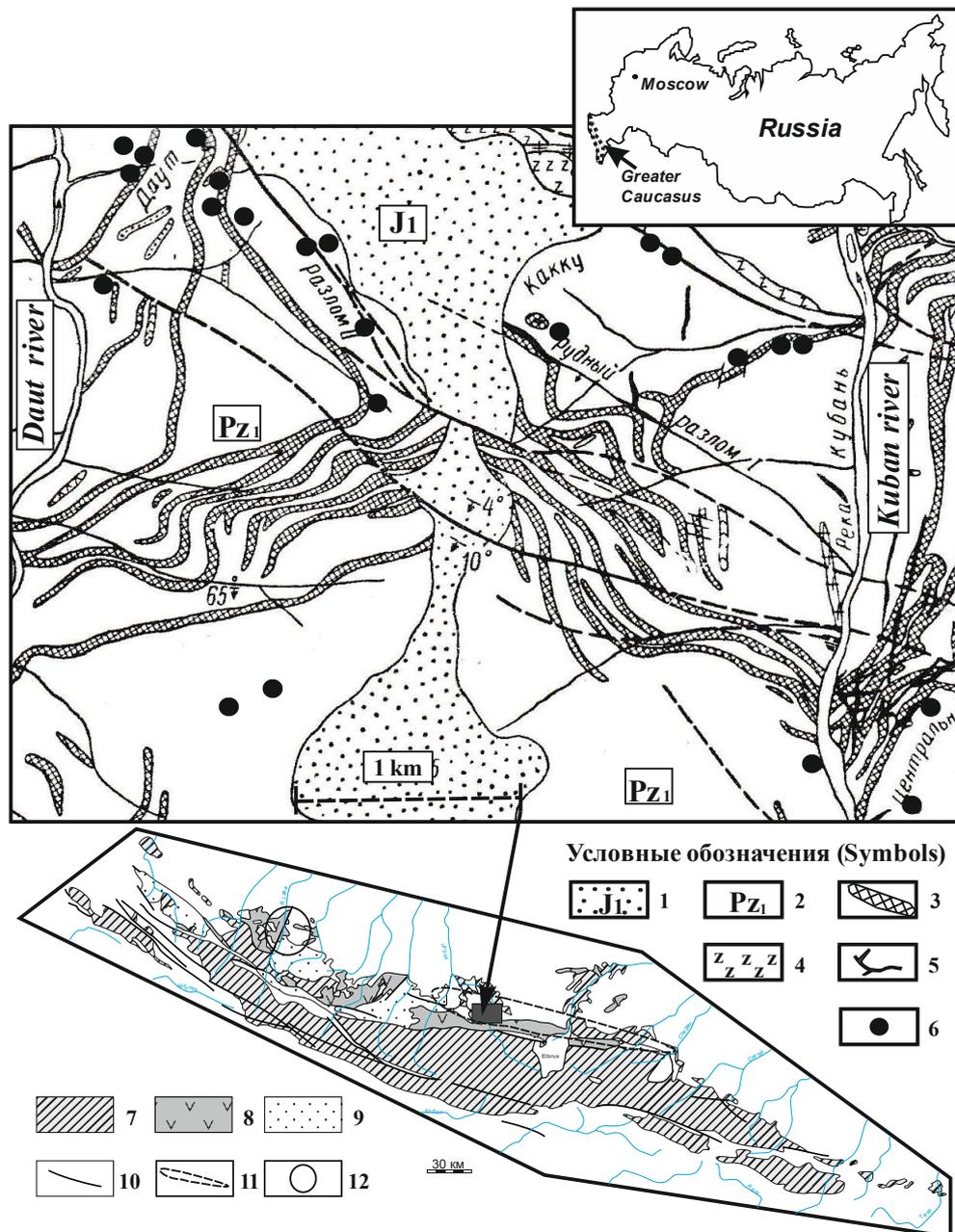


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Эльбрусского рудного поля с телами гранитов «кубанского» комплекса (Вольфсон, Лезин, 1960).

Условные обозначения: 1 – Раннеюрские песчаники. 2 – Палеозойские кристаллические сланцы.

3 – Граниты кубанского комплекса. 4 – Серпентиниты. 5 – Свинцово-цинковые рудные жилы.

6 – Свинцово-цинковые рудопроявления, 7 – породы доальпийского фундамента, 8 – среднепалеозойские

вулканогенно-осадочные породы Передового хребта, 9 – верхнепалеозойские породы Передового хребта,

10 – геологические границы, 11 – область развития лейкогранитов кубанского комплекса,

12 – область развития гранитоидов пскенского комплекса.

Fig. 1. Schematic geological map of the Elbrus ore field with granite bodies of the Kuban complex (Wolfson, Lezin, 1960).

Legend: 1 – Early Jurassic sandstones. 2 – Paleozoic crystalline shales.

3 – Granites of the Kuban complex. 4 – Serpentinites. 5 – Lead-zinc ore veins.

6 – Lead-zinc ore occurrences, 7 – rocks of the pre-Alpine basement, 8 – Middle Paleozoic volcanogenic-sedimentary rocks of the Peredovoi Range,

9 – Upper Paleozoic rocks of the Peredovoi Range 10 – geological boundaries, 11 – area of development of leucogranites of the Kuban complex,

12 – area of development of granitoids of the Pskenskiy complex.

## Полученные результаты

Согласно классификационной диаграмме  $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$  (рис. 2) фигуративные точки (ФТ) составов пород КК группируются в полях лейкогранитов ( $SiO_2 > 73\%$ ), низкой, нормальной  $6 < Na_2O+K_2O < 8\%$  и умеренной щелочности. Реже они располагаются в поле гранитов и в единичном случае гранодиоритов. Породы ПК представлены аналогичными лейкогранитами разной щелочности, а также умеренно щелочными диоритами, гранитами и гранодиоритами. В составе обоих комплексов встречаются породы с низкой щелочностью, расположенные ниже границы поля магматических пород, измененных в результате автометасоматических процессов. Лейкограниты и граниты КК встречаются совместно и образуют единую группу светло- либо розовато-серых пород, имеющих порфиоровую и гранофиоровую структуру. Вкрапленники представлены кварцем, серицитизированным олигоклазом, реже калиевым полевым шпатом (КПШ), редко мусковитом. Основная масса (ОМ) гипидиоморфнозернистая и кристаллобластовая, сферолитовая и микрографическая. Состоит она из кварца, полевого шпата, мусковита. Иногда в ОМ встречаются кварц-карбонатные прожилки и хлорит. Кристаллизация ОМ начиналась с образования сферолитов или гранофиловых агрегатов, нарастающих на вкрапленники кварца, и завершалась образованием микрогранитного агрегата. Акцессорные минералы – магнетит, сфен, апатит, монацит, пирит. Часто породы изменены, и в крайних случаях представлены серицит-кварцевыми автометасоматитами с реликтовой порфиоровой структурой. Пересчет на модальный состав дает следующие содержания в % (кварц 52–60; серицит 25–32; плагиоклаз 5–14; каолин 1,0–9,7). Лейкограниты и граниты ПК, распространенные в Бескес–Андрюкском междуречье, имеют схожий внешний облик и состав. Структура пород порфиоровая. Вкрапленники представлены кварцем, пелитизированным КПШ, олигоклазом и редко мусковитом. ОМ неравномернозернистая, аллотриоморфная и пойкилитовая кварц – полевошпат – серицитовая, иногда с примесью хлорита и карбоната. В долине р. Пскент граниты имеют мелкопорфиоровую структуру. Мелкие вкрапленники представлены кварцем и КПШ (анортоклазом) распадающимся на кварц – полевошпат – серицитовый агрегат с сохранением реликтов карлсбадских двойников. Вкрапленники обрастают кварц-полевошпатовой каемкой. ОМ аллотриоморфная, состоит из кварца, олигоклаза, КПШ, серицита и редких кварц-карбонатных микропрожилков. По данным [Лаврищев и др., 2000] в телах сложенных более крупнозернистыми гранитами ПК встречаются вкрапленники кварца, плагиоклаза, биотита, турмалина. Монодиориты сложены плагиоклазом, КПШ, кварцем, роговой обманкой, с примесью хлорита и эпидота (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

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

Образец/ Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO <sub>2</sub>	75,14	67,12	73,64	74,71	74,88	75,77	71,88	77,25	76,08	74,02	72,19	71,92
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,49	0,06	0,06	0,05	0,04	0,29	0,05	0,05	0,05	0,10	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,55	14,61	14,15	13,92	12,70	12,89	14,55	13,00	12,95	15,34	15,65	15,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,03	3,19	1,26	1,32	1,61	1,25	1,68	0,48	0,92	0,04	0,97	1,42
MnO	0,01	0,05	0,04	0,03	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02
MgO	0,14	1,08	0,15	0,12	0,40	0,10	0,13	0,08	0,05	0,11	0,39	0,11
CaO	0,10	1,92	1,43	0,52	0,14	0,17	0,24	0,10	0,15	0,14	0,53	0,15
Na <sub>2</sub> O	3,90	3,34	2,23	3,14	3,72	3,71	4,24	3,01	3,76	3,78	6,06	4,75
K <sub>2</sub> O	3,88	2,69	3,33	3,44	4,78	4,72	4,62	4,81	4,87	4,66	2,15	4,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,12	0,03	0,03	0,02	0,02	0,11	0,01	0,01	0,03	0,05	0,05
ппп	1,93	5,24	3,58	2,57	1,57	1,19	1,97	1,10	1,04	1,55	1,57	2,11
Сумма / Sum	99,81	99,85	99,9	99,86	99,88	99,87	99,75	99,9	99,89	99,73	99,71	99,9
Cr	13	<10	10	14	10	<10	<10	<10	<10	17	15	<10
V	<10	65	<10	<10	<10	<10	35	15	10	11	16	<10
Co	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ni	<10	<10	<10	<10	<10	<10	10	<10	10	<10	<10	16
Cu	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	17	<10
Zn	29	48	27	22	40	46	47	15	21	16	171	22
Pb	39	<10	<10	43	<10	36	33	12	<10	38	77	<10
Rb	178	111	105	99	193	223	154	171	167	153	75	184
Sr	56	103	69	59	53	48	101	27	44	106	284	92
Ba	609	211	321	621	209	221	819	292	243	1329	920	232
Zr	105	205	95	96	127	103	243	117	118	68	75	77
Y	37	28	20	21	31	30	26	27	30	<10	<10	7
U	7	7	7	7	7	7	8	8	5	7	4	5
Li	8,76	6,89	10,86	9,38	3,67	8,81	7,69	3,42	2,14	43,12	4,06	21,32
Be	2,02	1,76	2,14	1,79	3,19	1,79	1,78	1,62	1,64	2,60	3,5	3,06
Sc	2,70	6,63	2,39	1,89	3,02	3,29	5,12	1,14	2,64	0,79	0,02	0,91
Ti	643	2871	380	371	332	218	1904	288	376	270	449	182
Nb	8,80	6,99	6,16	5,71	9,43	10,41	8,38	11,68	8,35	15,12	5,75	11,79
Mo	0,83	0,56	0,18	0,40	0,07	0,31	1,55	1,37	0,93	0,82	0,47	0,36
Sn	7,47	1,87	2,09	1,92	3,53	6,01	2,33	2,44	3,0	-	-	5,69
Sb	2,02	0,56	2,79	1,20	0,21	0,32	0,20	0,19	0,28	-	-	1,85
Cd	0,11	0,31	0,12	0,13	0,15	0,18	0,46	0,13	0,14	-	-	0,08
Cs	6,36	5,58	3,45	2,33	2,54	4,05	4,49	4,17	2,29	3,49	2,54	5,76
La	15,81	23,03	20,02	17,03	16,79	6,17	31,35	15,95	11,16	10,07	12,58	16,39
Ce	34,21	46,24	40,34	35,0	36,08	15,99	60,43	35,09	30,72	12,64	6,37	27,32
Pr	3,95	5,71	4,71	4,19	4,39	1,98	7,33	3,76	3,31	1,33	1,02	3,09
Nd	13,22	18,68	15,65	13,80	14,64	7,29	22,88	15,12	10,59	4,55	3,71	9,95
Sm	3,35	3,99	3,59	3,16	3,76	2,31	4,21	3,52	2,89	0,82	0,98	1,85
Eu	0,26	0,79	0,63	0,62	0,26	0,20	0,75	0,30	0,21	0,37	0,41	0,35
Gd	3,79	3,73	3,15	2,78	3,67	2,75	3,61	3,37	3,17	0,56	0,94	1,23
Tb	0,84	0,67	0,55	0,48	0,73	0,60	0,64	0,60	0,66	0,06	0,15	0,20
Dy	4,76	3,58	2,70	2,49	4,06	3,61	3,38	2,97	3,61	0,18	0,89	0,98
Ho	1,12	0,81	0,61	0,53	0,97	0,86	0,82	0,61	0,84	0,02	0,17	0,19
Er	2,89	2,05	1,51	1,36	2,46	2,28	2,04	1,45	2,05	0,02	0,51	0,45
Tm	0,47	0,35	0,25	0,22	0,42	0,40	0,36	0,22	0,34	0,003	0,07	0,07
Yb	2,64	2,0	1,51	1,35	2,42	2,38	2,11	1,12	1,96	0,007	0,48	0,34
Lu	0,40	0,34	0,26	0,21	0,39	0,38	0,36	0,17	0,32	0,001	0,06	0,04
Hf	2,88	4,05	2,69	2,48	3,56	3,43	5,29	4,36	3,40	2,42	2,13	2,55
Ta	1,61	0,74	0,71	0,66	1,13	1,37	0,93	1,60	1,12	1,38	0,46	1,52
W	1,87	1,10	0,94	0,19	0,43	0,50	1,08	4,74	0,67	-	-	2,62
Bi	1,14	0,24	0,01	0,13	0,19	0,07	0,08	0,04	0,41	0,55	0,10	0,54
Th	13,61	11,75	14,09	12,81	20,0	18,79	16,12	13,77	16,33	3,44	3,05	5,99

Примечание (Comment): 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 лейкограниты (leukogranites); 7, 11, 12 граниты (granites); 2 гранодиориты (granodiorites). Место отбора образцов 1, 2 р. Кестанты; 3, 4 р. Шауккол; 5, 6 р. Худес; 7 р. Джаланкол; 8, 9 р. Дгут; 10, 11 р. Пскент; 12 р. Андрюк. (The sampling site is 1, 2 r. Kestanty; 3, 4 r. Shaukol; 5, 6 r. Khudes; 7 r. Jalankol; 8, 9 r. Daut; 10, 11 r. Pskent; 12 r. Andriuk).

На диаграмме  $(Na_2O+K_2O-CaO)-SiO_2$  [Frost et al., 2001] (рис. 2) ФТ гранитов группируются в поле щелочно-известковистых и известково-щелочных пород. На диаграммах  $SiO_2$  – петрогенные элементы видны низкие содержания  $CaO$  в основном 0,1–2,0% и существенные вариации содержаний  $Na_2O$  от 0,2 до 6,8%,  $K_2O$  от 2,0 до 5,0%. ФТ гранитов КК и ПК группируются в полях умеренно- и высококалиевых образований. Это низкомагнезиальные  $Mg^\#$  (0,1–0,46), плюмазитовые  $(CaO+Na_2O+K_2O) < Al_2O_3$ , умеренноглиноземистые ( $Al^I = 1,8-13,4$ ) породы с натриевым и калиево-натриевым типами щелочности  $Na_2O/K_2O$  0,6–2,8. В породах КК  $Ta/Hf = 0,3$ .  $Ta/Zr = 0,008$ .  $K/Rb = 221$ .  $U/Th$  отношение (0,3–0,6) < 1. В породах ПК  $U/Th$  (0,8–2,0).  $Ta/Hf = 0,5$ .  $Ta/Zr = 0,015$ .  $K/Rb = 223$ .

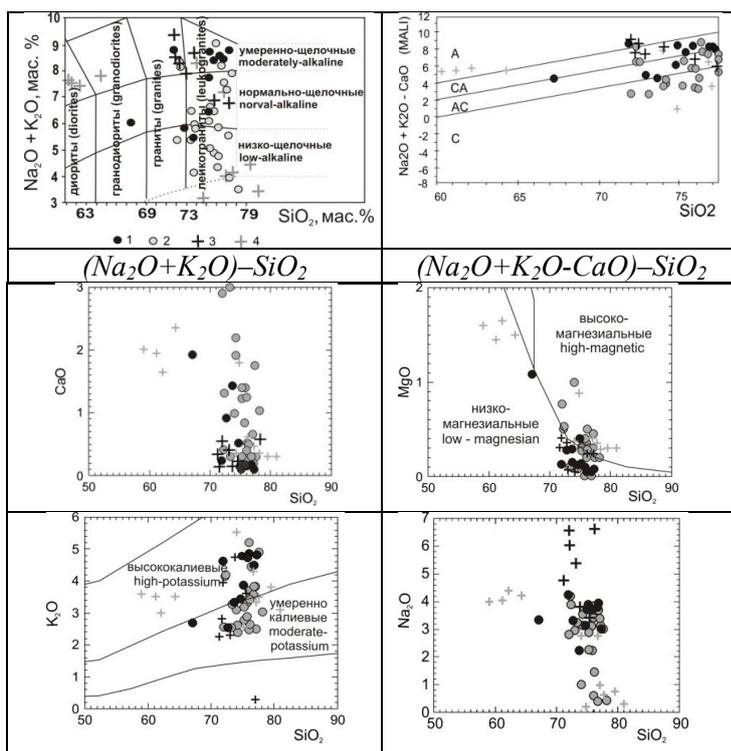


Рис. 2. Составы пород на классификационных диаграммах. Условные обозначения: на диаграмме  $(Na_2O+K_2O-CaO)-SiO_2$  поля гранитоидов: C – известковистых, AC – щелочно-известковистых, CA – известково-щелочных, A – щелочных. 1,2 «кубанский» комплекс. 3,4 «пскентский» комплекс. 1, 3 – РФА; 2, 4 – силикатный анализ /

Fig. 2. Rock compositions in classification diagrams. Legend: in the diagram  $(Na_2O+K_2O-CaO)-SiO_2$  fields of granitoids: C – calcareous, AC – alkaline-calcareous, CA – calcareous-alkaline, A – alkaline. 1,2 “Kuban” complex. 3,4 “Pskent” complex. 1,3 – XRF; 2,4 – silicate analysis

На дискриминационной диаграмме (ДД)  $FeOT/(FeOT+MgO) - SiO_2$  [Frost et al., 2001] (рис. 3) где показаны поля магнезиальных и железистых гранитоидов ФТ группируются преимущественно в поле железистых гранитов, в области наложения полей гранитов S и A типа. Сравнение содержаний окислов с эталонами гранитов I, S A – типов [Туркина, 2014] показывает, что КК по  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Sr$  и  $Ba$ , а ПК по  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Rb$  вполне сравнимы с гранитами А – типа, но заметно отличаются по концентрациям  $Zr$ ;  $Nb$ ,  $Ce$ ,  $Y$ . На ДД  $Rb/30 - Hf - Ta \times 3$  [Harris et al., 1986] ФТ группируются в поле постколлизийных гранитов. На ДД  $FeOt/MgO - (Zr+Nb+Ce+Y)$  [Whalen et al., 1987] ФТ располагаются в полях фракционированных и нефракционированных гранитов М-, I- и S-типов. На диаграмме гранитов А-типа,

построенной на соотношении петрохимических окислов  $Na_2O+K_2O-Fe_2O_3T^*5-(CaO+MgO)^*5$  [Гребенщиков, 2014] ФТ группируются в полях гранитов А1 и А2. На аналогичных диаграммах, построенных на геохимической основе  $Y-Nb-Ce$  и  $Sc/Nb-Y/Nb$  [Eby, 1992], ФТ составов КК расположены в поле гранитов А2, ПК в поле гранитов А1. На ДД  $Th/Yb-Ta/Yb$  [Gorton, Schandl, 2000] ФТ группируются в поле АСМ – пород активных континентальных окраин.

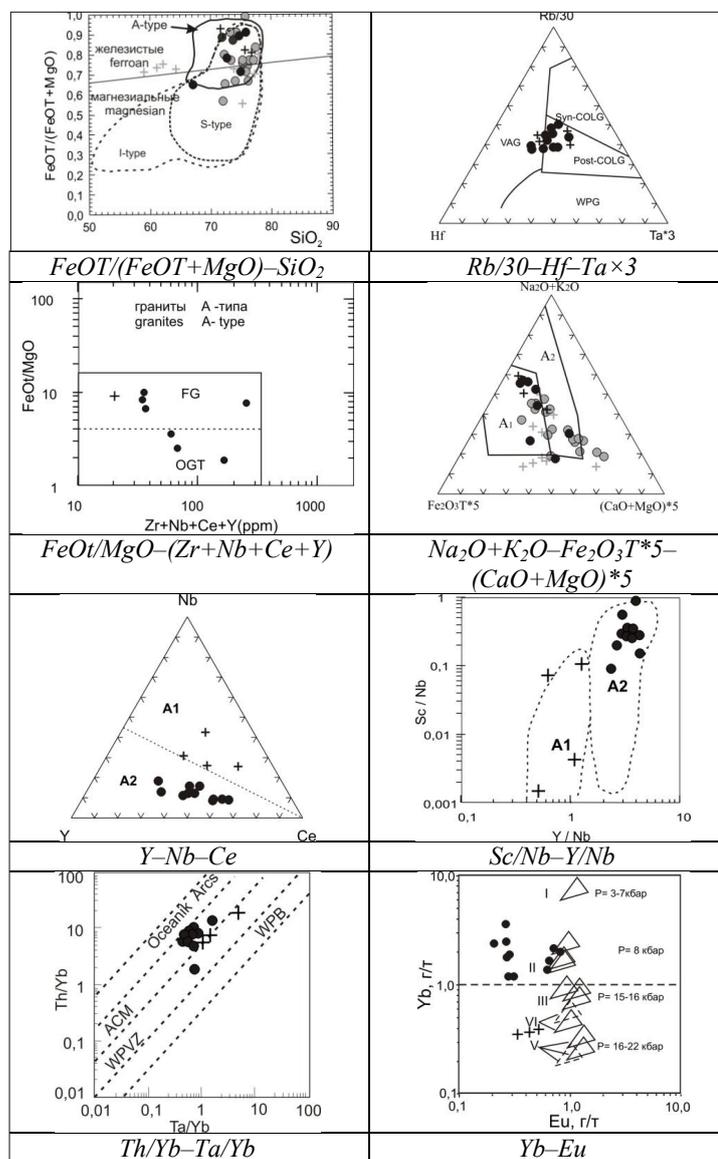


Рис. 3. Составы пород на петрогенетических диаграммах.

Условные обозначения: на диаграммах: VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – граниты синколлизийные, post-COLG – граниты постколлизийные, WPG – граниты внутриплитные.

FG – фракционированные граниты, OGT – нефракционированные граниты M-, I- и S-типа, A – граниты A-типа. Oceanic Arcs – океанические дуги, ACM – активные континентальные окраины, WPVZ – внутриплитные вулканические зоны, WPB – зоны внутриплитных базальтов, P – давление в кбар /

Fig. 3. Rock compositions on petrogenetic diagrams. Legend. In the diagrams: VAG – granites of volcanic arcs, syn-COLG – syncollisional granites, post-COLG – postcollisional granites, WPG – intraplate granites. FG – fractionated granites, OGT – unfractionated granites of M-, I- and S-type, A – granites of A-type. Oceanic Arcs – oceanic arcs, ACM – active continental margins, WPVZ – intraplate volcanic zones, WPB – zones of intraplate basalts, P – pressure in kbar

На ДД  $Yb - Eu$  [Туркина, 2000] ФТ гранитов КК расположены вблизи треугольных полей модельных составов, образующихся в результате плавления исходных пород при давлениях  $\sim 8$  кбар, а ПК  $\sim 15-16$  кбар. Редкие земли (REE) гранитов КК и ПК, нормированные к хондриту (рис. 4), имеют фракционированные заметно различающиеся тренды распределения. В КК  $La_n/Yb_n$  отношение (показатель степени фракционирования REE)  $1,8-10,6$ .  $La_n/Sm_n$   $1,7-4,8$ .  $Gd_n/Yb_n$   $0,9-2,4$   $\Sigma/n$   $1,4$  ( $n=11$ ).  $Eu/Eu^*$  где ( $Eu^*=(Sm_n+Gd_n)/2$ )  $0,2-0,6$ .  $\Sigma REE$  г/т  $178-513$   $\Sigma/n$   $330$ . В ПК  $La_n/Yb_n$   $3,5-34,5$ .  $La_n/Sm_n$   $1,2-7,9$ .  $Gd_n/Yb_n$   $1,6-66$ .  $Eu/Eu^*$   $0,7-1,2$ .  $\Sigma REE$  г/т  $86-212$ ;  $\Sigma/n$   $131$  ( $n=4$ ). На мультиэлементных диаграммах несовместимых элементов, нормированных по  $N-MORB$  отмечается, что спектры КК и ПК (рис. 4) имеют повышенные концентрации литофильных  $Rb$ ,  $Ba$ ,  $K$  и радиогенных  $Th$ ,  $U$  элементов. А также негативную  $Ta$ ,  $Nb$  аномалию и отрицательные аномалии  $P$  и  $Ti$ . Некоторые отличия гранитов ПК заключаются в более низких концентрациях  $Th$ ,  $Y$ ,  $MREE$ ,  $HREE$  и более высоких  $-LREE/HREE$ ,  $Ta/Hf$ ,  $Ta/Zr$  отношениях. Величины кларковых концентраций ( $K_k \geq 1,0$ ) рассчитаны по уточненным данным [Гусев и др., 1999]. В породах КК  $Sb_{2,2}$   $U_{1,5}$   $Pb_{1,0}$ ; ПК  $Sb_{4,8}$   $Pb_{2,9}$   $Zn_{1,4}$   $W_{1,3}$   $Ba_{1,3}$   $U_{1,2}$   $Sn_{1,1}$  указывают на повышенные концентрации в гранитах обоих комплексов сурьмы. Сравнение изученных пород КК, ПК с геохимическими типами гранитоидов указывает на их близость к палингенным известково-щелочным гранитам по Л.В. Тауссону.

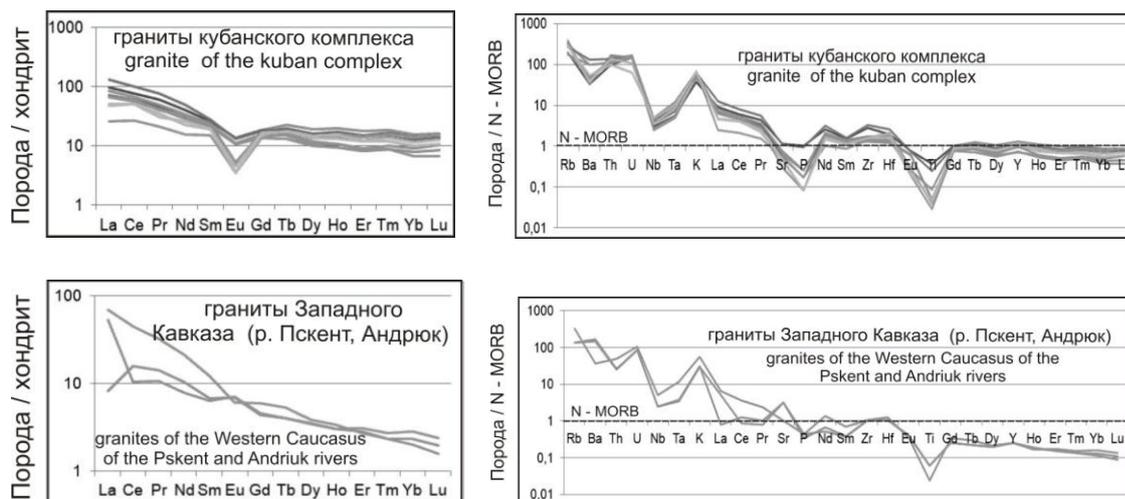


Рис. 4. Составы пород на спайдер-диаграммах.

Примечание. Концентрации несовместимых элементов нормированы по  $N-MORB$ , концентрации REE нормированы к хондриту по [San, McDonough, 1989] /

Fig. 4. Compositions of rocks on spider diagrams.

Comment. Concentrations of incompatible elements normalized to  $N-MORB$ , REE concentrations normalized to chondrite according to [San, McDonough, 1989]

## Обсуждение результатов

Согласно с геодинамической моделью региона [Греков, Пруцкий, 2001] в период времени от среднего палеозоя до триаса выделяют три этапа развития БК. На первом этапе формировался раннегерцинский структурный ярус. Для него характерно развитие аллохтонных толщ, в составе которых присутствуют фрагменты коллажированных террейнов, образующих аккреционные комплексы, отдельные элементы которых формировались в различных геодинамических условиях. Позднегерцин-

ский структурный ярус (карбон-пермь), выступает в качестве неоавтохтона, наиболее полно развит в грабен-синклинории ПХ, где представлен сероцветной (карбон) и красноцветной (пермь) молассаами. Индосинийский структурный ярус распространен на западном фланге ПХ и сложен карбонатной формацией верхней перми и триаса. В соответствии с геологическим разрезом и распространенным магматизмом авторами предполагается, что: ранний карбон – это этап коллизии субдукционного типа; карбон–ранняя пермь – активная окраина континента «Андийского типа»; нижняя пермь–низы верхней перми – континентальный рифтогенез (с геохимическими уточнениями рифтогенеза в пределах активной континентальной окраины); поздняя пермь–триас – эпиконтинентальный бассейн. Изученные граниты КК и ПК внедрялись в период формирования позднегерцинского структурного яруса Скифской плиты в условиях активной континентальной окраины, что согласуется с положением ФТ на ДД  $Th/Yb - Ta/Yb$ . Это известково-щелочные, умеренно- и высококалиевые образования с натриевым и калиево-натриевым типом щелочности и с низкими содержаниями фосфора и титана. Они являются постколлизийными, железистыми гранитами с характеристиками близкими к гранитам А-типа, но отличаются более низкими концентрациями  $Zr, Nb, Ce, Y$ . Следует отметить, что по ряду показателей граниты КК и ПК существенно различаются между собой. Граниты КК, исходя из положения ФТ на ДД  $Y-Nb-Ce; Sc/Nb - Y/Nb, Yb-Eu$ , являются гранитами А2 типа ( $Y/Nb$  3,1). Их исходные расплавы формировались на глубинах 24–28 км ( $P=8$  кбар). Считается, что граниты подтипа А2 с  $Y/Nb > 1,2$  могут иметь разные источники: 1 – существенно коровый; 2 – со значительным количеством мантийной компоненты. В нашем случае глубина формирования может указывать на коровый источник КК. Отрицательная европиевая аномалия  $Eu/Eu^* 0,2-0,6$  позволяет предполагать, что в процессе дифференциации расплава (или при плавлении протолита) имело место фракционирование плагиоклаза, слабо дифференцированный спектр  $HREE$  указывает на отсутствие в источнике остаточного граната и/или роговой обманки. С гранитами КК ассоциирует жильное полиметаллическое оруденение (месторождение Эльбрусское, Даутское). Жильные тела, локализованы преимущественно в гранитах и во вмещающих их сланцах, быстро выклиниваются. Основные рудные минералы – галенит, сфалерит; в меньших количествах присутствуют арсенопирит, пирит, халькопирит [Вольфсон, Лезин, 1960]. В горных выработках отмечались барит, реальгар и аурипигмент. Отметим, что с подобными умеренно-щелочными, двуполевошпатовыми лейкогранитами со сферолитовой микроструктурой ассоциирует жильное полиметаллическое оруденение в Рудном и Горном Алтае, Забайкалье, Монголии и Китае [Гусев, Кузубов, 2001; Li et al., 2014]. Граниты ПК являются гранитами А1-типа ( $Y/Nb$  0,8). Их исходные расплавы формировались на глубинах 45–48 км ( $P=15-16$  кбар). Известно, что граниты подтипа А1 с  $Y/Nb < 1,2$  могут образоваться из источников с геохимическими характеристиками базальтов океанических островов (ОИВ) [Eby, 1990; Bonin, 2007; Savko et al., 2014; Jiang et al., 2018]. В нашем случае  $Gd_n/Yb_n$  1,6–66 указывает на присутствие в рестите граната. Предполагается также, что низкие концентрации  $Zr, Nb, Ce, Y$  могут быть связаны с плавлением эцлогитового протолита. Геохимия эцлогитов Кавказа приведена в статье [Газеев и др., 2020]. С гранитами ПК связаны зоны развития гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов мощностью до 300 м. Рудные минералы в метасоматитах представлены арсенопиритом, леллингитом, пиритом, пирротинном, халькопиритом, сфалеритом и галенитом [Карпушин, 1974].

В зоне развития гранитоидов отмечаются рудопроявления *U, Au*, [Лаврищев и др., 2000]. Выявленные различия в гранитах КК и ПК, а именно глубина формирования и источники расплава, на наш взгляд, требуют обсуждения. Отметим, что в карбонное время магматизм в зоне Передового хребта (ПХ) БК заметно различается. На западе распространены такие локальные комплексы как «заканский» монцодиоритовый плутонический ( $C_1$ ), «пскентский» гипабиссальный монцодиорит–гранитный ( $C_2$ ), «толстобугорский» риолитовый вулканический ( $C_2$ ), «ятыргвартинский» диорит–гранитный ( $C_3$ ). На востоке ПХ это гипабиссальные образования «кубанского» гранитного ( $C_3$ ), «чучхурского» диорит–гранодиоритового ( $P_{2,3}$ ) комплексов, неоген-четвертичного магматизма и на сопряженных территориях триасового и раннеюрского вулканизма. По нашему мнению, магматизм в восточной части ПХ и на сопредельных с ним территориях контролируется зоной Транскавказского поперечного поднятия (ТПП). Эта структура, пересекающая подвижный альпийский пояс в верхней мантии сопровождается зоной пониженных скоростей, а также приподнятым положением границы Мохоровичича, и повышенным тепловым потоком [Шолпо, 1978; Большой Кавказ..., 2007]. Известно, что возникновение известково-щелочных расплавов мантийного генезиса на поздне-, вплоть до постколлизийной стадии, может быть результатом термальной релаксации в нижней части коры и адиабатической декомпрессии в верхней мантии. Подобные проявления магматизма известны в Альпийских и Герцинских (Западная Европа) коллизийных зонах и в некоторых случаях происходили через 40–50 млн лет после коллизии. Постколлизийная стадия обычно характеризуется развитием щелочных интрузий, которые могут выплавляться из мантийной литосферы вблизи коллизийных зон [Остроумова и др., 1995]. Появление гранитов ПК, по-видимому, связано с подобной термальной релаксацией в нижней части коры и плавлением существенно эцлогитового протолита.

### Выводы

Изучены петрохимические особенности позднекарбонных гранитов и лейкогранитов Передового хребта Большого Кавказа. Установлено, что они представлены известково-щелочными, умеренно- и высококалиевыми, разновидностями с натриевым и калиево-натриевым типом щелочности. Показано, что они являются постколлизийными, железистыми гранитами с характеристиками близкими к гранитам А-типа. Их формирование происходило в геодинамических условиях активной континентальной окраины. Показано, что лейкограниты «кубанского» комплекса относятся к подтипу А2. Предполагается, что их расплавы формировались при плавлении корового субстрата, на глубинах 24–28 км и связаны с тепловым потоком зоны Транскавказского поперечного поднятия. Граниты и лейкограниты «пскентского» комплекса относятся к подтипу А1. Предполагается, что их образование связано с процессом термальной релаксации в условиях нижней коры на глубинах 45–48 км, и плавлением существенно эцлогитового протолита.

### Литература

1. Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Ред. Ю.Г. Леонов. М: ГЕОС. – 2007. – 368 с.
2. Вольфсон Ф.И. Лезин С.Н. Основные черты структуры свинцово-цинковых месторождений Эльбурского рудного поля. // Геология рудных месторождений. – 1960. – № 1. – С. 55–60.

3. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Герасимов В.Ю. Эклогиты Большого Кавказа (природа протолита и его геодинамическая типизация). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – №1. – С. 6–21.
4. Гребенщиков А.В. Гранитоиды А-типа проблемы диагностики, формирования и систематики. // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55. № 9. – С. 1356–1373.
5. Греков И.И. Пруцкий Н.И. Проблемы геодинамики и металлогении Центрального Кавказа в позднегерцинский – триасовый этап развития Северного Кавказа. // *Сборник научных трудов «Проблемы геологии и геоэкологии Южно-Российского региона»*. Новочеркасск: НАБЛА, – 2001. С. 4–15.
6. Гусев А.И. Кузубов П.П. Петрогенетические типы и флюидалный режим палеозойских гранитоидов Большого Кавказа. // *Отечественная геология*. 2001. – № 2. – С. 42–48.
7. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гушин А.В. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. М: ВСЕГЕИ, – 1999. 538 с.
8. Карпушин В.М. Позднепалеозойский кислый магматизм Бессеско-Марухской геолого-структурной зоны Северного Кавказа в междуречье Большой Лабы – Урупа. // *Известия Академии наук СССР. Серия геологическая*. – 1974. – № 2. – С. 51–70.
9. Лаврищев В.А., Пруцкий Н.И., Семенов В.М., и др. Государственная геологическая карта РФ. К-37-V (Красная поляна). Серия: Кавказская, второе издание. СПб.: ВСЕГЕИ. Объяснительная Записка, – 2001. 204 с.
10. Остроумова А.С., Станкевич Е.К., Ценер И.Я., Соболев А.О., Путинцев А.В. Петрологическое изучение магматических ассоциаций коллизионных обстановок. / Отв. ред. Гусев Г.С. М: ВСЕГЕИ, – 1995. 217 с.
11. Туркина О.М. Модельные геохимические типы тоналит-трондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты. // *Геохимия*. – 2000. – № 7. – С. 704–717.
12. Туркина О.М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов. Новосибирск: РИЦ НГУ, – 2014. 118 с.
13. Шолпо В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра, – 1978. 160 с.
14. Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. // *Lithos*. – 2007. – Vol. 97. – pp. 1–29.
15. Whalen B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1987. – Vol. 95. – pp. 407–419.
16. Eby G.N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. // *Lithos*. – 1990. – Vol. 26. – pp. 115–134.
17. Eby G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids petrogenetic and tectonic implications. // *Geology*. – 1992. – Vol. 20. – pp. 641–644.
18. Jiang X.Y., Luo J.C., Guo J., Wu K., Zhang Z.K., Sun W.D., Xia X.P. Geochemistry of I- and A-type granites of the Qingyang-Jiuhuashan complex, eastern China: Insights into early cretaceous multistage magmatism. // *Lithos*. – 2018. – Vols. 316-317. – pp. 278–294.
19. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J. A geochemical classification for Granitic Rocks. // *Journal of Petrology*. – 2001. – Vol. 42. Issue 11. – pp. 515–518.
20. Harris N.B., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. // *Geological Society, London, Special Publications*. – 1986. – Vol. 19. – pp. 67–81.
21. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. // *The Canadian Mineralogist*. – 2000. – Vol. 38. pp. – 1065–1073.
22. Li H., Watanabe K., Yonezu K. Geochemistry of A-type granites in the Huangshaping polymetallic deposit (South Hunan, China): Implications for granite evolution and associated mineralization. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2014. – Vol. 88. – pp. 149–167.

23. Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Larionova Yu.O. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, Petrogenesis, and Tectonic Setting of Origin. // *Petrology*. – 2014. – Vol. 22. – pp. 205–233.

24. Sun S.S., Mc Donough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // *Geological Society, London, Special Publications*. – 1989. – Vol. 42. – pp. 313–345.

## References

1. The Greater Caucasus in the Alpine Epoch. Ed. by Yu.G. Leonov. Moscow. GEOS. 2007. 368 p. (in Russ.)

2. Wolfson F.I. Lezin S.N. The main features of the structure of lead – zinc deposits of the Elbrus ore field. *Geology of ore deposits*. 1960. No. 1. pp. 55–60. (in Russ.)

3. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Gerasimov V.Yu. Eclogites of the Greater Caucasus (the nature of the protolith and its geodynamic typification). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. No. 1. pp. 6–21. (in Russ.)

4. Grebenshchikov A.V. Granitoids of A-type problems of diagnosis, formation and systematics. *Geology and Geophysics*. 2014. Vol. 55. No. 9. pp. 1356–1373. (in Russ.)

5. Grekov I.I. Prutsky N.I. Problems of geodynamics and metallogeny of the Central Caucasus in the Late Hercynian – Triassic stage of development of the North Caucasus. In: *Proceedings Problems of geology and geocology of the Southern Russian region*. Novocherkassk. NABLA. 2001. pp. 4–15. (in Russ.)

6. Gusev A.I. Kuzubov P.P. Petrogenetic types and fluid regime of Paleozoic granitoids of the Greater Caucasus. *Russian geology*. 2001. No. 2. pp. 42–48. (in Russ.)

7. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V. Geochemical and metallogenic specialization of structural and material complexes. Moscow. VSEGEI. 1999. 538 p. (in Russ.)

8. Karpushin V.M. Late Paleozoic acid magmatism of the Besskesco–Marukhsкая geological and structural zone of the North Caucasus in the interfluvium of Bolshaya Laba – Urup. *Izvestia of the Russian Academy of Sciences USSR. Geological Series*. 1974. No. 2. pp. 51–70. (in Russ.)

9. Lavrishchev V.A., Prutsky N.I., Semenov V.M., et al. State Geological Map of the Russian Federation. K-37-V (Krasnaya Polyana). Series: Caucasian. Second edition. St. Petersburg. VSEGEI. Explanatory Note. 2001. 204 p. (in Russ.)

10. Ostroumova A.S., Stankevich E.K., Center I.Ya., Sobolev A.O., Putintsev A.V. Petrological study of magmatic associations of collision environments. Ed. by Gusev G.S. Moscow. VSEGEI. 1995. 162 p. (in Russ.)

11. Turkina O.M. Model geochemical types of tonalite–trondyemite melts and their natural equivalents *Geochemistry*. 2000. No. 7. pp. 704–717. (in Russ.)

12. Turkina O.M. Lectures on the geochemistry of magmatic and metamorphic processes. Novosibirsk. RIC NGU. 2014. 118 p. (in Russ.)

13. Sholpo V.N. Alpine geodynamics of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra. 1978. 160 p. (in Russ.)

14. Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*. 2007. Vol. 97. pp. 1–29.

15. Whalen B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987. Vol. 95. pp. 407–419.

16. Eby G.N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*. 1990. Vol. 26. pp. 115–134.

17. Eby G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids petrogenetic and tectonic implications. *Geology*. 1992. Vol. 20. pp. 641–644.

18. Jiang X.Y., Luo J.C., Guo J., Wu K., Zhang Z.K., Sun W.D., Xia X.P. Geochemistry of I- and A-type granites of the Qingyang-Jiuhuashan complex, eastern China: Insights into early Cretaceous multistage magmatism. *Lithos*. 2018. Vols. 316–317. pp. 278–294.

19. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J. A geochemical classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42. Issue 11. pp. 515–518.
20. Harris N.B., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision–zone magmatism. Geological Society, London, Special Publications. 1986. Vol. 19. pp. 67–81.
21. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist*. 2000. Vol. 38. pp. 1065–1073.
22. Li H., Watanabe K., Yonezu K. Geochemistry of A-type granites in the Huangshaping polymetallic deposit (South Hunan, China): Implications for granite evolution and associated mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014. Vol. 88. pp. 149–167.
23. Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Larionova Yu.O. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, Petrogenesis, and Tectonic Setting of Origin. *Petrology*. 2014. Vol. 22. pp. 205–233.
24. Sun S.S., Mc Donough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. Geological Society, London, Special Publications. 1989. Vol. 42. pp. 313–345.

УДК: 553.411

DOI: 10.46698/VNC.2024.57.92.010

Оригинальная статья

## Золотоносные и потенциально золотоносные минерализации в черносланцевой толще Арсикомского рудного поля (Северный Кавказ)

С.Г. Парада 

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

Статья поступила: 19.02.2024, доработана: 01.04.2024, принята к публикации: 02.04.2024

**Резюме:** Актуальность исследования определяется необходимостью создания научно-методической основы для разработки новых методов прогноза, поиска и оценки новых типов золотоносных руд в черносланцевых толщах Северного Кавказа. Накопленный за последнее время геологический материал в совокупности с положительными результатами поисковых работ последних лет на Северном Кавказе дает возможность путем анализа и обобщений приблизиться к разработке региональных генетических и геолого-поисковых моделей золоторудных месторождений крупнообъемного черносланцевого типа на основе современных концепций, учитывающих геолого-геофизические и минерагенические особенности Северного Кавказа. **Цель:** дать обобщенную характеристику выявленных потенциально золотоносных минерализаций, локализованных в черносланцевых породах нижней юры, на примере циклаурской свиты в пределах Арсикомского рудного поля. Необходимость всестороннего изучения вещественного состава, геологических условий локализации золотоносных минерализаций различных минерально-морфологических типов в черносланцевых толщах определяется в связи с гипотезой полигенно-полихронного рудообразования, разработанной ранее на примере других регионов. **Методы.** Геологический анализ результатов поисковых работ в пределах территорий Арсикомского рудного поля на основе современных минерагенических концепций с использованием результатов полевых геологических наблюдений и документации коренных обнажений и горных выработок. **Результат.** Установлено, что золотоносные и потенциально золотоносные минерализации Арсикомского рудного поля в подавляющем большинстве представлены кварцево-жильно-прожилковым минерально-морфологическим типом золотого оруденения. Кварцево-жильно-прожилковые зоны, отдельные кварцевые жилы и прожилки избирательно локализируются в углеродистых сланцах циклаурской свиты. Большинство из них практически повсеместно подверглись складчатому и разрывным деформациям вместе с вмещающими породами, образуя минерализованные тектонические зоны. При этом отмечается литологический контроль оруденения, – при переходе из черных сланцев в вулканогенные породы циклаурской свиты кварцевые жилы выклиниваются, а минерализованные зоны продолжают в виде области повышенной трещиноватости и брекчирования, сцементированной поздними карбонатами, хлоритами, халцедоном, гидроокислами железа. Показано, что проявления пирротиновой минерализации вкрапленного типа, избирательно проявленной в углеродистых алевролитах средней части вулканогенно-терригенного разреза циклаурской свиты могут представлять интерес в качестве одного из перспективных типов потенциально золотоносных и платиноидоносных минерализаций.

**Ключевые слова:** черносланцевая толща, золотоносность, минерально-морфологический тип оруденения, кварцево-жильно-прожилковый, сульфидно-вкрапленный, минерализованные тектонические зоны.

**Благодарности:** Статья подготовлена в рамках государственного задания на научно-исследовательские работы Геофизического института ВНЦ РАН.

**Для цитирования:** Парада С.Г. Золотоносные и потенциально золотоносные минерализации в черносланцевой толще Арсикомского рудного поля (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 131-142. DOI: 10.46698/VNC.2024.57.92.010

DOI: 10.46698/VNC.2024.57.92.010

Original paper

## Gold-bearing and potentially gold-bearing mineralization in the Black Shale thickness of the Arsikom ore field (North Caucasus)

S.G. Parada 

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

Received: 19.02.2024, revised: 01.04.2024, accepted: 02.04.2024

**Abstract:** The relevance of the research is determined by the need to create a scientific and methodological basis for the development of new methods for forecasting, searching and evaluating new types of gold-bearing ores in the black shale strata of the North Caucasus. The recently accumulated geological material, combined with the positive results of prospecting in recent years in the North Caucasus, makes it possible, through analysis and generalizations, to approach the development of regional genetic and geological prospecting models of large-volume black shale gold deposits based on modern concepts that take into account the geological, geophysical and mineragenic features of the North Caucasus. **Objective.** To give a generalized characterization of the identified potentially gold-bearing mineralizations localized in the Black shale rocks of the Lower Jurassic using the example of the Cyclaurian suite within the Arsikom ore field. The need for a comprehensive study of the material composition, geological localization conditions of localization of gold-bearing mineralizations of various mineral and morphological types in black shale strata is determined in connection with the hypothesis of polygenic polychronous ore formation, developed earlier on the example of other regions. **Methods.** Geological analysis of the results of prospecting operations within the territories of the Arsikom ore field based on modern mineragenic concepts using the results of field geological observations and documentation of indigenous outcrops and mine workings. **Result.** It has been established that the gold-bearing and potentially gold-bearing mineralizations of the Arsikom ore field are overwhelmingly represented by a quartz-veined and veinlet-disseminated mineral-morphological type of gold mineralization. Quartz-veined and veinlet-disseminated zones, individual quartz-veined and veinlet-disseminated are selectively localized in carbonaceous shales of the Cyclaurian formation. Most of them have almost universally undergone folded and discontinuous deformations together with the host rocks, forming mineralized tectonic zones. At the same time, lithological control of mineralization is noted - during the transition from black shales to volcanogenic rocks of the Cyclaurian formation, quartz veins disappear, and mineralized zones continue as an area of increased fracturing and brecciation, cemented with late carbonates, chlorites, chalcedony, iron hydroxides. It is shown that manifestations of pyrrhotite mineralization of the interspersed type selectively manifested in carbonaceous siltstones of the middle part of the volcanogenic-terrigeneous section of the Cyclaurian formation may be of interest as one of the promising types of potentially gold-bearing and platinum-bearing mineralizations.

**Keywords:** black shale strata, gold content, mineral and morphological type of mineralization, veined and veinlet-disseminated, sulfide-interspersed, mineralized tectonic zones.

**Acknowledgements:** The article was prepared as part of the state assignment for research work of the Geophysical Institute of the VSC RAS.

**For citation:** Parada S.G. Gold-bearing and potentially gold-bearing mineralizations in the Black Shale thickness of the Arsikom ore field (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 131-142. DOI: 10.46698/VNC.2024.57.92.010

## Введение

Центральная часть горной области Северного Кавказа представляет собой регион, наиболее насыщенный рудами цветных и редких металлов. Вместе с тем, в последние годы в регионе обнаружены проявления золота различных геолого-промышленных типов, в том числе наиболее перспективных, так называемых «крупнообъемных в черносланцевых комплексах» [Гурбанов и др., 2020; Черкашин и др., 2022 и др.]. Накопленный за последнее время геологический материал в совокупности с положительными результатами поисковых работ последних лет на Северном Кавказе дает возможность путем анализа и обобщений приблизиться к разработке региональных генетических и геолого-поисковых моделей золоторудных месторождений крупнообъемного черносланцевого типа на основе современных концепций, учитывающих геолого-геофизические и минерагенические особенности Северного Кавказа.

Современное состояние в области исследования золотого оруденения в черносланцевых толщах сводится к многообразию трактовок его генезиса и методов оценок промышленного потенциала месторождений. Если в отношении промышленного потенциала существует практически единодушное мнение о значительных перспективах таких месторождений, подтверждаемых результатами поисковых и геологоразведочных работ, то в отношении их генезиса мнения сильно различаются. Дело в том, что во многих таких месторождениях обнаруживаются признаки как седиментагенного, так и вулканогенно-осадочного, метаморфогенного и магматогенно-гидротермального происхождения. Объединение этих фактов нашло отражение в примеряющей гипотезе их полигенно-полихронного формирования [Курбанов и др., 1992; Кряжев, 2017; Voisey et al., 2020 и др.]. В связи с предложенной гипотезой, становится очевидной необходимость всестороннего изучения вещественного состава, геологических условий локализации золотоносных минерализаций различных минерально-морфологических типов в черносланцевых толщах.

## Материал и методы

Статья подготовлена на основе изучения отчетов о поисковых работах на рудное золото на территориях республик Северного Кавказа, в том числе отчетов АО «Севосгеологоразведка», а также материалов автора, полученных в ходе полевых работ. Анализ материалов осуществлялся с учетом опыта автора, полученного в ходе многолетних исследований золоторудных месторождений в черносланцевых толщах различных регионов России. При этом использовались геологические, минералогические и геохимические методы, а также полевые геологические наблюдения и документация коренных обнажений.

## Результаты и обсуждение

Арсикомское рудное поле располагается в пределах Адайхох-Дарьяльской структурно-формационной зоны. Структурный план площади определяется пересечением северо-западных зон правосдвиговых деформаций и субширотных зон Адайком-Казбекской разломной зоны, а также сопутствующих им разломов более высоких порядков и широко развитой системы малоамплитудной оперяющей разломной тектоники. Определенную роль в строении площади играют и сильно сжатые, наклонённые и опрокинутые на юг субширотные складки.

В геологическом строении рудного поля доминируют глинистые сланцы с редкими маломощными прослоями и пачками мелкозернистых песчаников. Накопление терригенно-глинистой толщи, сопровождаемое синхронным базитовым магматизмом, происходило в условиях компенсированного прогиба, о чём свидетельствуют значительные мощности развитых здесь отложений. Возраст этих образований определяется, как нижнеюрский и они выделяются, как циклаурская свита ( $J_1ck$ ).

Рассматриваемая толща прорвана ранне-среднеюрскими габброидами казбекского комплекса, слагающими дайковые тела и штоки гипабиссальных фаций. Спорадически наблюдаются небольшие изометричные тела и штоки пикритов, преобразованные в серпентиниты.

На южном обрамлении рудного поля развита терригенная толща казбекской свиты ( $J_1kz$ ), в составе которой преобладают серые песчаники с характерным присутствием тонкой сингенетичной и метакристаллической вкрапленности пирита.

На территории рудного поля выявлен целый ряд золотоносных и потенциально золотоносных минерализаций, представленных рудопроявлениями и пунктами минерализации кварцево-жильно-прожилкового и сульфидно-вкрапленного минерально-морфологических типов. Практически все рудопроявления и пункты минерализации локализованы в черносланцевых породах циклаурской свиты (рис. 1).

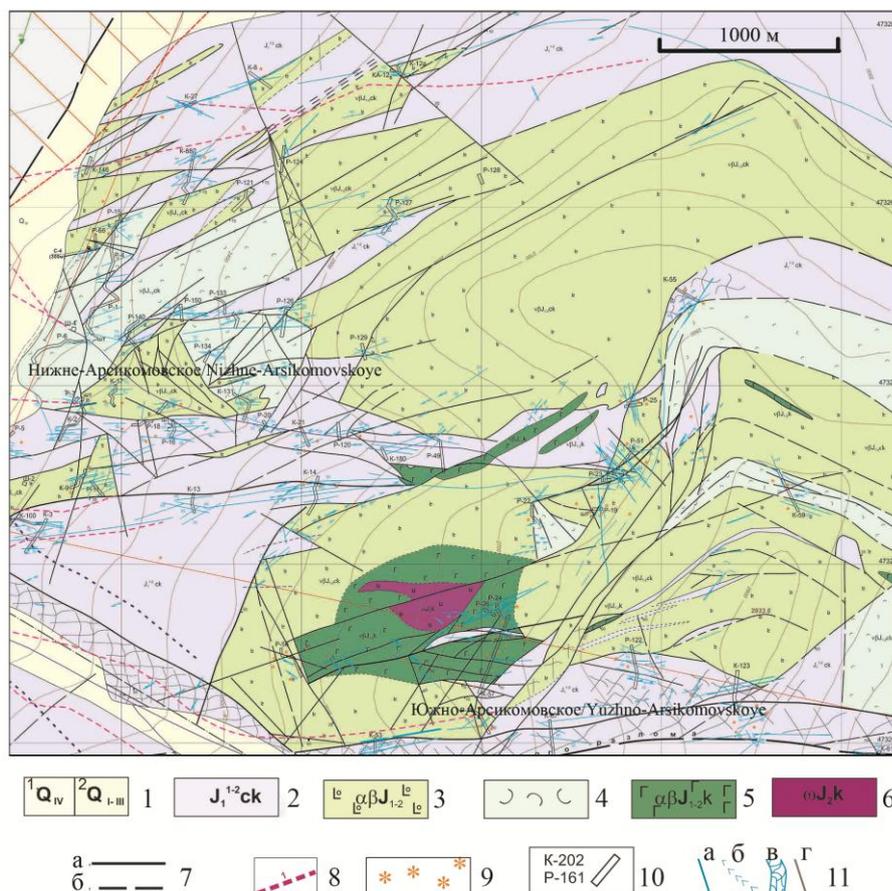


Рис. 1. Избирательная локализация рудных минерализаций в углеродисто-терригенных породах циклаурской свиты в пределах Арсикомского рудного поля: 1 – четвертичные отложения; 2–4 – циклаурская свита: 2 – углеродистые филлитовидные и аспидные сланцы с прослоями песчаников и горизонтами туфов среднего-основного состава; 3 – тиллоу лавы, спилиты, вариолиты, витрофиры, мандельштейны; 4 – аквагенные туфы; 5–6 – казбекская габбро-долерит-пикритовая формация: 5 – штоки и дайки габбро, габбро-долеритов, 6 – дайки и штоки пикритов,

апопикритовых серпентинитов; 7 – разломы: а) установленные, б) предполагаемые; 8 – геофизические аномалии ВП; 9 – лимонитизация; 10 – поисковые каналы и их номера; 11 – объекты рудных минерализаций; а) кварцевые жилы и прожилки, б) объемное окварцевание, в) зоны брекчирования с карбонатно-кварцевым цементом, г) карбонатные жилы и прожилки /

*Fig. 1. Selective localization of ore mineralization in carbonaceous-terrigenous rocks of the Cyclaurian formation within the Arsikomovsky ore field: 1 – quaternary deposits; 2–4 – Cyclaurian formation: 2 – carbonaceous phyllite and aspid shales with sandstone interlayers and tuff horizons of medium-basic composition; 3 – lava pillars, spilites, variolites, vitrophyres, mandelsteins; 4 – aquagenic truffs; 5–6 – Kazbek gabbro-diabase-picrite formation: 5 – stocks and dikes of gabbro, gabbro-diabases, 6 – dikes and stocks of picrites, apopicrite serpentinites; 7 – faults: a) established, b) suspected; 8 – geophysical anomalies of the VP; 9 – limonitization; 10 – prospecting ditches and their numbers; 11 – objects of ore mineralization; a) quartz veins and veins, b) volumetric calcification, c) breccia zones with carbonate-quartz cement, d) carbonate veins and veins*

Циклаурская свита (*J<sub>1ck</sub>*) представлена относительно монотонной толщей углеродистых глинистых и филлитовидных сланцев, алевролитов, линзами мелкозернистых олигомиктовых песчаников, иногда карбонатных. Свита содержит прослои и горизонты сингенетичных вулканогенных пород, представленных потоками лав и пирокластическими породами основного состава.

Углеродистые глинистые и филлитовидные сланцы темно-серые до черных, тонкослоистые, листоватые. В составе терригенной примеси алевролитистых разностей пород преобладают обломки хлорит-серицитовых сланцев, реже, кварца, плагиоклаза, карбонатов и чешуйки мусковита. В тяжелой фракции встречаются гетит, лимонит, ильменит, циркон, пирит, магнетит, пироксен и др. Основная ткань породы кварц-хлоритовая с бластоалевропелитовой структурой. Вблизи лавовых потоков и на их выклинивании глинистые сланцы имеют комковатую текстуру, плохо отсортированные, с линзовидными прослойками и обрывками прослоев и линз хаотично располагающихся песчанистых пород.

Песчаники и алевролиты, различаясь лишь размерами слагающих их частиц, часто переходят фациально друг в друга. Это серые и темно-серые породы, сложенные угловатыми и полуокатанными зернами кварца, плагиоклаза, обломками эффузивных пород и микрокварцитов. Цемент кварц-серицит-хлоритовый порового типа.

Туфогенные разности пород отличаются увеличенным количеством частиц эффузивных пород и остроугольных зерен плагиоклазов и кварца.

В тектонических зонах сланцы подвержены динамометаморфизму, в связи с чем становятся более плотными и тонкорассланцованными, в них появляются новообразования серицита, придающего породам филлитовидный облик. В зоне Главного надвига сланцы превращаются в бластомилониты. Они приобретают очковую текстуру за счет неравномерного скопления порфиробласт-кварца, серицита, ромбовидных кристаллов хиастолита и андалузита.

В соответствии с геохимическими характеристиками углеродисто-терригенных пород циклаурской свиты, приведенными в [Гаврилов, 2005], содержание органического углерода достигает 0,63 %, содержание рудных элементов в них близкое к кларковому (табл. 1). Однако следует отметить, что в глинистых разностях пород, накапливавшихся в осевой части бассейна одновременно с проявлявшейся здесь вулканической деятельностью наблюдается некоторое повышение содержаний Mn, Fe, Mo, Pb, Zn, Cu, Ni, Co [Гаврилов, 2005]. Как показано в работе [Страхов, 1976], такое обогащение связано с их поставкой в водоем гидротермами, сопровождавшими подводную вулканическую деятельность.

Таблица 1 / Table 1

Содержания органического углерода (в %) и элементов-примесей в терригенных породах циклаурской свиты, по [Гаврилов, 2005] с изменениями и дополнениями /  
 The content of organic carbon (in %) and impurity elements in terrigenous rocks of the Cyclaurian formation, according to [Gavrilov, 2005] with changes and additions

№ обр. / № sampl	C <sub>орг</sub>	Fe	Mn	Ti	P	Cr	Ni	V	Cu	Co	Pb	Ga	Ge	Mo
131-а/si	-	3,72	0,05	0,50	0,04	83	30	92	23	6	9	20	1,8	~1,5
133- а/si	0,3	2,42	0,05	0,51	0,01	88	~15	99	14	<5	28	20	1,8	2,1
135-г/cl	0,5	3,52	0,05	0,51	0,04	105	21	92	24	6	16	20	2,1	~1,5
137- г/cl	0,3	5,0	0,07	0,40	0,03	90	80	65	35	27	25	12	1,9	<1,5
138- а/si	0,1	1,90	0,04	0,51	0,02	125	20	104	18	8	14	20	2,0	1,5
139- г/cl	0,4	3,28	0,05	0,51	0,03	97	37	98	21	8	15	21	2,7	1,7
140- г/cl	0,55	4,33	0,06	0,42	0,02	80	76	62	24	27	13	12	1,7	<1,5
140- а/si	0,2	2,47	0,05	0,61	0,05	129	24	140	23	7	17	24	2,1	1,5
142- г/cl	0,4	4,63	0,08	0,46	0,02	81	46	88	24	12	26	16	2,3	~1,5
142- а/si	0,3	3,10	0,05	0,53	н/о	100	20	123	17	6	17	24	2,2	1,6
143- г/cl	0,6	4,34	0,07	0,51	н/о	105	64	142	135	19	13	27	2,4	1,5
144- г/cl	0,5	3,65	0,06	0,48	н/о	100	60	112	28	14	18	17	2,0	~1,5
363- г/cl	0,63	5,03	0,06	0,56	0,05	90	33	135	20	15	15	31	1,5	0,7
364- г/cl	0,42	4,61	0,07	0,58	0,09	63	45	120	5	22	14	29	1,5	0,8
475- г/cl	0,71	4,17	0,06	0,57	0,05	108	79	141	18	26	21	36	3,5	2,5
475-а/si	<0,1	5,18	0,08	0,28	0,02	74	48	65	26	8	16	~10	3,4	<1,5
476-п/sa	<0,1	3,85	0,06	0,38	0,03	105	44	98	20	~5	12	~10	1,6	<1,5
476-п/sa	<0,1	3,89	0,05	0,38	0,03	97	50	80	19	11	18	~10	1,6	<1,5
476- г/cl	0,74	4,20	0,06	0,77	0,07	133	60	202	<15	10	16	30	2,2	1,9
477- г/cl	0,30	4,72	0,05	0,57	0,05	100	75	115	28	16	18	28	2,5	1,6
477-п/sa	0,14	5,27	0,07	0,57	0,05	101	58	99	27	13	31	16	2,0	1,6

Примечание: г – глинистые породы, а – алевролиты, п – песчаники, C<sub>орг</sub>, Fe, Mn, Ti, P в %, остальные элементы в 10<sup>-4</sup>%, прочерк – не обнаружено /

Note: cl – clay rocks, si – siltstones, sa – sandstones, C<sub>орг</sub>, Fe, Mn, Ti, P in %, other elements in 10<sup>-4</sup>%, a dash – not found

### Золотоносные минерализации кварцево-жильно-прожилкового типа

Такие минерализации имеют наиболее широкое распространение. Они слагают рудные тела и зоны Южно-Арсикомского, Нижне-Арсикомского и Хардотчинского рудопроявлений, а также множество пунктов минерализации.

Южно-Арсикомское рудопроявление является наиболее крупным и наиболее изученным. Участок рудопроявления сложен филлитовидными сланцами циклаурской свиты, содержащими маломощные прослои и пакеты мелкозернистых песчаников и алевролитов. Толща осложнена рядом разрывных нарушений высоких порядков с субширотной и субмеридиональной ориентировками. Наиболее крупным нарушением является Льядонский разлом, ограничивающий с юга рудное поле.

Рудопроявление представлено мощной (3–10 м) линзующейся кварцевой жилой северо-восточного простирания с крутым падением на юго-восток. Жила занимает относительно Льядонского разлома оперяющее положение, локализуясь в его висья-

чем боку. Юго-западный фланг жилы перекрыт рыхлыми отложениями. К северо-востоку жила прослежена горными выработками на 1300 м и по восстанию в рельефе – на 620 м. Количество сульфидов в жиле, представленных пиритом, галенитом, сфалеритом, не более 2%, что в соответствии с классификацией Н.В. Петровской позволяет отнести ее к малосульфидной формации [Петровская, 1973], типичной для золотого оруденения, проявленного в углеродисто-терригенных толщах [Курбанов и др., 1992].

В своей средней части жила разветвляется на систему сближенных субпараллельных кварц-карбонатных жил, сопровождаемых зоной объёмного окварцевания, мощностью до 34 м. Из рудных минералов здесь наиболее распространёнными являются пирит и арсенопирит, реже отмечается антимонит. В узлах пересечения с надвиговыми структурами высоких порядков в зальбандах Южно-Арсикомской жилы отмечается минерализация реальгара, шеелита, иногда образующего густо-крапленые скопления.

В районе водораздела рек Бугультадон и Дзамарашдон, при переходе жилы в аквагенные туфы, мощность ее резко сокращается и далее оруденение продолжается в форме зоны дробления, включающей прожилки и линзы позднего кварца и лимонитизацию. Мощность зоны здесь не превышает 1,2 м. Западный фланг зоны на глубине 100 м вскрыт скважиной, где мощность кварцевой жилы составляет 1,6 м. Содержания золота в отдельных пробах варьируют от 0,6 до 3,6 г/т.

*Нижне-Арсикомское рудопроявление* представлено скоплением кварцевых жил, смятых в складки вместе с вмещающими породами (рис. 2), что может свидетельствовать о формировании этих жил до проявления складчатости и разрывных деформаций.



Рис. 2. Смятая в складки вместе с вмещающими углеродистыми сланцами кварцевая жила.  
*Нижне-Арсикомское рудопроявление /*

Fig. 2. A quartz vein crumpled into folds together with the enclosing carbonaceous shales.  
*Nizhne-Arsikomskoye ore occurrence*

Аналогичную картину мы наблюдали в пределах Малка-Муштинского рудного узла [Парада, 2022]. Суммарная мощность зоны деформированных кварцевых

жил составляет 0,5–5,0 м. В пределах восточной и западной ветвей зоны смятия и дробления прослеживаются более поздние короткие (до 5–6 м) жилы и линзы кварцевого, реже – кварц-карбонатного состава, мощностью 0,3–1,0 м. В них отмечаются обломки вмещающих углеродистых аргиллитов, за счет чего они приобретают брекчиевую текстуру.

Кварцевые жилы содержат вкрапленность пирита, халькопирита, сфалерита, галенита, иногда арсенопирита. Содержание сульфидов в жиле не превышает 2%. Вкрапленность мелкокристаллического пирита отмечается также во вмещающих породах.

Зона смятых жил Нижне-Арсикомского рудопроявления пересечена буровыми скважинами на глубине 86,6–88,0 м, где при истинной мощности 1,0 м содержание золота составило 1,55 г/т, и на глубине 229,5–245,3 м, где на мощность 7,3 м, содержание золота составило 1,29 г/т, серебра – 14,29 г/т.

*Хардотчинское рудопроявление* расположено западнее Нижне-Арсикомского (за рамкой рис. 1) и представлено двумя сближенными кварцевыми жилами субширотного простирания мощностью 0,5 и 1,0 м и протяженностью 900 м. Рудная минерализация представлена неравномерной гнездовой вкрапленностью в кварце мелкозернистого галенита, изредка отмечается халькопирит. Содержания золота в жилах составляют 0,8 и 1,1 г/т, соответственно.

Помимо описанных рудопроявлений в пределах Арсикомского рудного поля был выявлен целый ряд пунктов минерализации аналогичного описанным выше рудопроявлениям строения и состава.

В большинстве охарактеризованных рудопроявлений отмечается литологический контроль оруденения. Так, при переходе из филлитовидных сланцев в вулканогенные породы циклаурской свиты состав рудоносных минерализованных зон меняется, кварцевые жилы исчезают, а минерализованная зона продолжается в виде области повышенной трещиноватости и брекчирования, сцементированной карбонатами (кальцит, анкерит, сидерит, магнезит), хлоритами, халцедоном, гидроокислами железа.

Повышенные концентрации золота в основном отмечаются в жильном кварце.

Минерально-морфологические особенности кварцево-жильных проявлений позволяют отнести их к объектам до складчатой минерализации. При этом, на основании изотопных данных по хорошо изученным рудам крупных месторождений золота, таких как Неждановское в Якутии [Chernyshev et al., 2012] предполагается, что кварц и определенная доля рудных элементов были заимствованы из вмещающих пород.

### Золотоносные минерализации сульфидно-вкрапленного типа

Сульфидно-вкрапленная минерализация представлена двумя минеральными разновидностями: вкрапленностью пирита и вкрапленностью пирротина.

Вкрапленность пирита отмечается практически по всему разрезу циклаурской свиты с отдельными интервалами повышенных его концентраций. Так, по скважине №1 выделен интервал 191,7–199,0 м углеродистых филлитовидных сланцев с повышенной концентрацией вкрапленного пирита. Содержания золота в керновых пробах из этого интервала варьируют от 0,44 до 0,7 г/т. Как показано в работах [Large et al., 2011; Large, Maslennikov, 2020] с пиритом и другими рассеянными сульфида-

ми обычно связано тонкодисперсное золото. Однако, на крупнейшем в России месторождении золота сульфидно-вкрапленного типа Сухой Лог, локализованного в углеродистой толще, самородное золото представлено чаще относительно крупными выделениями в крупнокристаллическом пирите. В рудах этого месторождения также обнаружены минералы платиновой группы [Distler et al., 2004].

Более четко выделяются горизонты пород с пирротиновой минерализацией. Выделяются два таких горизонта в середине литолого-стратиграфического разреза циклаурской свиты, мощностью 14 и 13 м, подстилаемые и перекрываемые слоями вулканогенных пород. Один из выделенных пирротинизированных горизонтов пересечен буровой скважиной №1 в интервале 211–217 м, где содержания золота составили от 1,24 до 2,06 г/т.

В литологическом отношении горизонты пирротиновой минерализации представлены углеродистыми алевритистыми и глинистыми сланцами с прослоями алевролитов и туфов. При этом вкрапленность пирротина избирательно локализуется в углеродистых алевролитах. Такое строение и состав выделенных горизонтов соответствует модели гидротермально-осадочного рудообразования [Скрипченко, 1972; Tomish, 1986; Рябов, Богуш, 2012 и др.]. Как показано выше, обогащение сульфидами и рудными элементами отдельных участков углеродистых осадков циклаурской свиты связано с накоплением их в осевой части седиментационного бассейна одновременно с проявлявшейся здесь вулканической и сопряженной субмаринной гидротермальной деятельностью. Такой механизм показан на примере ранней (седиментационной) стадии формирования месторождения Сухой Лог по результатам изотопных исследований [Кряжев, 2017].

Как показано в работах [Рябов, 1994; Богуш и др., 2010 и др.] для объектов гидротермально-осадочного колчеданного оруденения характерна примесь платины и платиноидов, которые, наряду с самородным золотом, концентрируются в продуктах обогащения руд Урупского медноколчеданного месторождения, а также обнаруживаются в аллювии рек Урупа, Власинчихи, Большая Лаба и др. Наличие минералов платины в связи с пирротиновой вкрапленностью в черных сланцах андрюкской свиты палеозоя установлено под микроскопом в работе [Глазырина, Глазырин, 2011]. В детально опробованных углеродистых алевролитах артыкчакской свиты палеозойской черносланцевой толщи Передового хребта, по результатам химических анализов установлен горизонт с вкрапленностью пирротина и повышенными содержаниями Pt и Pd [Парада, 2023].

В связи с изложенным не следует исключать возможность обнаружения в пирротинизированных углеродистых алевролитах циклаурской свиты повышенных концентраций металлов платиновой группы.

## Выводы

1. Золотоносные и потенциально золотоносные минерализации Арсикомского рудного поля в подавляющем большинстве представлены кварцево-жильно-прожилковым минерально-морфологическим типом золотого оруденения.

2. Отдельные кварцевые жилы и прожилки, а также кварцево-жильно-прожилковые зоны избирательно локализируются в углеродистых сланцах циклаурской свиты. Практически все они повсеместно подверглись пликативным и дизъюнктивным деформациям вместе с вмещающими породами, образуя минерализованные тектонические зоны.

3. При переходе из филлитовидных сланцев в вулканогенные породы циклаурской свиты кварцевые жилы выклиниваются, а минерализованная зона продолжается в виде области брекчирования, сцементированной поздними карбонатами, хлоритами, халцедоном, гидроокислами железа.

4. В качестве одного из наиболее перспективных типов потенциально золотоносных (возможно и платиноидоносных) минерализаций следует считать проявления пирротиновой минерализации вкрапленного типа, избирательно проявленной в углеродистых алевролитах средней части вулканогенно-терригенного разреза циклаурской свиты.

### Литература

1. Богуш И.А., Рябов Г.В., Кафтанатий А.Б. Минералы платиновой группы в аллювии бассейна рек Уруп – Большая Лаба (Северный Кавказ). // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 435. № 3. – С. 357–360.

2. Гаврилов Ю.О. Динамика формирования юрского терригенного комплекса Большого Кавказа: седиментология, геохимия, постседиментационные преобразования. – М.: ГЕОС, 2005. – 302 с.

3. Глазырина Н.В., Глазырин Е.А. Кобальтин-пентландит-пирротиновая сульфидная минерализация черносланцевых отложений. // Записки Российского минералогического общества. – 2011. – Т. 140. № 1. – С. 83–90.

4. Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Лексин А. Б., Гурбанова О. А., Лолаев А. Б., Оганесян А. Х. О возможности обнаружения промышленного ранне-среднеюрского полиметаллически-золото-платиноидного оруденения черносланцевого типа в Северной Осетии (часть 1). // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 6–29. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.45.001.

5. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах. // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 28–38.

6. Курбанов Н.К., Арифуров Ч.Х., Ехиванов В.А., Романов В.И. Полигенно-полихронные золоторудные месторождения терригенных комплексов. // Руды и металлы. – 1992. – Стартовый номер. – С. 54–61.

7. Парада С.Г. Потенциально золотоносные минерализации в углеродистых породах Малка-Муштинского рудного узла (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 129–141. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.17.010.

8. Парада С.Г. Платина и платиноиды в палеозойских черносланцевых толщах Передового хребта (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 112–124. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.73.008.

9. Петровская Н.В. Самородное золото. – М.: Наука, 1973. – 348 с.

10. Рябов Г.В. Платиноносность руд колчеданных объектов Северного Кавказа (на примере Урупского месторождения). // Сб. науч. трудов «Геология, оценка и локальный прогноз месторождений цветных, редких и благородных металлов». – Новочеркасск, ЮРГТУ(НПИ). – 1994. – С. 25–32.

11. Рябов Г.В., Богуш И.А. Типизация колчеданных месторождений Северного Кавказа. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 88–91.

12. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. – М.: Недра. – 1972. – 216 с.

13. Страхов Н.М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. – М.: Наука, 1976. – 300 с.

14. Черкашин В.И., Богуш И.А., Рябов Г.В., Исаева Н.А. Металлогеническая модель благородных металлов фанерозоя Северного Кавказа. // Труды Института геологии Даге-

станского научного центра РАН. – 2022. – № 4. Вып. 91. – С. 4–9. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-4-9.

15. Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Goltsman Y.V., Gamyarin G.N., Chugaev A.V., Bairova E.D., Bakharev A.G., Kotov A.B., Sal'nikova E.B. Geochronology of igneous rocks at and near to the Nezhdaninka gold deposit, Yakutia, Russia: U-Pb, Rb-Sr, and Sm-Nd isotopic data. // *Geology of Ore Deposits*. – 2012. – Vol. 54. No. 6. – pp. 411–433.

16. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. // *Ore Geology Reviews*. – 2004. – Vol. 24. – pp. 7–44.

17. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. // *Economic Geology*. – 2011. – Vol. 106. – pp. 331–358.

18. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits. // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. No. 4. – pp. 339–352.

19. Tomish S.A. An outline of the Economic Geology of Kalgoorlie, Western Australia. // *South African Journal of Geology*. – 1986. – Vol. 89. No. 1. – pp. 35–55.

20. Voisey C.R., Willis D., Tomkins A.G., Wilson C.J.L., Micklethwaite S., Salvemin F., Bougoure J., Rickard W.D.A. Aseismic refinement of orogenic gold systems. // *Economic Geology*. – 2020. – Vol. 115. No. 1. – pp. 33–50.

## References

1. Bogush I.A., Ryabov G.V., Kaftanatii A.B. The platinum group minerals in alluvial deposits of the basin of the Urup and Bolshaya Laba rivers (North Caucasus). *Doklady Earth Sciences*. 2010. Vol. 435. No. 3. pp. 357–360. (In Russ.)

2. Gavrilov Yu.O. Dynamics of formation of the Jurassic terrigenous complex of the Greater Caucasus: sedimentology, geochemistry, post-sedimentation transformations. Moscow. GEOS. 2005. 302 p. (In Russ.)

3. Glazyrina N.V., Glazyrin E.A. Cobaltite-pentlandite-pyrrhotite authigenic sulfide mineralization of black-shale sediments. In: *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 2011. Vol. 140. No. 1. – pp. 83–90. (In Russ.)

4. Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Ya., Gazeev V.M., Lexin A.B., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Oganessian A.Kh. On the possibility of detecting of industrial early-middle Jurassic polymetallic-gold-platinoid mineralization of the black-shale type in North Ossetia (part 1). *Geology and Geophysics of Russian South*. Vol. 10. No. 4. pp. 6–29. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.45.001. (In Russ.)

5. Kryazhev S.G. Isotope-geochemical and genetic models of gold deposits in carbonaceous-terrigenous strata. *National Geology*. 2017. No. 1. pp. 28–38. (In Russ.)

6. Kurbanov N.K., Arifulov Ch.X., Yekhivanov V.A., Romanov V.I. Polygenic polychronous gold deposits of terrigenous complexes. *Ores and metals*. 1992. Starting number. pp. 54–61. (In Russ.)

7. Parada S.G. Potentially gold-bearing mineralization in carbonaceous rocks of the Malka-Mushta ore node (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. Vol. 12. No. 4. pp. 129–141. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.17.010. (In Russ.)

8. Parada S.G. Platinum and platinoids in Paleozoic black shale strata front ridge (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. Vol. 13. No. 1. pp. 112–124. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.73.008. (In Russ.)

9. Petrovskaya N.V. *Nugget gold*. Moscow. Nauka. 1973. 348 p. (In Russ.)

10. Ryabov G.V. Platiniferousness of ores of the Northern Caucasus sintered objects (on the example of the Urup deposit). In: *Proceedings “Geology, evaluation and local forecast of deposits of non-ferrous, rare and noble metals”*. Novocherkassk. YRG TU(NPI). 1994. pp. 25–32. (In Russ.)

11. Ryabov G.V., Bogush I.A. Typification of copper pyritic deposits of the North Caucasus. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2012. No. 5. pp. 88–91. (In Russ.)
12. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow. Nedra. 1972. 216 p. (In Russ.)
13. Strakhov N.M. Problems of geochemistry of modern oceanic lithogenesis. Moscow. Nauka. 1976. 300 p. (In Russ.)
14. Cherkashin V.I., Bogush I.A., Ryabov G.V., Isaeva N.A. Metallogenic model of Phanerozoic noble metals of the North Caucasus. In: *Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS.* No. 4. Issue 91. pp. 4-9. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-4-9. (In Russ.)
15. Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Goltsman Y.V., Gamyarin G.N., Chugaev A.V., Bairova E.D., Bakharev A.G., Kotov A.B., Sal'nikova E.B. Geochronology of igneous rocks at and near to the Nezhdaninka gold deposit, Yakutia, Russia: U-Pb, Rb-Sr, and Sm-Nd isotopic data. *Geology of Ore Deposits.* 2012. Vol. 54. No. 6. pp. 411–433.
16. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews.* 2004. Vol. 24. pp. 7–44.
17. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology.* 2011. Vol. 106. pp. 331–358.
18. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits. *Minerals.* 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 339–352.
19. Tomish S.A. An outline of the Economic Geology of Kalgoorlie, Western Australia. *South African Journal of Geology.* 1986. Vol. 89. No. 1. pp. 35–55.
20. Voisey C.R., Willis D., Tomkins A.G., Wilson C.J.L., Micklethwaite S., Salvamin F., Bougoure J., Rickard W.D.A. Aseismic refinement of orogenic gold systems. *Economic Geology.* 2020. Vol. 115. No. 1. pp. 33–50.

УДК 553.435+551.243.6

DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

Оригинальная статья

## Объемная цифровая модель тектонической структуры глубоких горизонтов Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ)

Г.С. Январёв , Б.Б. Бобмуротов 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
e-mail: egor\_yan@list.ru

Статья поступила: 28.05.2024, доработана: 18.06.2024, принята к публикации: 19.06.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Объемное цифровое моделирование тел полезных ископаемых в процессе добычи и эксплуатационной разведки все более активно внедряется в практику работ горнодобывающих предприятий, в том числе для построения моделей тектонических структур и анализа воздействия тектоники на рудные тела. В настоящей работе раскрыта методика анализа тектонической структуры глубоких горизонтов западного фланга Главной рудной залежи Урупского месторождения, приведены результаты построения объемных моделей разрывных нарушений, на основе которых возможно получение новой информации и выявление скрытых, ранее не фиксированных закономерностей. **Цель работы.** Построение объемной модели и анализ внутренней структуры Урупского разлома, разбивающего главную рудную залежь на тектонические блоки. Комплексирование инструментария горно-геологической информационной системы «Micromine» для построения объемной модели тектонической зоны. Анализ воздействия разрывных нарушений на рудную залежь. **Методика исследования.** Для построения модели построены матричная модель кровли рудной залежи, стереограмма ориентировки трещинных структур, проведен ее кластерный анализ. Прослежены наиболее крупные и значимые смещения по основным направлениям трещиноватости. Построены каркасы рудного тела, ограниченные трещинами. **Результаты исследования.** Построены каркасные модели основных разрывных структур месторождения, каркасные модели тектонических блоков Главной рудной залежи. Сделан вывод о сложнопостроенной трехмерной геометрии Урупского разлома, состоящего из периодических серий трещин разного порядка, кулисообразно расположенных как по отношению к генеральной линии простирания разлома, так и по отношению друг к другу. Установлен левосдвиговый характер Урупского разлома. Внутренняя структура разлома обусловлена периодической серией малоамплитудных сбросов косо ориентированных к генеральному направлению сдвига. Амплитуда смещения рудных блоков вдоль разломов компенсируется серией взбросов. Блоки образуют мозаику притертых рудных тел, смещенных относительно друг друга в разных направлениях.

**Ключевые слова:** Урупское месторождение, ГГИС «Micromine», тектоническая структура, сдвиг, цифровая модель.

**Для цитирования:** Январёв Г.С., Бобмуротов Б.Б. Объемная цифровая модель тектонической структуры глубоких горизонтов Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 143-153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

Original paper

# A volumetric digital model of the tectonic structure of the deep horizons of the Urup copper-pyrite deposit (North Caucasus)

G.S. Yanvarev<sup>ID</sup>, B.B. Bobomurotov<sup>ID</sup>

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk 346428, Russian Federation,  
e-mail: egor\_yan@list.ru

Received: 28.05.2024, revised: 18.06.2024, accepted: 19.06.2024

**Abstract: Relevance.** Volumetric digital modeling of mineral bodies in the process of mining and operational exploration is increasingly being introduced into the practice of mining enterprises, including for building models of tectonic structures and analyzing the impact of tectonics on ore bodies. In this paper, the methodology for analyzing the tectonic structure of the deep horizons of the western flank of the Main ore deposit of the Urup deposit is disclosed, the results of constructing volumetric models of discontinuous faults are presented, on the basis of which it is possible to obtain new information and identify hidden, previously not fixed patterns. **Aim.** Construction of a volumetric model and analysis of the internal structure of the Urup fault, which divides the main ore deposit into tectonic blocks. Integration of the tools of the mining and geological information system "Micromine" to build a volumetric model of the tectonic zone. Analysis of the impact of discontinuous faults on the ore deposit. **Methods.** To construct the model, a matrix model of the roof of an ore deposit orientation stereograms of fractured structures were constructed, and their cluster analysis was carried out. The largest and most significant displacements in the main directions of fracturing have been traced. The skeletons of the ore body, bounded by cracks, were built. **Results.** Frame models of the main discontinuous structures of the deposit and frame models of tectonic blocks for the Main ore deposit were constructed. The conclusion is made about the complexly constructed three-dimensional geometrization of the Urup fault, consisting of periodic series of cracks of different orders, arranged in a backstage manner both in relation to the general fault line and in relation to each other. The left-thrust character of the Urup fault has been established. The internal structure of the fault is caused by a periodic series of low-amplitude slip faults obliquely oriented towards the general direction of shear. The amplitude of the displacement of ore blocks along the faults is compensated by a series of upthrusts. The blocks form a mosaic of ground ore bodies displaced relative to each other in different directions.

**Keywords:** Urup field, GIS "Micromine", tectonic structure, shift, digital model.

**For citation:** Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. A volumetric digital model of the tectonic structure of the deep horizons of the Urup copper-pyrite deposit (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 143-153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

## Введение

Урупское медноколчеданное месторождение расположено в Лабино-Урупском горнопромышленном центре и является основным эксплуатируемым объектом меди Северного Кавказа [Богущ и др., 2021]. В геологических разрезах Урупского рудного поля выделяются три структурных этажа: юрский, пермский и девонский. В пределах рудного поля известно три медноколчеданных месторождения (Урупское, Власенчихинское, Скалистое) и несколько рудопроявлений. Все месторождения и рудопроявления пространственно и генетически связаны с девонскими от-

ложениями. Власенчихинское месторождение полностью отработано, Урупское и Скалистое – разрабатываются в настоящее время. На Урупском месторождении рудовмещающий девонский осадочно-вулканогенный комплекс приурочен к южному крылу сводового поднятия, вытянутого в субширотном направлении. В структурном плане месторождение представляет собой моноклираль, осложненную разрывными нарушениями разных направлений (рис. 1).

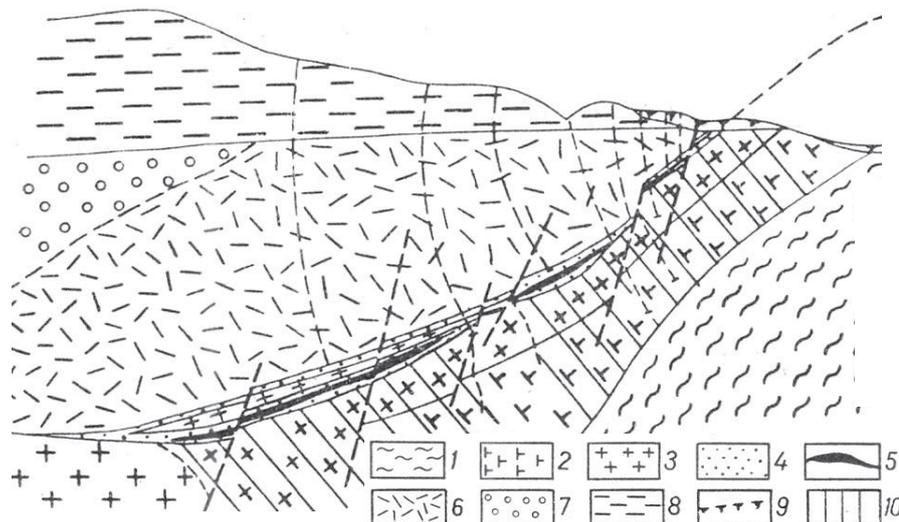


Рис. 1. Структурный разрез Урупского месторождения (по Н.С.Скрипченко [1972]).  
1 – филлиты/ phyllites; 2 – диабазовые порфириты/diabase porphyrites; 3 – кварцевые альбитофиры/ quartz albitophyres; 4 – туфогенно-осадочная толща/tuff-sedimentary strata;  
5 – колчеданная руда/pyrite ore; 6 – туфы/tuffs; 7 – пермские конгломераты//

Fig. 1. The structural section of the Urupskoye field. By N.S.Skripchenko [1972].  
Permian conglomerates; 8 – юрские отложения/Jurassic deposits; 9 – делювий/deluvium;  
10 – гидротермально-измененные породы/hydrothermally modified rocks

Большинство аналитических работ, опубликованных по месторождению, базируется на информации, полученной при разведке и эксплуатации верхних горизонтов (от I до X) [Скрипченко, 1966; Савченко и др., 1973; Hutchinson, 1973; Смирнов, 1978; Твалчрелидзе и др., 1979; Рябов, 1983; Skripchenko et al., 1986]. В настоящее время накоплен большой объем информации, полученной при эксплуатации глубоких горизонтов (XII–XVI), который требует дополнительного анализа с использованием современного инструментария цифрового объемного моделирования.

Ранее впервые для глубоких горизонтов Урупского медноколчеданного месторождения была построена объемная цифровая модель Главной рудной залежи, иллюстрирующая пространственное распределение содержаний и запасов рудных компонентов, раскрыта последовательность выполнения операций по построению блочной модели [Январёв, Бобомуротов, 2023].

В настоящей работе продолжено изучение глубоких горизонтов, впервые создана объемная модель основной тектонической структуры западного фланга месторождения – Урупского разлома, где эта структура рассматривается как сложно-построенное геологическое тело сдвигового характера.

## Методы работы

Цифровое моделирование месторождений полезных ископаемых все более активно используется горнодобывающими предприятиями, в том числе для постро-

ения моделей тектонических структур и анализа воздействия тектоники на рудные тела [Sides, 1997; Mao et al., 2020; Liu et al., 2022].

Главная залежь Урупского месторождения обобщенно представляет собой линзу массивных колчеданных руд, субсогласных прожилков и рассеянной вкрапленности сульфидов на контакте эффузивных и туфогенно-осадочных пород, падающую на юг под углом 22–25°. В связи с широким развитием пострудных разрывных нарушений рудная залежь разбита на отдельные тектонические блоки различных размеров (от долей метров до десятков метров), смещённых относительно друг друга.

Разрывные нарушения, проявленные на верхних горизонтах (III–VI), и их роль в формировании структуры месторождения ранее изучалась сотрудниками кафедры месторождений и разведки полезных ископаемых Новочеркасского политехнического института (НПИ) [Савченко и др., 1973]. Для верхних горизонтов установлено преобладание разрывов северо-западного простирания. Наиболее распространены сбросы и надвиги. Доминирует система продольных разрывов с простиранием 300° и падением на юго-запад под углом 50–70°. К этой системе относятся самые крупные нарушения месторождения – Урупский и Центральный разломы с амплитудой смещения 70–120 м, показанные на совмещенном плане горизонтов. План дополнен авторами конфигурацией рудного тела на XII–XVIII горизонтах. Также авторами обозначены Диагональный и Западный сбросы, ориентированные под углом 30° к простиранию основных разломов со смещением более 30 м (рис. 2).

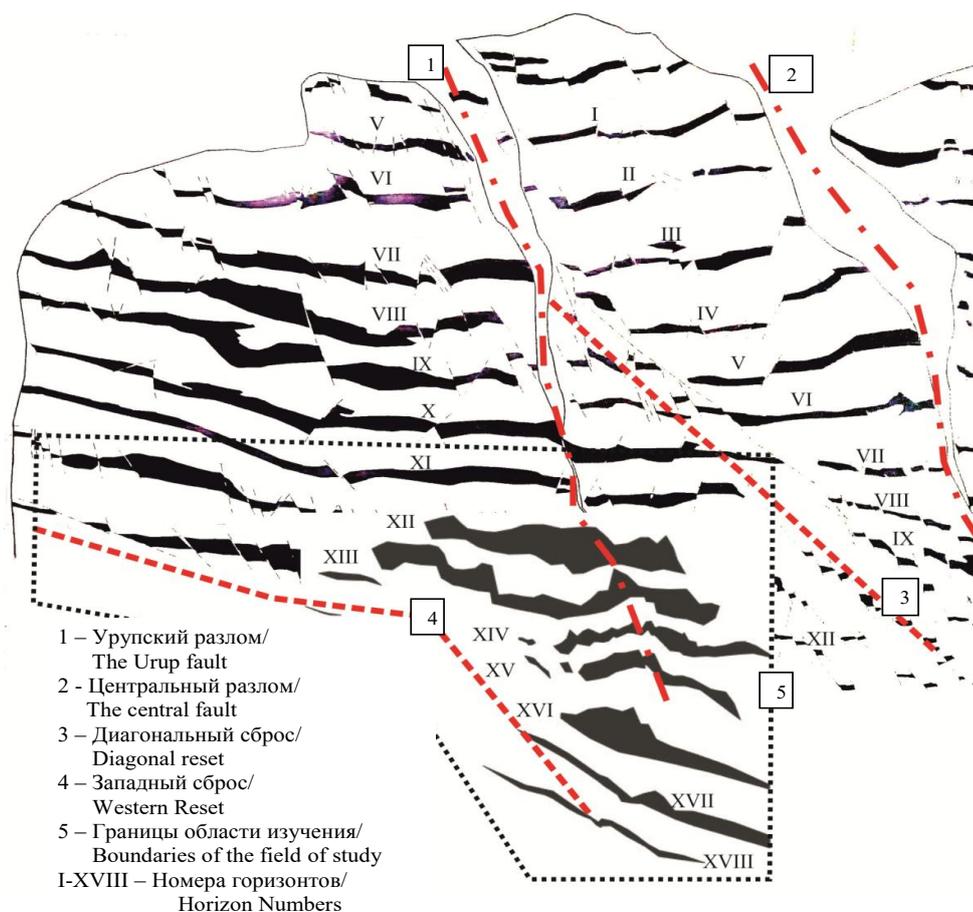


Рис. 2. Совмещенный план 0–XVIII горизонтов Главной рудной залежи (по В.Л. и О.В. Андреевым с дополнениями авторов)/

Fig. 2. Combined plan 0–XVIII horizons of the Main ore deposit (by V.L. and O.V. Andreev with additions by the authors)

Тектоническая нарушенность глубоких горизонтов ранее детально не изучалась и не анализировалась. Авторами продолжено изучение разрывных нарушений на глубоких горизонтах западного фланга месторождения. Исходными данными для выполнения работы являются материалы Урупского ГОКа, представленные разрезами эксплуатационной разведки м-ба 1:200. На каждом из разрезов от 4 до 37, охватывающих широкую зону проявления Урупского разлома, снимались трехмерные координаты точек нарушений, зафиксированных в горных выработках с определением азимутов и углов падения. Таким образом, была создана база для анализа разрывных нарушений, состоящая из 300 замеров координат и элементов залегания трещин. Также сняты трехмерные координаты кровли Главной залежи, зафиксированные 520 скважинами эксплуатационной разведки в разрезах от 8 до 99.

На рис. 3 показаны цифровая матричная модель (грид) кровли рудного тела в области изучения в свето-теневом представлении и стереограмма замеров элементов залегания трещин. На гриде отчетливо видно, что участки погружений и поднятий кровли образуют периодическую серию коротких валов, уверенно трассирующих простирание Урупского разлома, но ориентированных под углом к генеральной линии простирания.

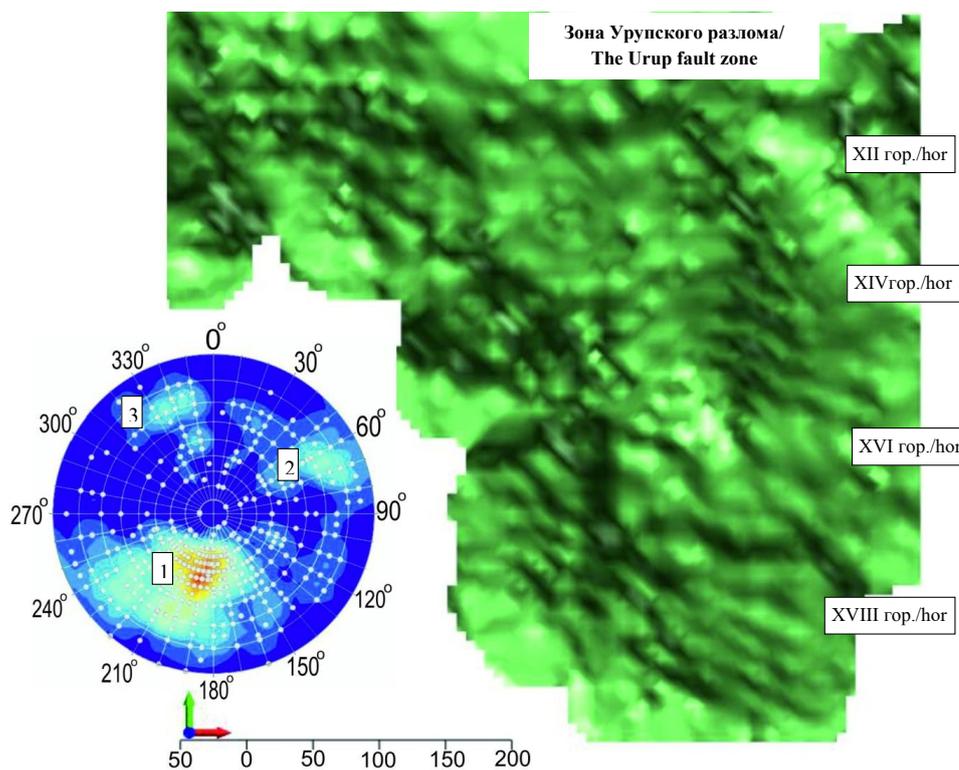


Рис. 3. Матричная модель отметок кровли Главного рудного тела на глубоких горизонтах в границах области изучения (пояснения в тексте)/

Fig. 3. Matrix model of the roof marks of the Main ore body at deep horizons within the boundaries of the field of study (explanations in the text)

По базе разрывных нарушений построена стереограмма (полярная сетка, верхнее полушарие, равноплощадная проекция), на которой отчетливо видны три доминирующих кластера нарушений, выделенных на основе их плотности распределения. Средние параметры элементов залегания кластеров трещин приведены в табл. 1.

Таблица 1/ Table 1

**Усредненная характеристика разрывных нарушений в области Урупского разлома/  
The average characteristic of discontinuous faults in the Urup fault area**

Номер кластера/ Cluster number	Азимут падения/ Azimuth of the fall	Азимут простирания/ Azimuth of the strike	Угол падения/ Angle of incidence	Количество замеров/ Number of measurements
1	199°	289°	42°	440
2	64°	331°	28°	38
3	337°	67°	21°	40

Трещины первого кластера в разрезах фиксируются как многочисленные сбросы с опущенным юго-западным крылом. Амплитуда смещения не превышает первых метров и быстро затухает в породах подошвы и кровли рудного тела. Второй кластер трещин гораздо менее многочисленен, но в разрезах проявлен отчетливо в виде взбросов. Амплитуда смещения достигает 20 метров. Трещины третьего кластера падают на северо-запад, имеют минимальную амплитуду смещения и в разрезах на форме рудных тел практически не отражаются.

Количество трещин первого кластера в области Урупского разлома, выявленных в горных выработках, составляет от 3 до 10 на каждые 100 метров протяженности рудного тела. Для геометризации и объемного моделирования конкретных разломов были выбраны пять уверенно увязанных нарушений, фиксированных трещинами первого кластера. При увязке линий разломов в разрезах использовались геологическая документация буровых скважин и горных выработок, закономерности зонального распределения содержаний рудных компонентов, выявленные ранее [Бобомуротов, 2022; Бобомуротов, Январев, 2023]. Важно отметить, что каждый из разломов представляет собой пространственно сближенную периодическую серию разрывов, обобщенных в единую плоскость. Для этих плоскостей с использованием инструментария ГГИС Micromine были построены каркасы. Аналогичным образом построены каркасы для трех разломов по трещинам второго кластера и каркас западного сброса (рис. 4).

При рассмотрении общей картины пространственного расположения разрывов разного порядка выявляются вложенные структуры с одинаковой конфигурацией: разломы второго порядка (Диагональный и Западный сбросы) ориентированы под углом к разломам первого порядка (Урупскому и Центральному); разломы третьего порядка (трещины первого кластера) ориентированы под таким же углом к условной линии Урупского разлома; нарушения четвертого порядка (валы дешифрирования матричной модели кровли залежи) также косо ориентированы к выделенным разломам в разрезах.

Трещины второго кластера трассируют разрывные нарушения субширотного простирания. Всего нами уверенно были увязаны три разлома, по которым южные крылья подняты по отношению к северным на 15-20 метров (см. рис. 4). Для поверхностей разломов характерна винтообразная форма, когда восточная часть плоскости смещения имеет падение на северо-восток, а западная – на юго-запад. То есть эти трещины фиксируют поверхности срыва и скручивания, возникающие при сжатии [Уилсон, 1985].

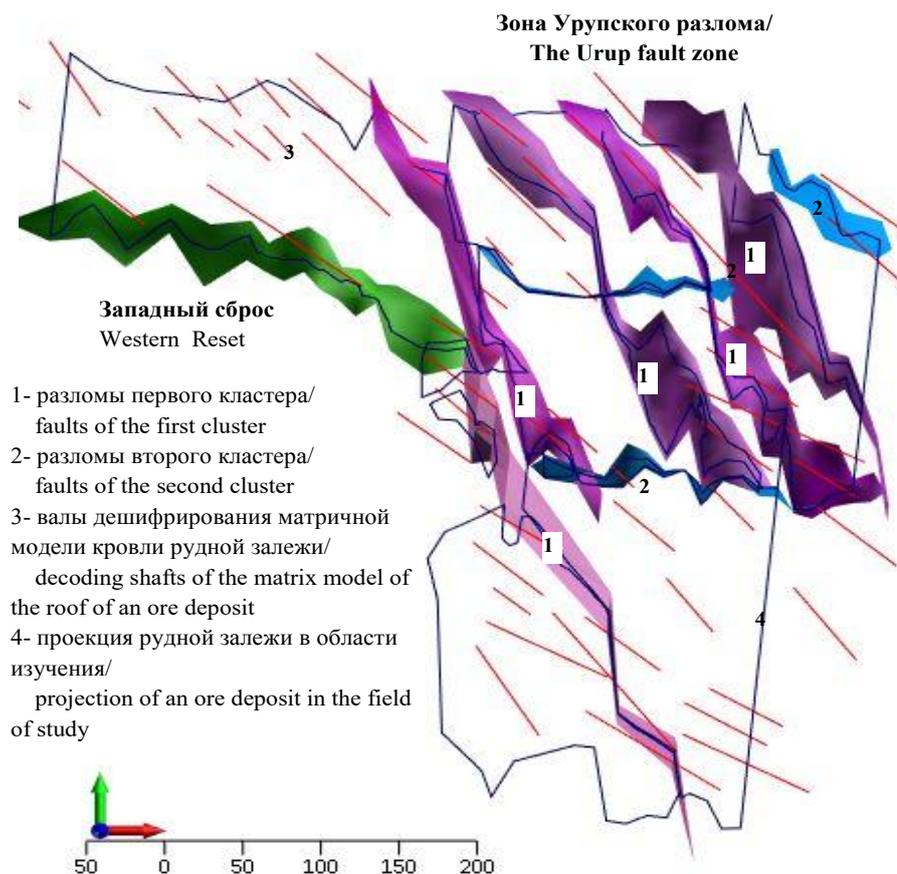


Рис. 4. Пространственные модели разрывных нарушений на глубоких горизонтах западного фланга Урупского месторождения /

Fig. 4. Spatial models of discontinuous faults in the deep horizons of the western flank of the Urupskoye field

Каждая часть Главной залежи, заключенная между разломами, представляет собой деформируемое тело, находящееся в сплошной бесконечной среде [Эз, 1985]. В сплошной среде относительное перемещение всякого малого объема является результатом деформации включающего его большего объема. Исходя из этого, логично предположить, что поднятия южного крыла трещин второго кластера компенсируют смещение тектонических блоков на юго-запад по трещинам первого кластера.

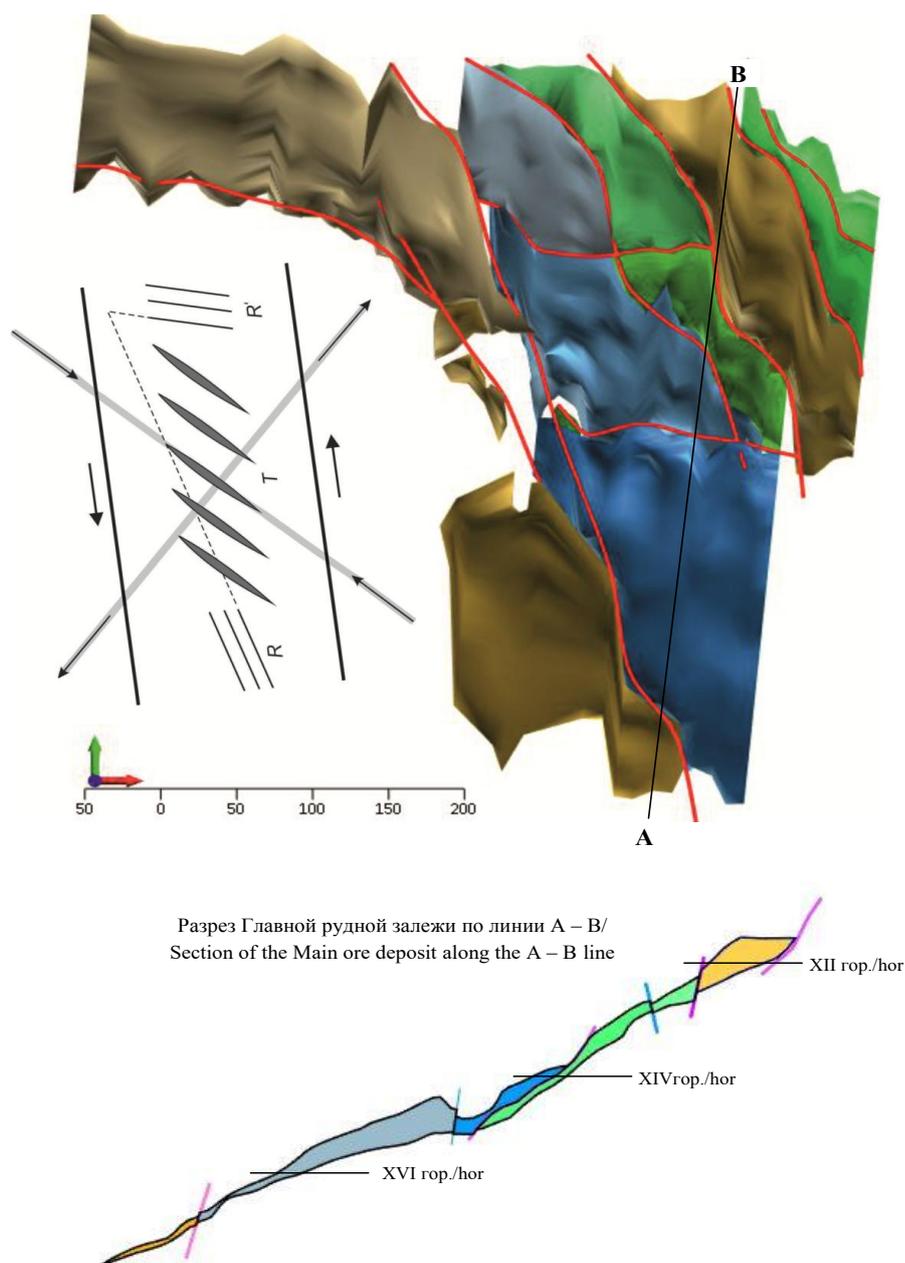
В целом Урупский разлом можно рассматривать как систему левого сдвига, что подчеркивается правокулисным расположением периодической серии разрывов, соответствующих сколам Риделя. При этом трещины второго кластера соответствуют сопряженным сколам с противоположным смещением, а деформации кровли залежи – структурам растяжения.

### Результаты работы и их обсуждение

Рудная залежь разбита на многочисленные тектонические блоки разных размеров разрывными нарушениями сбросового и надвигового типа (рис. 5).

Поверхности каркасов первого кластера ориентированы по азимуту 330 градусов и падают на юго-запад под углом 55-70°. В связи с направлением разведочных линий на месторождении под острым углом к простиранию разломов, на разрезах они выглядят как более пологие структуры. Характерно, что центральные части по-

верхностей разломов имеют более крутое падение, чем краевые. Вследствие этого трещины приобретают S-образную форму, что весьма характерно для трещин растяжения [Shainin, 1950]. Размеры разломов по простиранию достигают 370 метров, по падению – не превышают 80 метров. Все пять разломов ориентированы одинаково, имеют кулисообразное расположение с шагом 40-60 метров. По отношению к генеральной линии Урупского разлома, выделенные нарушения ориентированы под углом 25-30°. Амплитуда смещения по разломам, измеренная по кровле рудной залежи составляет от 3 до 12 метров. По геологической документации разломы представляют собой плотно притертые зоны милонитизации, вырождающиеся в породах подошвы рудного тела в зоны рассланцевания.



*Рис. 5. Тектонические блоки Главной рудной залежи на глубоких горизонтах западного фланга Урупского месторождения /*  
*Fig. 5. Tectonic blocks of the Main ore deposit in the deep horizons of the western flank of the Urupskoye deposit*

Западный разлом ориентирован по азимуту 290° и падает на юг под углом 55-60°. Его простираие максимально близко к простираию структур растяжения, проявленных в кровле рудной залежи (см. рис. 2,3). На разрезах разлом проявлен в виде нескольких часто ветвящихся трещин. Южное крыло разлома опущено по отношению к северному. Суммарная амплитуда смещения составляет не менее 40-50 м. Морфологически разлом является типичным сбросом. Выявление внутренней структуры разлома осложнено тем, что он расположен в области естественного выклинивания Главной залежи.

### Выводы

В результате статистического пространственного анализа и объемного моделирования с использованием инструментария ГГИС «Micromine» проанализировано внутреннее строение зоны Урупского разлома на глубоких горизонтах месторождения. Установлено, что Урупский разлом представляет собой сложно построенное трехмерное тело, состоящее из периодических серий тектонических трещин разного порядка, кулисообразно расположенных как по отношению к генеральной линии простираия разлома, так и по отношению друг к другу. Объемное тело разлома состоит из сочетания сбросов и компенсирующих их надвигов. Геодинамически Урупский разлом представляет собой левый сдвиг с косым смещением по простираию и падению по отношению к плановой поверхности.

Наиболее крупными ветвями разлома Главная рудная залежь разбита на тектонические блоки. Блоки образуют мозаику притертых рудных тел, смещенных относительно друг друга в разных направлениях.

### Литература

1. Богуш И.А., Рябов Г.В., Бурцев А.А. Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 6–16. DOI:10.46698/VNC.2021.80.87.001.
2. Бобомуротов Б.Б. Пространственное распределение меди и цинка в Главной рудной залежи Урупского медноколчеданного месторождения, Северный Кавказ. // Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений. Научное издание. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, – 2022. 248 с.
3. Бобомуротов Б.Б., Январев Г.С. Структурно-фациальные особенности рудных тел на глубоких горизонтах западного фланга Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ). // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XIII. – М: ИИЕТ РАН, – 2023. С. 58–63.
4. Рябов Г.В. Зональность Урупского колчеданного месторождения. // Геология рудных месторождений. – 1983. – № 5. – С. 102–108.
5. Савченко Н.А., Скрипченко Н.С., Тамбиев А.С. Урупский рудный район. / В кн. Колчеданные месторождения Большого Кавказа. М.: Недра, – 1973. – С. 75–100.
6. Скрипченко Н.С. Вулканогенно-осадочное рудообразование (на примере колчеданных месторождений Северного Кавказа). М.: Недра, – 1966. 291 с.
7. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. М.: Недра, – 1972. 214 с.
8. Смирнов В.И. Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 2. – М.: Недра, – 1978. 399 с.
9. Твалчрелидзе А.Г., Ярошевич В.З., Нарозаули Н.Г. Генетическая модель Урупского медноколчеданного месторождения. // Геология рудных месторождений. – 1979. – № 6. – С. 44–58.

10. Уилсон Дж. Геологические структуры малых форм. Пер. с англ. М.: Недра, 1985. – 112 с.
11. Эз В.В. Складкообразование в земной коре. М.: Недра, – 1985. 240 с.
12. Январёв Г.С., Бобомуротов Б.Б. Объемная цифровая модель глубоких горизонтов Главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 113. № 1. – С. 125–135. DOI:10.46698/VNS.2023.90.90.009.
13. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. // *Natural Resources Research*. – 2022. – Vol. 31. – pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2.
14. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R.C., Deng H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. Issue 3. – pp. 1–21.
15. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. // *Economic Geology*. – 1973. – Vol. 68. – pp. 1223–1246.
16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. // *Geologische Rundschau*. – 1997. – Vol. 86. – pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145.
17. Shainin V.E. Conjugate sets of en echelon tension fractures in the Athens Limestone at Riverton. Virginia. // *Bulletin of the Geological Society of America*. – 1950. – Vol. 61. – pp. 509–517.
18. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin. // *Geology and metallogeny of copper deposits*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 1986. – pp. 350–357.

## References

1. Bogush I.A., Ryabov G.V., Burtsev A.A. Pyritic deposits of North Caucasus. Prospects of minerality of Hudes deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 6–16. DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001. (in Russ.)
2. Bobomurotov B.B. Spatial distribution of copper and zinc in the main ore deposit of the Urup copper-crusted deposit, North Caucasus. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2022. From material composition to models and forecasting of deposits*. Scientific publication. Miass. YUUFNC MiGUro RAS. 2022. 248 p. (in Russ.)
3. Bobomurotov B.B., Janvarev G.S. Structural and facies features of ore bodies in the deep horizons of the western flank of the Urup copper-pyrite deposit (Severny Kavaz). *Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus*. Vol. XIII. Moscow. IJET RAS. 2023. pp. 58–63. (in Russ.)
4. Ryabov G.V. Zonality of the Urup pyrite deposit. *Geology of ore deposits*. 1983. No. 5. pp. 102–108. (in Russ.)
5. Savchenko N.A., Skripchenko N.S., Tambiev A.S. Urup ore district. In the book. *Pyrite deposits of the Greater Caucasus*. Moscow. Nedra. 1973. pp. 75–100. (in Russ.)
6. Skripchenko N.S. Volcanogenic-sedimentary ore formation (on the example of pyrite deposits of the North Caucasus). Moscow. Nedra. 1966. 291 p. (in Russ.)
7. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow. Nedra. 1972. 214 p.
8. Smirnov V.I. Ore deposits of the USSR. In 3 vols. 2nd Ed., reprint. and rev. Vol. 2. Moscow. Nedra. 1978. 399 p. (in Russ.)
9. Tvalchrelidze A.G., Yaroshevich V.Z., Narozauli N.G. Genetic model of the Urup copper-crusted deposit. *Geology of ore deposits*. 1979. No. 6. pp. 44–58. (in Russ.)
10. Wilson J. Geological structures of small forms. Translated from English. Moscow. Nedra. 1985. 112 p. (in Russ.)
11. Ez V.V. Folding in the Earth's crust. Moscow. Nedra. 1985. 240 p. (in Russ.)

12. Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urup copper-crusted deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 125–135. DOI: 10.46698/VNS.2023.90.90.009. (in Russ.)
13. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. *Natural Resources Research*. 2022. Vol. 31. pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2.
14. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R.C., Deng H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. *Minerals*. 2020. Vol. 10. Issue 3. pp. 1–21.
15. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Economic Geology*. 1973. Vol. 68. pp. 1223–1246.
16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geologische Rundschau*. 1997. Vol. 86. pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145.
17. Shainin V.E. Conjugate sets of en echelon tension fractures in the Athens Limestone at Riverton, Virginia. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1950. Vol. 61. pp. 509–517.
18. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin. *Geology and metallogeny of copper deposits*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1986. pp. 350–357.

УДК 622.279.4:622.276.6

DOI: 10.46698/VNC.2024.22.22.012

Оригинальная статья

## Анализ эффективности эксплуатации газоконденсатных месторождений Северного Кавказа на завершающем этапе разработки

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

<sup>1</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, пр. Азадлыг, 20, AZ 1010, Азербайджан;

<sup>2</sup> Азербайджанский технический университет, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25, AZ 1073, Азербайджан, e-mail: e.gasumov@gmail.com;

<sup>3</sup> Северо-Кавказский Федеральный университет, Россия, 355000, г. Ставрополь, ул. Ленина, 419, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Статья поступила: 29.01.2024, доработана: 01.06.2024, принята к публикации: 03.06.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В статье рассмотрены вопросы минимизации отрицательного воздействия осложнений, связанных с изменением состояния продуктивной залежи в процессе эксплуатации газоконденсатных месторождений на завершающем этапе разработки, ведущих к снижению дебита и выходу скважин из действующего фонда. Изучены ситуации, когда в газоконденсатных месторождениях разработка осуществляется неравномерно по площади и/или по разрезу, что приводит к наличию невыработанных залежей, замедлению темпа разработки месторождения, снижению конечного коэффициента газоконденсатоотдачи и ухудшению экономических показателей. Обоснован выбор варианта регулирования эксплуатации продуктивных залежей по объектам, связанный с уточнением остаточных запасов газа и распределением их в пласте, предупреждающий снижение конечного коэффициента газоконденсатоотдачи и ухудшение экономических показателей. **Цель исследований.** Определить пути минимизации отрицательного воздействия осложнений, возникающих в процессе эксплуатации газоконденсатных месторождений на завершающем этапе разработки, ведущих к снижению дебита и выходу скважин из действующего фонда. **Объекты исследований.** Многопластовые продуктивные залежи газоконденсатного месторождения, находящегося на завершающем этапе разработки. **Методы исследований** основаны на анализе и обобщении промысловых данных по изучаемым проблемам, а также на результатах собственных аналитических и теоретических исследований с использованием математической статистики с помощью современных технических и программных средств. Использовалась фактическая зависимость снижения приведённого пластового давления от накопленного отбора газа, адаптированная по истории разработки месторождения, для составления расчётной модели прогнозирования технологических показателей разработки объекта. **Результаты исследований.** Предложены рекомендации для регулирования разработки по объектам, связанные с уточнением остаточных запасов газа и распределением их в залежах, минимизацией отрицательного воздействия возникающих осложнений в процессе эксплуатации газоконденсатных месторождений на завершающем этапе разработки, ведущих к снижению дебита и выходу скважин из действующего фонда.

**Ключевые слова:** месторождение, залежь, разрез, скважина, дебит, разработка месторождения, ГКМ.

**Для цитирования:** Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Анализ эффективности эксплуатации газоконденсатных месторождений Северного Кавказа на завершающем этапе разработки. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 154-165. DOI: 10.46698/VNC.2024.22.22.012

DOI: 10.46698/VNC.2024.22.22.012

Original paper

# Efficiency analysis of operation for gas condensate fields in the North Caucasus at the final stage of development

E.R. Gasumov<sup>1,2</sup>, R.A. Gasumov<sup>3</sup><sup>1</sup> Azerbaijan State University of Oil and Industry, 20 Azadlig Ave., Baku AZ 1010, Azerbaijan;<sup>2</sup> Azerbaijan Technical University, 25 G. Javid Ave., Baku AZ 1173, Azerbaijan,  
e-mail: e.gasumov@gmail.com;<sup>3</sup> North Caucasus Federal University, 419 Lenina Str., Stavropol 355000,  
Russian Federation, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Received: 29.01.2024, revised: 01.06.2024, accepted: 01.06.2024

**Abstract. Relevance.** The article considers the issues of minimizing the negative impact of complications associated with changes in the state of the productive deposit in the process of operation of gas condensate fields at the final stage of development, leading to a decrease in flow rate and withdrawal of wells from the active stock. The situations when in gas condensate fields the development is carried out unevenly by area and/or section, which leads to the presence of unexploited deposits, slowing down the rate of field development, reducing the final coefficient of gas-condensate yield and worsening economic indicators have been studied. The choice of a variant for exploitation regulation of productive deposits by objects, connected with specification of residual gas reserves and their distribution in the reservoir, preventing reduction of the final gas-condensate yield coefficient and deterioration of economic indicators, is substantiated. **Aim.** To determine ways to minimize the negative impact of emerging complications in the process of operation of gas condensate fields at the final stage of development, leading to a decrease in flow rate and withdrawal of wells from the active stock. **Objects of research.** Multilayer gas condensate fields at the final stage of development. **Methods** are based on the analysis and generalization of field data on the studied problems, as well as on the results of their own analytical and theoretical studies using mathematical statistics with the help of modern hardware and software. The actual dependence of the reduced reservoir pressure on the accumulated gas withdrawal, adapted from the field development history, was used to compile a calculation model for forecasting the technological indicators of the object development. **Results.** Recommendations for regulating the development of objects related to the specification of residual gas reserves and their distribution in the deposits, minimizing the negative impact of emerging complications in the process of operation of gas condensate fields at the final stage of development, leading to a decrease in flow rate and withdrawal of wells from the active stock were offered.

**Keywords:** field, reservoir, section, well, flow rate, field development, gas condensate field.

**For citation:** Gasumov E.R., Gasumov R.A. Efficiency analysis of operation for gas condensate fields in the North Caucasus at the final stage of development. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(2): 154-165. DOI: 10.46698/VNC.2024.22.22.012

## Введение

В процессе эксплуатации газоконденсатных месторождений (ГКМ) на завершающем этапе разработки возникает ряд осложнений, ведущих к снижению дебита и выходу скважин из действующего фонда. К таким осложнениям относятся [Гасумов, Гасумов, 2023; Gu, 2023; Yu et al., 2022]:

- неустойчивость продуктивных пластов к длительному воздействию повышенных депрессий;
- недостаточная для выноса капельной жидкости скорость газового потока, ведущая к накапливанию в призабойной зоне пласта (ПЗП) и стволе скважины жидкости (водоконденсатная смесь). Накопление жидкости приводит к ухудшению проницаемости ПЗП, кольтматации порового пространства и нарушению гидродинамической связи в системе “скважина-пласт”;
- наличие в составе добываемых углеводородов (УВ) коррозионно-агрессивных компонентов;
- снижение давления в устье работающей скважины вследствие истощения пластовой энергии.

Сложные условия эксплуатации скважин на месторождениях на завершающем этапе разработки, сложное геологическое строение залежи, её литологическая неоднородность приводят к тому, что наиболее активно дренировались северная и центральная части месторождения. Исследование данной проблемы проводилось на примере многопластового Некрасовского ГКМ, находящегося на завершающем этапе разработки, где подавляющее большинство эксплуатационных скважин вышло из эксплуатации в результате внедрения в залежи воды с южной части структуры. Оставшиеся скважины разрабатывают северную и центральную зоны месторождения. За весь период разработки на месторождении пробурено 47 скважин, из которых в эксплуатационном фонде находилось 40, из них используется пять скважин, остальные были переведены в бездействующий фонд, так как с 2015 года они не давали продукцию. Промышленная газоносность месторождения связана с готерив-барремскими (свита губс) и аптскими (самурская свита) отложениями нижнего мела [Березовский и др., 2020; Gasumov, Gasumov, 2020; Gasumov, Gasumov, 2023a].

В разрезе месторождения выделено четыре продуктивных пачки, имеющие собственные газо-водяные контакты (ГВК), что свидетельствует об отсутствии газогидродинамической связи между ними. Однако разработка всех четырёх пачек велась совместно, как единого эксплуатационного объекта, и учёт добычи УВ осуществлялся в целом по месторождению, систематические замеры пластового давления в каждой пачке отдельно отсутствуют. На начало 2015 года в разработке находились залежи I и II пачек, а уже через два года все скважины были остановлены, из-за отсутствия промышленного притока УВ. Проведённые расчёты показали, что основной отбор производился из залежи пластов I и II, которые составили около 94% от начального балансового запаса, отбор газа из залежи пласта III – 11 %, из залежи пласта IV – 24 % [Березовский и др., 2020б; Gasumov, Gasumov, 2023b; Helseth et al., 2004].

### Методы исследований

Для достижения поставленных целей в работе проведены обработка промысловых и экспертных материалов, результатов наблюдений, расчёты полученных теоретических зависимостей и их анализ с использованием методов математической статистики с помощью современных технических и программных средств. Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и экспериментальных исследований. Используются показатели, полученные в результате вычислительного эксперимента, рассчитываемые для различных численных значений определяющих факторов.

## Результаты работы и их обсуждение

В результате проведенных исследований методами радиометрии (нейтронный каротаж, нейтронный гамма-каротаж, импульсный нейтрон-нейтронный каротаж) определены основные характеристики продуктивной залежи (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

### Результаты исследования методами радиометрии (НГК, ГК, 2ННК, ИННК) / Results of the study by radiometry methods (neutron logging, neutron gamma logging, pulsed neutron-neutron logging)

Показатели / Indicators	Значения / Values
Продуктивные интервалы (с низкими коллекторскими свойствами), м / Productive intervals (with low reservoir properties), m	3360,8–3365,0 3370,6–3374,7
Интервалы (неясный характер насыщения), м / Intervals (unclear nature of saturation), m	3375,1–3380
Скважины работают в режиме поддержания заданного устьевого давления / Wells operate in the mode of maintaining the target wellhead pressure	Исходя из требований минимального давления в магистральном газопроводе / Based on the requirements of the minimum pressure in the main gas pipeline
Пластовое давление / Reservoir pressure	Снизилось на 87,2 % от начального / Decreased by 87.2% from the initial
Требуемое давление в устье / Required wellhead pressure	На 21 % выше, чем проектное, что ведёт к снижению дебита газа / 21% higher than the design, which leads to a decrease in gas production
Суточный средний дебит газа / Daily mean gas flow rate	Ниже проектной величины на 42 %, в связи со скоплением на забое и выносом воды, периодической остановкой скважин и требованием поддержания более высокого давления в устье скважин / Below the design value by 42%, due to the accumulation at the bottomhole and the removal of water, periodic shutdown of wells and the requirement to maintain a higher pressure at the wellhead
Суточный средний дебит конденсата / Daily average condensate flow rate	Выше проектной величины, что связано с более высоким текущим конденсатосодержанием, чем определено проектом / Above the design value, which is associated with a higher current condensate content than determined by the project

Важной особенностью эксплуатации скважин данного месторождения, ухудшающей экономические показатели его разработки, явились низкие устьевые давления (вследствие истощения пластовой энергии основных разрабатываемых залежей II и I пластов), не позволяющие обеспечить оптимальные условия добычи, сепарации и транспорта газа. Это привело к осложнениям эксплуатации скважин, потерям конденсата и преждевременному завершению эксплуатации скважин [Березовский и др., 2020б; Гасумов, Гасумов, 2023; Dzhahalov et al., 2022; Кануков, 2017; Kuang et al., 2023].

В региональном тектоническом плане Некрасовское месторождение приурочено к южной части Каневско-Березанского вала и представляет собой двухку-

польную антиклиналь субмеридионального простирания. Литология коллекторов представлена песчаниками и алевролитами с прослоями глин. Залежи I, II, III, IV пачек нижнемеловых отложений разрабатывались в условиях близких к газовому режиму. Коллекторы I пачки на площади развиты не повсеместно. В пределах месторождения определены три самостоятельных продуктивных залежи: Южная, Центральная, Северная [Алиев, Бондаренко, 2003; Березовский и др., 2020б; Gasumov, Gasumov, 2023b; Поляков, Волков, 2018] (рис. 1).

**Коллекторы I продуктивной пачки: Южная часть залежи****Reservoirs of the I productive unit: Southern part of the deposit**

Пластовая, сводовая с литологическим экранированием с севера. ГВК принят на отметке минус 3293 м. Размеры залежи: длина 2,75 км, ширина 3,75 км, высота 41 м

Reservoir, domed with lithological screening from the north. GWC was taken at the level of minus 3293 m. Deposit dimensions: length 2.75 km, width 3.75 km, height 41 m

**Коллекторы I продуктивной пачки: Центральная часть залежи****Reservoirs of the I productive pack: Central part of the deposit**

Связана с небольшой линзой коллекторов, ГВК отсутствует. Залежь – пластовая, со всех сторон контролируется линией выклинивания. Размеры залежи: длина 0,75 км, ширина 0,74 км, высота около 2 м

Associated with a small collector lens, no HWC. The deposit is reservoir, from all sides it is controlled by the wedging line. Deposit dimensions: length 0.75 km, width 0.74 km, height about 2 m

**Коллекторы I продуктивной пачки: Северная часть залежи****Reservoirs of the I productive unit: Northern part of the deposit**

Пластовая, сводовая с литологическим экранированием с севера, запада и юга. ГВК принят по аналогии с Южной залежью на отметке минус 3293 м. Размеры залежи: длина 2,2 км, ширина 3,0 км, высота 44 м

Reservoir, domed with lithological screening from the north, west and south. The GWC was adopted by analogy with the South deposit at a mark of minus 3293 m. The dimensions of the deposit: length 2.2 km, width 3.0 km, height 44 m

**Коллекторы II продуктивной пачки****Collectors II productive pack**

Прослеживаются во всех скважинах. ГВК принят на абсолютной отметке минус 3318 м. Размеры залежи: длина 10,5 км, ширина 6,4 км, высота 64 м. залежь - пластовая, сводовая

traced in all wells. GWC was taken at an absolute mark of minus 3318 m. The dimensions of the deposit: length 10.5 km, width 6.4 km, height 64 m

**Коллекторы III продуктивной пачки****Collectors III productive pack**

Развиты в пределах площади не повсеместно. ГВК принят на абсолютной отметке минус 3325 м. Размеры залежи: длина 6,5 км, ширина 2,5 км, высота 25 м. залежь характеризуется как пластовая, сводовая, с частичным литологическим ограничением на северо-востоке

Developed within the area is not everywhere. The GWC was taken at an absolute mark of minus 3325 m. The dimensions of the deposit: length 6.5 km, width 2.5 km, height 25 m.

**Коллекторы IV продуктивной пачки****Collectors IV productive pack**

ГВК принят на абсолютной отметке минус 3340 м. Размеры залежи: длина 5,25 км, ширина 2,0 км, высота 21,6 м. Залежь характеризуется как массивная, сводовая

The GWC was taken at an absolute mark of minus 3340 m. The dimensions of the deposit are: length 5.25 km, width 2.0 km, height 21.6 m. The deposit is characterized as massive, domed

*Источник: Данные АО «СевКавНИПИгаз» / Source: SevKavNIPIGaz data*

*Рис. 1. Определение самостоятельных продуктивных залежей /*

*Fig.1. Determination of independent productive deposits*

Газ месторождения состоит, в основном, из метана, содержание которого изменяется от 84 до 86 %, относительная плотность составляет – 0,678, а начальное потенциальное содержание C5+ во всех пластах – 35,5 г/м<sup>3</sup>. Удельный вес конденсата составляет 770–828 кг/м<sup>3</sup>, по физико-химическим свойствам и составу он для всех пачек одинаковый [Березовский и др., 2020а; Голик и др., 2020; Gasumov, Gasumov, 2020].

Промышленная газоносность Некрасовского месторождения связана с готерив-барремскими (свита губс) и аптскими (самурская свита) отложениями нижнего мела. Месторождение является многопластовым. ГВК приняты на абсолютных отметках:

- I пачка – 3293 м;
- II пачка – 3318 м;
- III пачка – 3325 м;
- IV пачка – 3340 м;
- V пачка – 3358 м.

На основании корреляции геофизических разрезов в продуктивной части нижне-меловых отложений выделено пять песчано-алевритовых пачек, имеющих разные газо-водяные контакты (ГВК) (приняты на абсолютных отметках), но практически одинаковую пластовую температуру – 144<sup>0</sup> С и начальное пластовое давление – 34,9 МПа (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

## Состояние разработки залежи / Reservoir development status

Пачки залежи/ Pack deposits	Глубина, м / Depth, m	Состояние разработки залежи / Reservoir development status
- I пачка - Pack I	3293	Пачки I, II, III, IV залежи нижнемеловых отложений разрабатывались как единый эксплуатационный объект, учёт добычи углеводородов производился в целом по месторождению / Deposits I, II, III, IV of the Lower Cretaceous deposits were developed as a single production facility, hydrocarbon production was recorded for the whole field
- II пачка - Pack II	3318	
- III пачка - Pack III	3325	
- IV пачка - Pack IV	3340	
- V пачка - Pack V	3358	V пачка из подсчёта запасов исключена и не рассматривалась в проектом документе / Pack V is excluded from the reserve calculation and was not considered in the project document

В связи с не выделением для реализации самостоятельных объектов эксплуатации были проведены сопоставления проектных и фактических показателей разработки ГКМ (табл. 3), с использованием промысловых и геофизических данных, а также результатов авторского надзора [Gasumov, Gasumov, 2023а; Березовский и др., 2020б; Магерратова, 2021; Хорольский и др., 2009].

Зависимость снижения приведённого пластового давления от накопленного отбора газа получена за период, прошедший после принятия проекта разработки ГКМ, и отражена на графике (рис. 2). Расчёты показали, что годами происходит уменьшение области дренирования запасов пластового газа [Алиев, Бондаренко, 2003; Гасумов, Гасумов, 2023; Lea, 2008; Назаров, Шевцов, 2021].

Таблица 3 / Table 3

**Результаты анализа сравнения фактических данных с проектными показателями /  
Results of the analysis of the comparison of actual data with design indicators**

Показатели / Indicators	Значения / Values
Темп отбора и фактический годовой отбор газа ниже проектной величины / The rate of production and the actual annual gas production are below the design value	на 17 % / by 17%
Отклонение суммарного накопленного отбора газа / Deviation of the total accumulated gas extraction	0,01 % / by 0,01 %
Добыча конденсата обусловлена темпом отбора газа и условиями сепарации, годовая фактическая добыча конденсата ниже проектной величины / Condensate production is determined by the rate of gas withdrawal and separation conditions; the actual annual condensate production is below the design value.	на 12 % / by 12%
Фонд добывающих и проектных скважин / Fund of production and project wells	соответствует / corresponds
Давление в устье добывающих скважин обусловлено давлением на приёме в МГП и превышает расчётную величину / The pressure at the mouth of production wells is due to the pressure at the intake in the MGP and exceeds the calculated value	на 21 % / by 21%
Средний годовой дебит добывающих скважин ниже проектной величины / The average annual flow rate of production wells is below the design value	на 20 % / by 20%
Расчётные пластовое (а также, давление в зоне отбора газа) и проектные давления / Calculated reservoir (including the pressure in the gas extraction zone) and design pressures	соответствует / corresponds

Для составления расчётной модели прогнозирования технологических показателей ГКМ использовалась фактическая зависимость снижения приведённого пластового давления от накопленного отбора газа [Алиев, Бондаренко, 2003; Gasumov, Gasumov, 2023b; Дейк, 2012] (рис. 2).

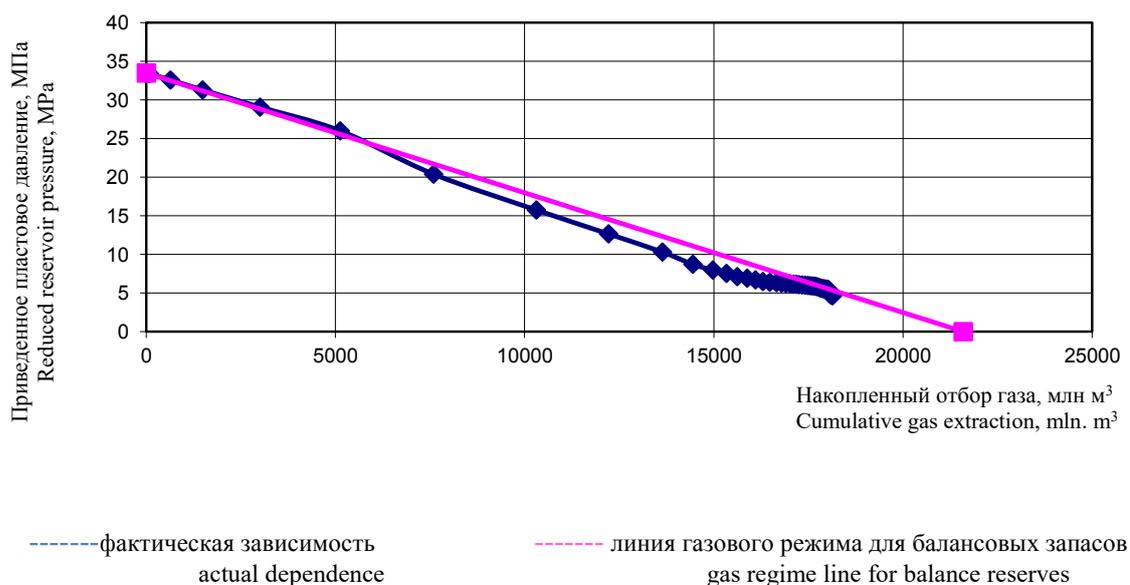


Рис. 2. График зависимости приведённого пластового давления от накопленного отбора газа /  
Fig. 2. Graph of the dependency of the reduced reservoir pressure on the accumulated gas production

В процессе эксплуатации месторождений, находящихся на завершающей стадии разработки, одним из основных возникающих осложнений, ведущих к снижению дебита и выходу скважин из эксплуатационного фонда, является неустойчивость продуктивных пластов к длительному воздействию повышенных депрессий [Гасумов, Гасумов, 2023; Gasumov, Gasumov, 2023a; Magerramova, 2021; Yu et al., 2022]. А также, проведённый анализ промысловых данных показывает, что завершающая стадия разработки месторождений Северного Кавказа, где отмечается внедрение в залежи воды с южной части структуры (разрабатывают скважины расположенные в северной и центральной зоне ГКМ) характеризуется:

- низким пластовым давлением (в пределах 4–6 МПа) при большой глубине залегания продуктивных пластов (3302–3357 м);
- высоким содержанием жидкости в продукции скважин;
- низкими дебитами (не обеспечивающими вынос жидкости на поверхность);
- ухудшившейся проницаемостью призабойной зоны пласта после длительной эксплуатации скважин.

Целесообразно разработку месторождения осуществить с доизучением текущего состояния продуктивных интервалов IV и III пластов (выполнить существующим фондом скважин). Для этого необходимо параллельно осуществить возврат в одной скважине на IV пласт, в другой скважине на III пласт. Это позволит, учитывая результаты исследования залежей IV и III пластов, получить максимальную информацию о состоянии залежей IV, III и II пластов в южной части месторождения. Состояние контроля и регулирования разработки ГКМ в этом случае сводится к своевременному обнаружению факторов, осложняющих эффективную эксплуатацию скважин, снижающих их дебиты, и, соответственно, отборы газа в целом по месторождению.

Сложные условия эксплуатации скважин, сложное геологическое строение залежи, ее литологическая неоднородность привели к тому, что наиболее активно дренировались северная и центральная части месторождения.

Неравномерная разработка месторождения по площади и по разрезу привела к существованию невыработанных залежей, замедлению темпа разработки месторождения, снижению конечного коэффициента газоотдачи и ухудшению экономических показателей [Березовский и др., 2020a; Melikov et al., 2022; Попков, Попков, 2023; Tureyen et al., 2005].

Проведённые временные замеры нейтронными методами по всему фонду скважин в период капитального ремонта скважин позволили осуществить дальнейший контроль за степенью выработанности пласта, определить текущее положение ГВК и характер насыщения пластов-коллекторов за эксплуатационной колонной.

В связи с тем, что разработка месторождения ведётся в условиях естественного режима истощения пластовой энергии, для обеспечения требуемых технических параметров подачи газа в магистральный газопровод рационально установление на устьях скважин, добывающих газ из I и II пластов модульных устьевых компрессоров.

Проведённый анализ эффективности эксплуатации газоконденсатных месторождений Северного Кавказа на завершающем этапе разработки, на примере Некрасовского ГКМ показал, что одними из основных причин несоответствия проектных и фактических технико-экономических показателей также являются:

- рост налога на добычу полезных ископаемых (ставка НДС на газ изменилась,

стала учитывать многокомпонентный состав горючего природного газа, макроэкономические показатели, ценовую конъюнктуру на целевых рынках сбыта);

- повышение среднемесячной заработной платы производственного персонала и взносы в государственные внебюджетные фонды (немаловажным фактором является численность производственного персонала по месторождению);

- изменение уровня цен на сырье, материалы, товары и услуги, потребляемые в процессе производственной деятельности (изменение удельных затрат);

- несоблюдение графика проведения капитального ремонта скважин (в проекте капитальный ремонт не предусмотрен, а фактически проводился);

- затраты на геологоразведочные работы (в проекте не предусмотрены, а фактически они выполнены);

- рост прочих затрат (на страхование, прочие услуги производственного назначения и общехозяйственные расходы).

Все вышеперечисленные факторы привели к значительному увеличению годовых эксплуатационных затрат и, как следствие, к росту себестоимости добычи газа. А также необходимо отметить, что по проекту все удельные исходные данные приняты в целом для газового промысла, в состав которого входили 5 месторождений, а фактически 4 из них не разрабатываются.

Результаты анализа показывают, что на долю Некрасовского месторождения по газовому промыслу приходится:

- объем валовой добычи газа – 14%;
- добычных скважин – 28,6%; (в т. ч. в эксплуатации – 13,0%);
- среднесписочной численности – 37% (в т. ч. производственного персонала - 39%);
- производственных затрат – 33,0%.

Удельные материальные затраты на добычу газа по месторождению на 332% превышают затраты по промыслу, среднемесячная заработная плата – на 7,7%, прочие затраты – на 264%. Проведённый анализ показывает, что значительная доля затрат списывается не по местам их возникновения, а на одно месторождение, что приводит к росту себестоимости добычи углеводородов. Давать предложения по основным технико-экономическим показателям разработки месторождения на ближайшую перспективу по фактическим затратам является некорректным, т. к. затраты по месторождению значительно превышают затраты по газовому промыслу, что свидетельствует о неправомерном разнесении затрат по местам их возникновения.

Предложено для дополнительного изучения текущего состояния залежи осуществить разработку на IV и III пластах по одной скважине.

## Выводы

1. Уточнение остаточных запасов газа и распределение их в залежах III и IV пластов нижнемеловых отложений позволит регулировать разработки месторождения по объектам.

2. Для минимизации отрицательного воздействия осложнений необходим постоянный контроль за разработкой месторождения, в том числе: энергетическими параметрами и режимом работы залежи, с проведением анализа динамики среднего пластового давления, количества содержащейся в газе воды и её минерализации; технологическим режимом и текущей продуктивностью скважин, с выполнением контрольных замеров дебитов скважин.

3. Основными причинами возникновения осложнений при эксплуатации газоконденсатных месторождений на завершающем этапе разработки, ведущими к снижению дебита и выходу скважин из действующего фонда, являются:

- неустойчивость продуктивных пластов к длительному воздействию повышенной депрессии;

- недостаточная для выноса капельной жидкости скорость газового потока, ведущая к накоплению в призабойной зоне пласта и стволе скважины жидкости;

- неравномерная разработка ГКМ по площади и по разрезу приводит к существованию невыработанных залежей, замедлению темпа разработки месторождения, снижению конечного коэффициента газоотдачи и ухудшению экономических показателей;

- низкие устьевые давления, не позволяющие обеспечить оптимальные условия добычи, сепарации и транспортировки газа.

### Литература

1. Алиев З.С., Бондаренко В.В. Руководство по проектированию разработки газовых и газоконденсатных месторождений. М.: Недра, – 2003. 230 с.

2. Березовский Д.А., Очерedyкo Т.Б., Липулени О.Д. Геологические основы для проектирования доразведки Некрасовского газоконденсатного месторождения. // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020а. – № 1. – С. 74–93.

3. Березовский Д.А., Очерedyкo Т.Б., Липулени О.Д. Перспективы доразработки Некрасовского газоконденсатного месторождения. // Булатовские чтения. – 2020б. – № 2. – С. 82–94.

4. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт, формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 108–123. DOI: 10.46698/VNC.202326.

5. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В., Дмитрак Ю.В. Управление геомеханикой массива путем оптимизации технологии разработки. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 1. – С.127–137. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59070.

6. Дейк Л.П. Основы разработки нефтяных и газовых месторождений: пер. с англ.: Фалалеев Б.Л.; под ред. Симкина Э.М. М: Премиум Инжиниринг, – 2012. 549 с.

7. Кануков А.С. Интеграция базы данных геологической информации в систему геоинформационного моделирования. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 3. – С. 57–66. DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9505.

8. Назаров У.С., Шевцов В.М. Перспективы разработки длительно эксплуатируемых газоконденсатных месторождений. // Узбекский журнал нефти и газа. – 2021. – Вып. 2. – С. 59–67.

9. Поляков А.В., Волков А.Н. Совершенствование системы контроля газоконденсатной характеристики пласта на поздней стадии разработки нефтегазоконденсатных месторождений. // Вести газовой науки. – 2018. – Т. 33. № 1. – С. 248–253.

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

11. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Техничко-экономические расчёты распределительных электрических сетей. Ростов-на-Дону: Терра Принт, – 2009. 132 с.

12. Dzhahalov G.I., Moldabaeva G.Zh., Kunaeva G.E. Parametric identification of reservoir hydrodynamic model for actual development indicators. // Socar Proceedings. – 2022. – No. 4. – pp. 45–54.

13. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Lithological and paleogeographic conditions for the formation of oil fields with complex clay reservoirs by example of khadum-batalpashinsk deposits. // Oil industry. – 2020. – No. 5. – pp. 26–30.

14. Gasumov E.R., Gasumov R.A. Technical and technological solutions for limiting water inflow in gas wells with a horizontal bore end. // *SOCAR Proceedings*. – 2023a. – No. 3. – pp. 75–82. DOI: 10.5510/OGP20230300889.
15. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Mathematical model for injecting viscoelastic compositions into the productive formation. // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2023b. – Vol. 334. Issue 3. – pp. 218–228.
16. Gu Y.Q. Sedimentary Reservoir Characteristics and Reservoir Classification Evaluation of Benxi Formation in Well Da-Ning Area, Ordos Basin. // *Open Access Library Journal* – 2023. – Vol. 10 No. 2. – DOI: 10.4236/oalib.1109634.
17. Helseth H.M., Matthews J.C., Avset P., Wijngaarden A.-J. Combined diagenetic and rock physics modeling for better control of seismic depth trends. // Publisher: European Association of Geologists and Engineers Source: 66th EAGE Conference & Exhibition, June 2004, cp-3-00318. DOI: 10.3997/2214-4609-pdb.3.F041.
18. Kuang H., Liu H., Tan X., Yu J., Song H., Zhou R., Wang J., Liu F. Study on factors affecting the petro physical properties of sandstone and conglomerate reservoirs of Baikouquan Formation, Junggar Basin. // *Frontiers in Earth Science*. – 2023. – Vol. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.1033344.
19. Lea J.F., Nickens H.V., Well, M.R. *Gas Well Deliquification*. – 2nd edition. – 2008. – 588 p.
20. Magerramova S.D. Improving the efficiency of the condensate recovery process in gas condensate fields under various development modes. // *Socar Proceedings*. – 2021. – No. 3. – pp. 63–67.
21. Melikov G.Kh., Ismailov Sh.Z., Suleymanov A.A., Mammedli N.F. Diagnosing the multiphase flow regime and watering intervals in a multilayer reservoir based on the analysis of DTS measurements. // *Socar Proceedings*. – 2022. – No. 1. – pp. 47–55.
22. Tureyen O.I., Karacali O., Caers J. A parallel, multiscale approach to reservoir modeling. // *Computational Geosciences*. – 2005. – Vol. 9. – pp. 75–98.
23. Yu J., Luo G., Li B. Diagenesis and Diagenetic Facies of the Upper Wurche Formation in the shavan deflection. // *Earth Science*. – 2022. – No. 36. Issue 4. – pp. 1095–1104. DOI: 10.19657/j.

## References

1. Aliev Z.S., Bondarenko V.V. Guidelines for the design of the development of gas and gas condensate fields. Moscow. Nedra. 2003, 230 p. (In Russ.)
2. Berezovsky D.A., Ocheredko T.B., Lipuleni O.D. Geological bases for designing additional exploration of the Nekrasovsk gas condensate field. *Nauka. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2020. No. 1. pp. 74–93. (In Russ.)
3. Berezovsky D.A., Ocheredko T.B., Lipuleni O.D. Prospects for the additional development of the Nekrasovsk gas condensate field. *Bulatovskie Readings*. 2020. No. 2. pp. 82–94. (In Russ.)
4. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Assessment of the hydrodynamic perfection of the well-reservoir system formed at the stage of opening the productive formation. *Geology and geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 108–123. DOI: 10.46698/VNC.202326. (In Russ.)
5. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Dmitrak Yu.V. Management of massif geomechanics through optimization of development technologies. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 127–137. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59070. (In Russ.)
6. Dake L.P. *Fundamentals of oil and gas field development: translated from English by B.L. Falaleev*. Ed. by E.M. Simkin. Moscow. Premium Engineering. 2012. 549 p. (In Russ.)
7. Kanukov A.S. Integration of the geological information database in the system of geoinformation modeling. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 3. pp. 57–66. DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9505. (In Russ.)
8. Nazarov U.S., Shevtsov V.M. Prospects for the development of long-term exploited gas condensate fields. *Uzbek Journal of Oil and Gas*. 2021. Issue 2. pp. 59–67. (In Russ.)

9. Polyakov A.V., Volkov A.N. Improving the system for monitoring the gas condensate characteristics of the reservoir at a late stage of development of oil and gas condensate fields. *News of gas science*. 2018. Vol. 33. No. 1. pp. 248–253. (In Russ.)
10. 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.)
11. Khorolsky V.Ya., Taranov M.A., Petrov D.V. Technical and economic calculations of distribution electrical networks. Rostov-on-Don. Terra Print. 2009 132 p. (In Russ.)
12. Dzhahalov G.I., Moldabaeva G.Zh., Kunaeva G.E. Parametric identification of reservoir hydrodynamic model for actual development indicators. *Socar Proceedings*. 2022. No. 4. pp. 45–54.
13. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Lithological and paleogeographic conditions for the formation of oil fields with complex clay reservoirs by example of khadum-batalpashinsk deposits. *Oil industry*. 2020. No. 5. pp. 26–30.
14. Gasumov E.R., Gasumov R.A. Technical and technological solutions for limiting water inflow in gas wells with a horizontal bore end. *SOCAR Proceedings*. 2023. No. 3. pp. 75–82. DOI: 10.5510/OGP20230300889.
15. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Mathematical model for injecting viscoelastic compositions into the productive formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023. Vol. 334. Issue 3. pp. 218–228.
16. Gu Y.Q. Sedimentary Reservoir Characteristics and Reservoir Classification Evaluation of Benxi Formation in Well Da-Ning Area, Ordos Basin. *Open Access Library Journal* 2023. Vol. 10 No. 2. DOI: 10.4236/oalib.1109634.
17. Helseth H.M., Matthews J.C., Avset P., Wijngaarden A.-J. Combined diagenetic and rock physics modeling for better control of seismic depth trends. /Publisher: European Association of Geologists and Engineers Source: 66th EAGE Conference & Exhibition, June 2004, cp-3-00318. DOI: 10.3997/2214-4609-pdb.3.F041.
18. Kuang H., Liu H., Tan X., Yu J., Song H., Zhou R., Wang J., Liu F. Study on factors affecting the petro physical properties of sandstone and conglomerate reservoirs of Baikouquan Formation, Junggar Basin *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.1033344.
19. Lea J.F., Nickens H.V., Well, M.R. *Gas Well Deliquification*. 2nd edition. 2008. 588 p.
20. Magerramova S.D. Improving the efficiency of the condensate recovery process in gas condensate fields under various development modes. *Socar Proceedings*. 2021. No. 3. pp. 63–67.
21. Melikov G.Kh., Ismailov Sh.Z., Suleymanov A.A., Mammedli N.F. Diagnosing the multiphase flow regime and watering intervals in a multilayer reservoir based on the analysis of DTS measurements. *Socar Proceedings*. 2022. No. 1. pp. 47–55.
22. Tureyen O.I., Karacali O., Caers J. A parallel, multiscale approach to reservoir modeling. *Computational Geosciences*. 2005. Vol. 9. pp. 75–98.
23. Yu J., Luo G., Li B. Diagenesis and Diagenetic Facies of the Upper Wurche Formation in the shavan deflection. *Earth Science*. 2022. No. 36. Issue 4. pp. 1095–1104. DOI: 10.19657/j.

УДК: 552.578 (574.14)

DOI: 10.46698/VNC.2024.17.41.013

Оригинальная статья

## Нефтегазоносные формационные комплексы триаса юго-запада Туранской плиты

В.И. Попков , И.В. Попков 

Кубанский государственный университет,  
Россия, 350049, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149,  
e-mail: geoskubsu@mail.ru

Статья поступила: 09.03.2024, доработана: 01.06.2024, принята к публикации: 03.06.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Триасовые отложения юго-западной части Туранской плиты остаются одним из важных направлений геологоразведочных работ на нефть и газ. Несмотря на достаточно высокую геолого-геофизическую изученность отложений и открытие в них промышленных скоплений углеводородов остается достаточно много спорных вопросов, касающихся стратиграфической приуроченности и межплощадной корреляции нефтегазоносных горизонтов. Решение этой проблемы имеет не только научное, но и практическое значение, поскольку будет способствовать более обоснованному выбору дальнейших направлений поисковых работ. **Цель исследований.** Целью данной работы является изучение закономерностей локализации скоплений нефти и газа в триасовом разрезе Южно-Мангышлакского осадочного бассейна, выделение региональных толщ-коллекторов и возможных покрышек углеводородов, определение границ площадного распространения основных нефтегазоносных комплексов. **Методы исследования.** Проведено макроописание кернов скважин, микроскопическое изучение шлифов. Выполнено литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция разрезов скважин с использованием данных всех видов каротажа, палеонтологических определений органических остатков. Проанализирован обширный материал по результатам опробования и пластовых испытаний триасовых отложений. Для изучения емкостно-фильтрационных свойств пород привлечены данные петрофизики. Детально исследованы особенности строения месторождений нефти и газа. **Результаты работы.** Установлено наличие в триасовом разрезе Южно-Мангышлакского прогиба двух нефтегазоносных формаций – верхнетриасовой терригенной и вулканогенно-карбонатной верхнеоленинско-среднетриасовой. Разделены они вулканогенно-аргиллитовой толщей среднего триаса, являющейся региональной покрышкой. Выяснена роль отдельных литологических толщ в локализации скоплений углеводородов. Определены границы площадного распространения нефтегазоносных комплексов триаса, что позволяет подойти более дифференцированно к оценке перспектив нефтегазоносности как территории Южного Мангышлака в целом, так и отдельных локальных поднятий, расположенных в различных тектонических зонах. Полученные результаты могут быть использованы при изучении условий формирования и закономерностей пространственного размещения скоплений углеводородов и в других нефтегазоносных регионах Скифско-Туранской платформы.

**Ключевые слова:** литология, стратиграфия, формации, нефть и газ, пористость, проницаемость, перспективы нефтегазоносности.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-27-00037.

**Для цитирования:** Попков В.И., Попков И.В. Нефтегазоносные формационные комплексы триаса юго-запада Туранской плиты. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 166-178. DOI: 10.46698/VNC.2024.17.41.013

DOI: 10.46698/VNC.2024.17.41.013

Original paper

# Oil and gas bearing formation complexes of the Triassic of the South-West Turan plate

V.I. Popkov<sup>id</sup>, I.V. Popkov<sup>id</sup>Kuban State University, 149 Stavropol Str., Krasnodar 350059,  
Russian Federation, e-mail: geoskubsu@mail.ru

Received: 09.03.2024, revised: 01.06.2024, accepted: 03.06.2024

**Abstract: Relevance.** The Triassic deposits of the southwestern part of the Turan plate remain one of the areas of exploration for oil and gas. Despite the sufficiently high geological and geophysical study of sediments and the discovery of industrial accumulations of hydrocarbons in them, there are quite a lot of controversial issues concerning the stratigraphic confinement and inter-site correlation of oil and gas horizons. The solution to this problem has not only scientific, but also practical significance, since it will contribute to solving the issues of conditions for the formation of oil and gas fields in the region, as well as the choice of further directions of exploration. **Aim.** The purpose of this work is to study the patterns of localization of oil and gas accumulations in the Triassic section of the South Mangyshlak sedimentary basin, identify regional reservoir strata and possible hydrocarbon caps, and determine the boundaries of the areal distribution of the main oil and gas complexes. **Methods.** A macro description of the well cores and microscopic examination of the sections were carried out. Lithological and stratigraphic dissection and correlation of well sections were performed using data from all types of logging, paleontological definitions of organic residues. Extensive material has been analyzed based on the results of sampling and formation testing of Triassic sediments. Petrophysics data were used to study the reservoir-filtration properties of rocks. The structural features of individual oil and gas fields have been studied in detail. **Results.** The presence of two oil and gas bearing formations in the Triassic section of the South Mangyshlak trough was established - the Upper Triassic terrigenous and volcanogenic-carbonate Upper Cenek-Middle Triassic. They are separated by the volcanogenic mudstone strata of the Middle Triassic, which is a regional cover. The role of the constituent oil and gas formations of individual lithological strata in the localization of hydrocarbon accumulations has been clarified. The boundaries of the areal distribution of Triassic oil and gas complexes have been determined, which allows a more differentiated approach to assessing the prospects of oil and gas potential of both the territory of Southern Mangyshlak as a whole and individual local uplifts identified in various tectonic zones. The obtained results can be used to study the conditions of formation and spatial distribution patterns of hydrocarbon accumulations in other oil and gas-bearing regions of the Scythian-Turanian platform.

**Keywords:** lithology, stratigraphy, formations, oil and gas, porosity, permeability, prospects of oil and gas potential.

**Acknowledgements:** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-27-00037.

**For citation:** Popkov V.I., Popkov I.V. Oil and gas bearing formation complexes of the Triassic of the South-West Turan plate. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 166-178. DOI: 10.46698/VNC.2024.17.41.013

## Введение

По мере истощения объектов поисково-разведочных работ на нефть и газ в платформенном чехле запада Туранской плиты во второй половине семидесятых годов прошлого века в разведку были вовлечены отложения триаса. Поисковые работы велись в различных районах плиты (Бузачинский свод, Южно-Бузачинский прогиб,

Северо-Устюртская синеклиза, Южно-Мангышлакский прогиб, Карабогазский свод), однако промышленные скопления нефти и газа были открыты лишь в пределах последнего. Причиной этого могут являться различия в истории геологического развития на доплитном этапе разнородных тектонических элементов этого обширного региона, вошедших в состав Туранской плиты после завершения раннекиммерийского этапа тектогенеза [Natalin, Sengor, 2004; Nikishin et al., 1988; Feinberg et al., 1996].

Триасовые отложения Южно-Мангышлакского осадочного бассейна достаточно хорошо изучены. Тем не менее, относительно возраста и стратиграфического расчленения вскрытых разрезов доюрских отложений существуют разные точки зрения [Алексеева и др., 1991; Боранбаев, Боранбаев, 2022; Липатова, 1984; Valini et al., 2000]. Соответственно это ведет к разночтениям стратиграфической приуроченности нефтегазоносных горизонтов на отдельно взятых поднятиях и, тем более, при их сопоставлении с другими площадями [Боранбаев и др., 2002; Gurbanov, 2004; Zhidovinov, 1993]. Обусловлено это использованием ограниченного числа скважин при разработке стратиграфических схем, а также недостаточным вниманием к детальным литолого-фациальным исследованиям.

Целью данной работы является изучение закономерностей локализации скоплений нефти и газа в триасовом разрезе Южно-Мангышлакского осадочного бассейна, выделение региональных толщ-коллекторов и возможных покровов углеводородов.

Полагаем, что полученные результаты могут быть полезны при решении нефтегеологических задач и в других регионах Скифско-Туранской платформы, включая Восточное и Западное Предкавказье, где триасовые отложения остаются одним из направлений геологоразведочных работ [Вобликов и др., 1999; Харченко и др., 2022; Хасанов и др., 2020; Hasanov et al., 2017; Nelepov et al., 2021].

### Методы исследований

В основу исследований положен комплексный анализ поисково-разведочных работ на всех площадях Южного Мангышлака. На первом этапе работ выполнено макро- и микроскопическое изучение кернового материала. Собраны и обобщены палеонтологические данные. Произведено литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция разрезов практически всех скважин, вскрывших триасовые отложения. Составлены типовые разрезы триасовых отложений основных тектонических зон. Применены методы формационного и фациального анализов.

На втором этапе исследований собран и проанализирован обширный материал по опробованию и пластовым испытаниям триасовых отложений. Привлечены данные о строении месторождений нефти и газа, а также лабораторных исследований емкостно-фильтрационных свойств пород. Осуществлена привязка притоков и нефтегазопроявлений к выделенным литологическим толщам. Для площадного картирования нефтегазоносных комплексов использованы данные сейсморазведки.

### Результаты исследований и их обсуждение

В структуре доюрского (доплитного) комплекса запада Туранской плиты выделяются Центрально-Мангышлакско-Карашорская и Туаркыр-Карауданская раннекиммерийские складчатые системы. Вне этих зон отложения пермо-триаса залегают полого, что дает возможность выделить здесь структурные элементы более низкого порядка (рис. 1). Южно-Мангышлакский платформенный прогиб в значительной степени является наложенным на структурный план подстилающих отло-

жений. Жетыбай-Узенская ступень и Кокумбайская моноклираль северного борта прогиба располагаются над южной частью Центрально-Мангышлакской складчатой зоны, граничащей с Южно-Мангышлакским геоблоком. В пределах последнего выделяются Сегендыкская и Жазгурлинская депрессии, разделенные Карагинской седловиной. Крупным положительным структурным элементом является Песчано-мысско-Ракушечная зона поднятий.

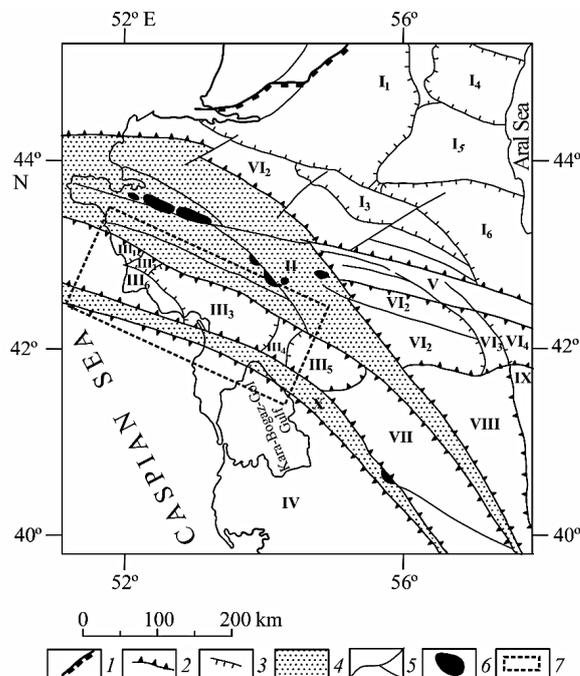


Рис. 1. Обзорная тектоническая схема триасовых отложений запада Туранской плиты.

1 – граница Туранской и Русской плит; границы тектонических элементов: 2 – первого, 3 – второго порядков; 4 – раннециммерийские складчатые системы; 5 – основные разломы; 6 – выходы доюрских отложений на поверхность; 7 – район исследований.  
Цифры на схеме: I – Северо-Устьюртская синеклиза: I<sub>1</sub> – Култукско-Самская депрессия, I<sub>2</sub> – Арстановско-Ирдалинская ступень, I<sub>3</sub> – Астауойская моноклираль, I<sub>4</sub> – Косбулакская депрессия, I<sub>5</sub> – Акумсукский выступ, I<sub>6</sub> – Барсакельмесская депрессия; II – Мангышлакско-Карашиорская система дислокаций; III – Южно-Мангышлакская система прогибов: III<sub>1</sub> – Сегендыкская депрессия, III<sub>2</sub> – Карагинская седловина, III<sub>3</sub> – Жазгурлинская депрессия, III<sub>4</sub> – Карынжарыкская седловина, III<sub>5</sub> – Учкудукская депрессия, III<sub>6</sub> – Песчано-мысско-Ракушечная зона поднятий; IV – Кара-Богазский массив; V – Центрально-Устьюртская система поднятий; VI – Южно-Устьюртская система прогибов: VI<sub>1</sub> – Шахпахтинская ступень, VI<sub>2</sub> – Ассаке-Ауданский прогиб, VI<sub>3</sub> – Сарыкамьшская седловина, VI<sub>4</sub> – Дарьялык-ДAUDANский прогиб; VII – Кумсебшенский выступ; VIII – Верхнеузбойский прогиб; IX – Центрально-Каракумский массив; X – Туаркыр-Карауданская система дислокаций /

Fig. 1. Overview tectonic scheme of the Triassic deposits of the west of the Turanian plate.

1 – the boundary of the Turanian and Russian plates; the boundaries of tectonic elements: 2 – of the first, 3 – of the second order; 4 – Early Cimmerian folded systems; 5 – major faults; 6 – outcrops of pre-Jurassic deposits to the surface; 7 – the research area. The figures in the diagram are: I – North Ustyurt syneclyse: I<sub>1</sub> – Kultuk-Sam depression, I<sub>2</sub> – Arstanov-Irdal stage, I<sub>3</sub> – Astauoi monocline, I<sub>4</sub> – Kosbulak depression, I<sub>5</sub> – Akumsuk ledge, I<sub>6</sub> – Barsakelmess depression; II – Mangyshlak-Karashor dislocation system; III – South Mangyshlak deflection system: III<sub>1</sub> – Segendyk depression, III<sub>2</sub> – Karagiinskaya saddle, III<sub>3</sub> – Zhazgurlynsky depression, III<sub>4</sub> – Karynzharlyk saddle, III<sub>5</sub> – Uchkuduk depression, III<sub>6</sub> – Peschanomyssk-Rakushechnaya uplift zone; IV – Kara-Bogaz massif; V – Central Ustyurt uplift system; VI – South Ustyurt deflection system: VI<sub>1</sub> – Shakhpakhtinskaya step, VI<sub>2</sub> – Assake-Audan trough, VI<sub>3</sub> – Sarykamysh saddle, VI<sub>4</sub> – Daryalyk-Daudan trough; VII – Kumsebshen ledge; VIII – Verkhneuzboy trough; IX – Central Karakum massif; X – Tuarkyr-Karaaudan dislocation system.

## Литология триасовых отложений

В пределах Южно-Мангышлакского прогиба может быть выделено три типа разрезов: карауданский, жетыбай-узенский и песчаномыско-ракушечный, отражающих особенности тектонического развития юго-запада Туранской плиты на доплитном этапе. Первые два принадлежат зонам пермско-триасовых прогибов (Туаркыр-Карауданскому и Мангышлакско-Карашорскому, соответственно). Выполняющие их отложения перми и триаса испытали складчатость в предюрское время. Третий, песчаномыско-ракушечный тип разреза распространен в пределах Южно-Мангышлакского геоблока, где триас слабо дислоцирован и резко сокращен в мощности. Осуществлено расчленение разрезов на слагающие литологические толщи, которым присвоены индексы ( $T_1^1$ ,  $T_1^2$ ,  $T_2^1$  и т.д.) с последующей их стратиграфической привязкой. В связи с тем, что поисково-разведочные работы в Карауданской зоне не увенчались успехом, ниже в краткой форме дается описание жетыбай-узенского и песчаномыско-ракушечного разрезов. Более подробно этот вопрос рассмотрен нами в специальной статье [Попков В.И., Попков И.В., 2023а].

Жетыбай-Узенский тип разреза вскрыт глубокими скважинами в пределах одноименной тектонической ступени Южно-Мангышлакского платформенного прогиба (рис. 2). Наиболее древняя песчаниково-алевролитовая толща ( $T_1^0$ ) вскрыта скважинами в северной части ступени на площади Узень. Представлена она красноцветными грубообломочными песчаниками и алевролитами континентального генезиса. Возраст их предположительно индский.

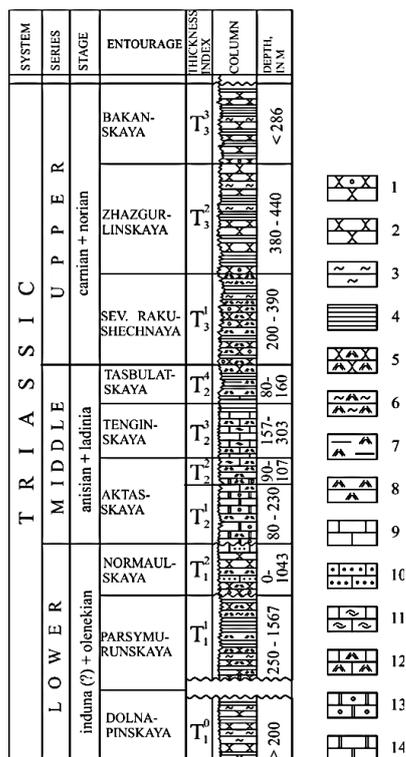


Рис. 2. Жетыбай-Узенский тип разреза.  
 1 – песчаники грубозернистые с гравийной примесью,  
 2 – песчаники средне- и мелкозернистые,  
 3 – алевролиты, 4 – аргиллиты, 5 – туфопесчаники,  
 6 – туфоалевролиты, 7 – туфоаргиллиты,  
 8 – туффиты и туфы, 9 – известняки мелкозернистые и кристаллические, 10 – известняки с терригенной примесью, 11 – известняки органогенно-детритовые, 12 – туфоизвестняки,  
 13 – доломиты оолитово-комковатые и оолитово-обломочные, 14 – доломиты сгустковые /

Fig. 2. Zhetybai-Uzen type of incision.  
 1 – coarse-grained sandstones with gravel admixture,  
 2 – medium- and fine-grained sandstones,  
 3 – siltstones, 4 – mudstones, 5 – tuff sandstones,  
 6 – tufoaleurolites, 7 – tufoargillites, 8 – tuffites and tuffs,  
 9 – fine-grained and crystalline limestones, 10 – limestones with terrigenous admixture, 11 – organogenic limestones-detritus, 12 – tuff limestone, 13 – dolomites oolitic-lumpy and oolitic-clastic, 14 – clump dolomites

В южной и юго-западной частях ступени отложения этого возраста отсутствуют в разрезе и на палеозойских породах с размывом залегает пестроцветная алевролитово-аргиллитовая толща ( $T_1^1$ ), содержащая прослои карбонатных пород, мелко- и среднезернистых песчаников, туфов и туффитов. На основании палеонтологических данных возраст пород раннетриасовый [Алексеева и др., 1991].

Сменяет ее карбонатно-терригенная толща ( $T_1^2$ ). Сложена она алевролитами, аргиллитами, песчаниками, известняками с примесью вулканогенного материала. Окраска пород зеленовато-серого и серого цвета. Возраст отложений позднеоленекский [Алексеева и др., 1991].

В составе вулканогенно-доломитовой толщи ( $T_2^1$ ) среднего триаса преобладают оолитово-комковатые и оолитово-обломочные доломиты, чередующиеся с прослоями туфов, микрозернистыми и органогенно-детритовыми известняками.

В составе известняково-вулканогенной толщи ( $T_2^2$ ) значительная роль принадлежит вулканокластическому материалу, который чередуется с оолитово-комковатыми, оолитово-обломочными и органогенно-детритовыми известняками. Подчиненное значение имеют песчаники, аргиллиты и доломиты.

Вулканогенно-известняковая толща ( $T_2^3$ ) сложена шламовыми и органогенно-детритовыми известняками с прослоями туфов. В средней части толщи содержание туфогенного материала возрастает, вследствие чего она достаточно отчетливо оказывается разделенной на две части.

Завершает среднетриасовый разрез вулканогенно-аргиллитовая толща ( $T_2^4$ ). В ее составе преобладают аргиллиты и туфоаргиллиты, которые чередуются с мало-мощными прослоями известняков, кристалло- и витрокластических туфов.

На большинстве площадей в составе верхнего триаса выделяется две литологических толщи. В основании нижней туфогенно-терригенной толщи ( $T_3^1$ ) залегает грубообломочный пласт песчаников и гравелитов. Характерной особенностью толщи является присутствие в ее составе плохо окатанных продуктов разрушения подстилающих туфогенных пород.

Песчаниково-аргиллитовая толща ( $T_3^2$ ) представлена аргиллитами, равномерно чередующимися с песчаниками и алевролитами.

Присутствие в разрезе аргиллито-песчаниковой толщи ( $T_3^3$ ) было установлено после бурения скважин на площадях Баканд, Пионерская и Сакудук, находящихся в зоне сочленения Жетыбай-Узеньской ступени и Жазгурлинской депрессии [Попков, Попков, 2023а]. По сравнению с нижележащей толщей в ее составе возрастает роль более грубообломочного терригенного материала.

В составе двух последних толщ отсутствует вулканогенный материал.

Несколько по-иному выглядит разрез триасовых отложений Песчаномыско-Ракушечной зоны сводовых поднятий. Здесь разрез обычно начинается с пестроцветной алевролитово-аргиллитовой толщи ( $T_1^1$ ) с базальным пластом мощностью до 20–25 м в основании, в котором содержатся плохо окатанные обломки подстилающих метаморфических и магматических пород фундамента. На Оймашинской площади на породах фундамента залегает вулканогенно-доломитовая толща ( $T_2^1$ ) среднего триаса.

В целом литологический состав отложений мало отличается от разреза Жетыбай-Узеньской ступени. Описанные выше литологические толщи легко распознаются в разрезе, что указывает на формирование отложений в едином бассейне седиментации. Основное отличие заключается в уменьшении мощности всех литологических толщ с одновременным возрастанием процентного содержания туфогенной составляющей.

Песчаномыско-ракушечный тип разреза сохраняется и в пределах Сегендыкской депрессии и Карагиинской седловины.

### Закономерности размещения скоплений нефти и газа в разрезе триасовых отложений

В триасовых отложениях Южного Мангышлака к настоящему времени открыто около двадцати месторождений углеводородов (УВ); на многих площадях получены притоки разной интенсивности. Для выяснения закономерностей размещения скоплений нефти и газа в разрезе осуществлена привязка известных притоков и нефтегазопроявлений к выделенным литологическим толщам (рис. 3).

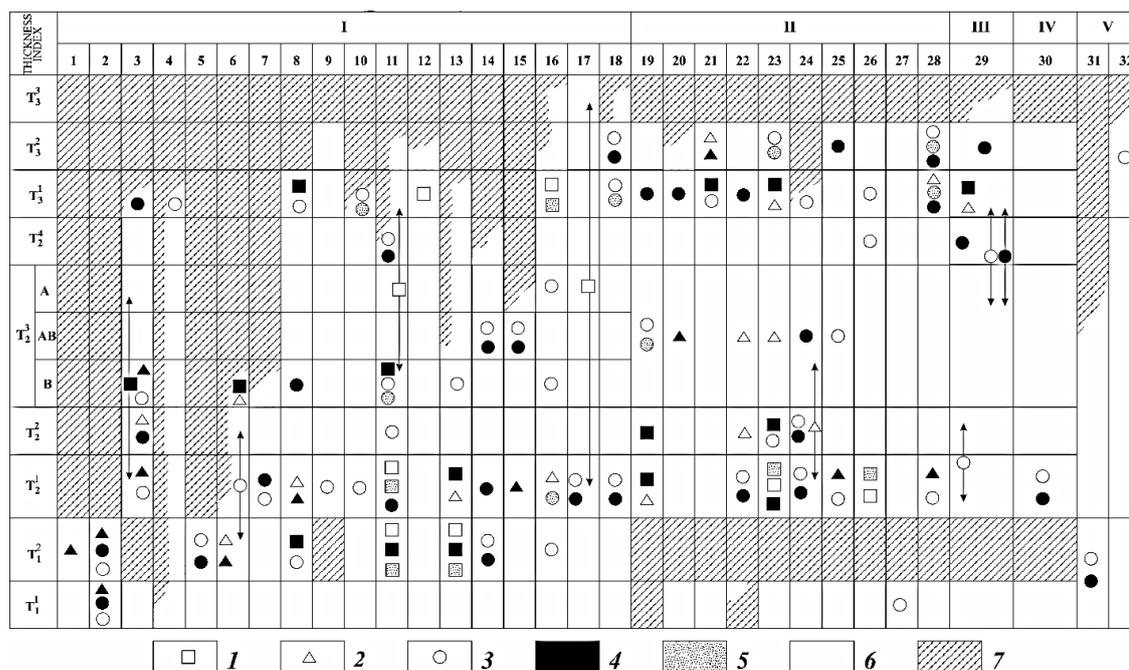


Рис. 3. Схема нефтегазоносности триасового разреза.

Характер притока: 1 – промышленный, 2 – непромышленный, 3 – проявление. Флюид:

4 – нефть, 5 – газ, 6 – конденсат, 7 – отсутствие отложений в разрезе.

Тектонические элементы: I – Жетыбай-Узенская ступень, II – Песчаномыско-Ракушечная зона поднятий, III – Карагинская седловина, IV – Сегендыкская депрессия, V – Караауданская зона.

Поисково-разведочные площади: 1 – Туркменой, 2 – Узень, 3 – Северо-Западный Жетыбай,

4 – Западный Жетыбай, 5 – Жетыбай, 6 – Бектурлы, 7 – Шинжир, 8 – Каменистая, 9 – Придорожная, 10 – Актас, 11 – Южный Жетыбай, 12 – Восточный Нармаул, 13 – Тасбулат, 14 – Западное Тенге, 15 – Тенге, 16 – Западный Тасбулат, 17 – Баканд, 18 – Пионерская, 19 – Оймаша, 20 – Ащисор, 21 – Жиланды, 22 – Ташкум, 23 – Северо-Ракушечное, 24 – Ракушечномысская, 25 – Адыр, 26 – Уйлюк, 27 – Змеиная, 28 – Сарсенбай, 29 – Северное Карагие, 30 – Бегеш, 31 – Темир-Баба, 32 – Жарты /

Fig. 3. Diagram of the oil and gas potential of the Triassic section.

The nature of the inflow: 1 – industrial, 2 – non-industrial, 3 – manifestation. Fluid: 4 – oil, 5 – gas, 6 – condensate, 7 – absence of deposits in the section.

Tectonic elements: I – Zhetybai-Uzen stage, II – Peschanomyssk-Rakushechnaya uplift zone, III – Karagiinskaya saddle, IV – Segendyk depression, V – Karaaudan zone.

Exploration areas: 1- Turkmenoy, 2 – Uzen, 3 – Northwestern Zhetybai, 4 – Western Zhetybai, 5 – Zhetybai, 6 – Bekturly, 7 – Shinzhir, 8 – Stony, 9 – Roadside, 10 – Aktas, 11 – Southern Zhetybai, 12 – Eastern Narmaul, 13 – Tasbulat, 14 – Western Tenge, 15 – Tenge, 16 – Western Tasbulat, 17 – Bakand, 18 – Pionerskaya, 19 – Oymasha, 20 – Aschisor, 21 – Zhilandy, 22 – Tashkent, 23 – Severo-Rakushechnoye, 24 – Rakushechnomysskaya, 25 – Adyr, 26 – Uyluk, 27 – Zmeinaya, 28 – Sarsenbai, 29 – Severnoye Karagie, 30 – Begesh, 31 – Temir Baba, 32 – Zharty

Как следует из приведенной таблицы нефтегазоносности, в нижнем триасе практический интерес представляет только карбонатно-терригенная толща  $T_1^2$ . В ней на месторождениях Тасбулат и Южный Жетыбай разведаны нефтяная, газовая и газоконденсатная залежи. Дебиты газа и конденсата достигали 560 тыс.  $m^3/сут$  и 72  $m^3/сут$ , соответственно. На Тасбулате приток нефти составил 121  $m^3/сут$ , газа – 156 тыс.  $m^3/сут$ . На площади Каменистая из этой же части разреза получен приток нефти дебитом 16,8  $m^3/сут$ . Коллекторами в данной толще обладают пласты аркозовых песчаников. Открытая (межзерновая) пористость песчаников 8–18%, а поровая проницаемость колеблется от 0,00001 до 0,007  $мкм^2$ . Сохранению первичных емкостно-фильтрационных свойств способствовал их минеральный состав [Попков, Попков, 2023б].

Развитие каверново-поровых коллекторов обеспечило достаточно высокие коллекторские свойства (открытая пористость до 28%, проницаемость до 0,6  $мкм^2$ ) в вулканогенно-доломитовой толще  $T_2^1$  среднего триаса. В ней разведаны залежи «А» и «Б» на Северо-Ракушечной площади, газоконденсатная («В») залежь на Южном Жетыбае, нефтяные на Тасбулате (залежь «А») и Северо-Западном Жетыбае («Б») [Коростышевский, 1978]. Практически на всех поисково-разведочных площадях, где данная толща присутствует в разрезе, получены притоки УВ различной интенсивности, в том числе высокодебитные, или же отмечались нефтегазопроявления.

Широкое развитие туфогенных пород в составе известняково-вулканогенной толщи  $T_2^2$  значительно снижает ее емкостно-фильтрационные параметры. Характерны порово-трещинный и трещинный типы коллекторов [Кузнецов и др., 1978]. В этой толще открыты газовая залежь на Пионерской площади (в скважине №2 получен газ с конденсатом дебитами соответственно 38 тыс.  $m^3/сут$  и 11  $m^3/сут$ ) и нефтяная залежь на Северо-Западном Жетыбае. Из этой же части разреза в скважине №9 Оймаша из интервала глубин 3514–3544 м получен фонтан нефти дебитом 250  $m^3/сут$ .

В верхней части вулканогенно-известняковой толщи  $T_2^3$  (пачка А) промышленных притоков не получено. К нижней ее половине (пачка Б) приурочена нефтяная залежь на Южном Жетыбае [Коростышевский, Кузнецов, 1979]. Тип коллектора трещинный. На площадях Актас, Бектурлы, Ащисор, Ташкум, Северо-Ракушечная получены низко- и среднедебитные притоки УВ. Кроме того, на многих других разведочных площадях из этой части разреза отмечались нефтегазопроявления.

В составе вулканогенно-аргиллитовой толщи  $T_2^4$  среднего триаса ведущая роль принадлежит аргиллитам с богатой примесью туфогенного материала. Данная толща является, на наш взгляд, достаточно надежной региональной покрывкой, разделяющей вулканогенно-карбонатную верхнеоленинско-среднетриасовую и терригенную верхнетриасовую нефтегазоносные формации.

После получения промышленных притоков нефти из верхнетриасовых отложений на площадях Южный Жетыбай, Северное Карагие, Жиланды, Северо-Ракушечная, Каменистая и газа с конденсатом на Западном Тасбулате и Восточном Нармауле, заметно возрос интерес к терригенному комплексу триаса. В различных его частях присутствуют горизонты грубозернистых терригенных пород – потенциальных коллекторов для УВ, а разделяющие их глинистые пачки могут исполнять роль покрывок.

Оценивая в целом положительно перспективы нефтегазоносности верхнетриасовых отложений, следует отметить, что основные промышленные притоки УВ связаны с базальной грубообломочной пачкой, располагающейся в основании туфогенно-терригенной толщи  $T_3^1$ . Мощность ее меняется от 25–35 м в пределах Песчаномысско-Ракушечной зоны до 40–70 м в юго-западной части Жетыбай-Узеньской

ступени и в районе Баканда и Пионерской. Породы обладают удовлетворительными коллекторскими свойствами: открытая пористость достигает 18–20%, проницаемость 0,01 мкм<sup>2</sup>.

Продуктивность этой пачки доказана в различных структурно-тектонических зонах Южного Мангышлака. Так, например, промышленные залежи нефти открыты на Северо-Карагиинском и Каменистом поднятиях; на других площадях (Восточно-Нармаульской, Жиландинской, Северо-Ракушечной и др.) получены достаточно значительные притоки нефти и газа, достигающие 79 м<sup>3</sup>/сут и 140 тыс. м<sup>3</sup>/сут соответственно. Данный факт позволяет считать ее регионально продуктивным горизонтом.

Другие алевролито-песчаные горизонты в верхнетриасовом разрезе обладают меньшим коллекторским потенциалом, что отразилось и на полученных из них притоках УВ.

### Площадное распространение триасовых нефтегазоносных формаций

На площадное распространение нефтегазоносных отложений триаса в значительной степени повлиял предъюрский размыв. В местах их отсутствия вероятность открытия залежей УВ резко снижается, что обусловлено в первую очередь низкими коллекторскими свойствами подстилающих толщ. Следовательно, для более целенаправленного ведения поисковых работ в отложениях триаса необходимо определить границы развития терригенного и вулканогенно-карбонатного комплексов. Достаточно достоверную и полную информацию о площадном распространении разновозрастных отложений триаса можно получить в случае привлечения материалов сейсморазведки. С этой целью была осуществлена привязка отражающих горизонтов группы волновых пакетов V<sub>1</sub> и V<sub>2</sub> к выделенным литологическим толщам. Последующее трассирование границ выхода отражающих горизонтов на предъюрскую поверхность размыва в комплексе с буровыми данными позволило с высокой

степенью уверенности проследить распространение исследуемых литолого-стратиграфических комплексов в пределах Южно-Мангышлакского прогиба (рис. 4).

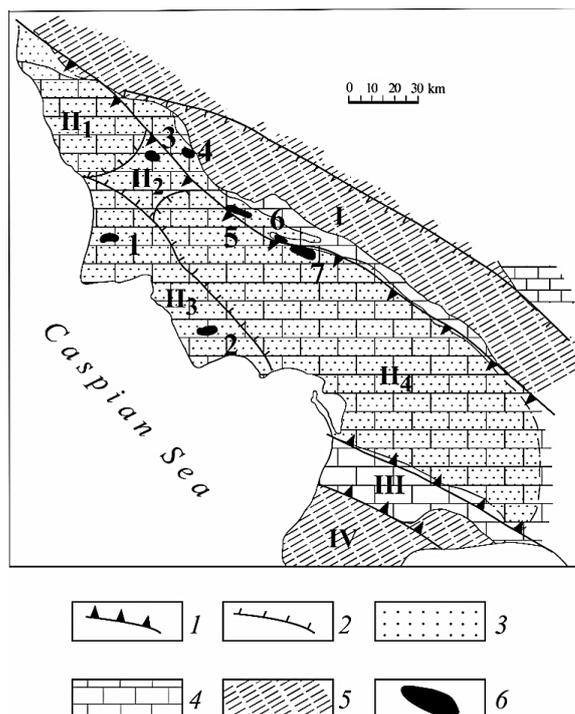


Рис. 4. Южный Мангышлак. Схема распространения триасовых нефтегазоносных формаций. Границы тектонических элементов: 1 - первого порядка (I - Центрально-Мангышлакская система дислокаций, II - Южно-Мангышлакский геоблок, III - Карауданская зона; IV - Карабогазский свод), 2 - второго порядка (II<sub>1</sub> - Сегендыкская депрессия, II<sub>2</sub> - Карагиинская седловина, II<sub>3</sub> - Песчаномыско-Ракушечная зона поднятий, II<sub>4</sub> - Жазгурлинская депрессия); формации: 3 - верхнетриасовая терригенная, 4 - верхнеоленекско-среднетриасовая вулканогенно-карбонатная; 5 - зоны

отсутствия в разрезе триасовых нефтегазоносных формаций; 6 – основные месторождения УВ: 1 – Оймаша, 2 – Северо-Ракусешное, 3 – Северное Карагие, 4 – Северо-Западный Жетыбай, 5 – Южный Жетыбай, 6 – Тасбулат, 7 – Пионерское /

*Fig. 4. Southern Mangyshlak. The distribution scheme of Triassic oil and gas formations. Boundaries of tectonic elements: I - of the first order (I - Central Mangyshlak dislocation system, II – South Mangyshlak geoblock, III –Karaaudan zone; IV - Karabogaz arch), 2 – of the second order (III – Segendyk depression, II2 – Karagiinsky saddle, II3 – Peschanomyssk-Rakushechnaya uplift zone, II4 – Jazgurlinsky depression); formations: 3 – Upper Triassic terrigenous, 4 – Upper Cenek-Middle Triassic volcanogenic-carbonate; 5 – zones of absence in the section of Triassic oil and gas formations; 6 – main hydrocarbon deposits: 1 – Oymasha, 2 – North-Rakushechnoe, 3 – Northern Karagie, 4 – North-Western Zhetybai, 5 – Southern Zhetybai, 6 – Tasbulat, 7 – Pioneer*

Как видно на прилагаемой схеме, верхнетриасовые отложения локализованы прежде всего в приосевой зоне прогиба, выклиниваясь в пределах его бортов. Несколько более широким распространением пользуется вулканогенно-карбонатный комплекс, присутствующий в разрезе на большей части Караауданской зоны, а также южной половине Жетыбай-Узеньской ступени. Отсутствие отложений этого возраста на севере указанной ступени и на большей части Кокумбайской моноклинали резко снижает перспективы нефтегазоносности доюрских отложений этих районов, несмотря на то, что здесь закартировано достаточно большое количество локальных поднятий.

Недостаточно уверенно определены восточные границы распространения триасовых нефтегазоносных комплексов, что обусловлено низкой плотностью сейсмопрофилей в восточной части Жазгурлинской депрессии. Уточнение геологического строения этого района может быть произведено в случае проведения региональных сейсмических работ.

## Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что в триасовом разрезе Южно-Мангышлакского прогиба могут быть выделены две нефтегазоносных формации – верхнетриасовая терригенная и вулканогенно-карбонатная верхнеоленекско-среднетриасовая. Разделены они вулканогенно-аргиллитовой толщей среднего триаса, являющейся региональной покрывкой. Поскольку в верхнетриасовой формации главенствующую роль играют терригенные коллекторы, можно полагать, что в ней преобладают пластово-сводовые залежи, а методика их опоискования будет близка методике, применяемой при поисках и разведке залежей в вышележащих ниже- и среднеюрских отложениях континентального и прибрежно-морского генезиса.

В вулканогенно-карбонатном комплексе условия, контролирующие размещение скоплений УВ, более сложные. Однако и в этом комплексе отложений наблюдается достаточно четкий литологический контроль распределения залежей в разрезе. Так, основной нефтегазоносной толщей, независимо от тектонической принадлежности площади, является вулканогенно-доломитовая. Верхнеоленекские карбонатно-терригенные отложения в районах, прилегающих к погребенным палеовыступам, где отмечается увеличение песчаности разреза, также могут иметь достаточно хорошие коллекторские свойства, подтверждением чему служат высокодебитные фонтаны нефти и газа на Южно-Жетыбайском и Тасбулатском месторождениях. Удовлетворительным потенциалом обладает и нижняя пачка вулканогенно-карбонатной

толщи (пачка «В»). Морфология резервуаров в вулканогенно-карбонатных отложениях в значительной мере зависит от процессов, контролирующих образование вторичных емкостно-фильтрационных свойств пород. Возрастание процентного содержания в породах вулканогенного материала ведет к снижению их коллекторского потенциала и в отдельных случаях такие интервалы разреза могут выступать в роли зональных покрышек.

Определение границ площадного распространения нефтегазоносных комплексов триаса позволяет подойти более дифференцировано к оценке перспектив нефтегазоносности как территории Южного Мангышлака в целом, так и отдельных локальных поднятий, выявленных в различных тектонических зонах.

### Литература

1. Алексеева Л.В., Виноградова К.В., Цатурова А.А., Демидов А.А., Досмухамбетов Д.М., Титов Б.И., Гаврилова В.А., Бабичева Т.В. Стратиграфическое расчленение триасовых отложений Южного Мангышлака. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 1991. – Т. 66. Вып. 4. – С. 37–43.
2. Боранбаев К.Х., Боранбаев А.К. Перспективы нефтегазоносности доюрских отложений Южного Мангыштау, направление дальнейших поисково-разведочных работ и некоторые вопросы методики их проведения. // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2022. – Т. 4. №4. – С. 5–14. DOI: 10.54859/kjogi108601.
3. Боранбаев К.Х., Джансеитов Н.С., Боранбаев А.К. Вопросы корреляции триасовых отложений Южного Мангыштау. // Геология Казахстана. – 2002. – № 2. – С. 23–28.
4. Вобликов Б.Г., Стерленко З.В., Гридин В.А., Туманова Е.Ю., Чумаченко И.А. Условия формирования и закономерности распространения нефтекумского природного резервуара в пределах Центрального и Восточного Предкавказья. // Сборник научных трудов: Теория и практика добычи, транспорта и переработки газоконденсата. Вып. 1. – Астрахань. – 1999. – С. 39–45.
5. Коростышевский М.Н. Особенности определения продуктивных объемов по залежам в триасовых отложениях на Южном Мангышлаке. // Разведка нефтяных месторождений Мангышлака. Грозный: СевКавНИПИнефть, – 1978. – С. 14–16.
6. Коростышевский М.Н., Кузнецов В.В. Строение продуктивной толщи в триасовых отложениях на Южном Мангышлаке. // Разведка нефтяных месторождений Мангышлака. Грозный: СевКавНИПИнефть, – 1979. – С. 9–14.
7. Кузнецов В.В., Проняков В.А., Инюткина А.В., Вандюк В.П., Котов В.П. Нефтегазовые коллекторы продуктивных триасовых отложений Южного Мангышлака. // Оценка параметров карбонатных коллекторов и геометризация залежей нефти в различных геотектонических условиях на территории СССР. Пермь, – 1978. – С. 36–37.
8. Липатова В.В. Проект стратиграфических схем триасовых отложений Мангышлака и Устюрта. // Стратиграфия и палеонтология триасовых отложений Мангышлака и Устюрта. М.: ВНИГНИ, – 1984. – С. 33–56.
9. Попков В.И., Попков И.В. Литологическое расчленение и корреляция нефтегазоносных комплексов триаса Южного Мангышлака. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2023а. – Т. 18. № 2. – 24 с. DOI: 10.17353/2070-5379/16\_2023.
10. 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. – Том 13. № 2. – С. 106–117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009.
11. Харченко В.М., Черненко К.И., Еремина Н.В., Самусев Д.Д. Некоторые закономерности формирования и распространения рифогенных построек в триасовых отложениях на территории Восточного Предкавказья в связи с нефтегазоносностью. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 3. – С. 133–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.35.009.

12. 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.
13. Balini M., Gavrilova V.A., Nicora A. Biostratigraphical revision of the classic Lower Triassic Dolnaya section (Mangyshlak, West Kazakhstan). // Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. – 2000. – Vols. 11–12. – pp. 1441–1462.
14. Gurbanov V.Sh. Lithostratigraphic characteristic and lithology of triassic-paleozoic rocks of Southern Mangyshlak. // Lithology and Mineral Resources. – 2004. – No. 39. Issue 6. – pp. 541–554.
15. Feinberg H., Gurevitch E.L., Westphal M., Pozzi J.P., Khramov A.N. Palaeomagnetism of a Permian–Triassic sequence in Mangyshlak (Kazakhstan, CIS). // C. R. Acad. Sci. – 1996. – No. 322. – pp. 617–623.
16. Hasanov M.A., Aleksandrov B.L., Eljayev A.S., Ezirbaev T.B., Gatsaeva S.S. Forecasting cracked collectors on anticlinal type structures at late stage of exploration in oil and gas area. // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2017. – No. 87. – pp. 052008.
17. Natalin B., Sengor C. Paleozoic–Early Mesozoic accretion in the Turan/Scythian region and evolution of the northern margin of the Paleo-Tethyan ocean. // International Workshop on Accretionary Orogens and Continental growth. Central Geological Survey of Taiwan. – Longtanm, 2004. – pp. 74–78.
18. Nelepov M., Gridin R., Lutsenko O., Sterlenko Z., Tumanova Ye., Yeriomina N., Chernenko K., Gridin V. Fracture modeling of carbonate reservoirs of Low Triassic Neftekumsk 144 formation of hydrocarbon field in Petrel software. // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 24. – pp. 23–32. DOI: 10.1051/e3 sconf/202124403020.
19. Nikishin A.M., Cloetingh S., Brunet M.-F., Stephenson R., Bolotov S.N., Ershov A.V. Scythian platform, Caucasus and Black Sea region: Mesozoic–Cenozoic tectonic and dynamics. // Crasquin-Soleau, S. Barrier, E. (Eds.), Peri-Tethys Memoir: 3: Stratigraphy and Evolution of Peri-Tethyan Platforms, Vol. 177. Memoires du Museum national d’Histoire naturelle. – Paris, 1988. – pp. 163–176.
20. Zhidovinov S.N. Triassic stratigraphy of Mangyshlak and Ustyurt. // Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological series. – 1993. – No. 68. Issue 5. – pp. 72–78.

## References

1. Alekseeva L.V., Vinogradova K.V., Tsaturova A.A., Demidov A.A., Dosmukhambetov D.M., Titov B.I., Gavrilova V.A., Babicheva T.V. Stratigraphic dissection of Triassic deposits of Southern Mangyshlak. Bulletin of the Moscow Society of Nature Researchers. Geological Department. 1991. Vol. 66. Issue 4. pp. 37–43. (In Russ.)
2. Boranbayev K.Kh., Boranbayev A.K. Prospects of oil and gas potential of the pre-Jurassic deposits of Southern Mangystau, the direction of further exploration and some questions of the methodology of their implementation. Bulletin of the oil and gas industry of Kazakhstan. 2022. Vol. 4. No. 4. pp. 5–14. DOI: 10.54859/kjogi108601. (In Russ.)
3. Boranbayev K.Kh., Dzhanseitov N.S., Boranbayev A.K. Correlation Issues of Triassic Deposits of Southern Mangistau. Geology of Kazakhstan. 2002. No. 2. pp. 23–28. (In Russ.)
4. Voblikov B.G., Sterlenko Z.V., Gridin V.A., Tumanova E.Yu., Chumachenko I.A. Conditions of formation and patterns of distribution of the Neftekumsky natural reservoir within the Central and Eastern Precaucasia. In: Proceedings Theory and practice of extraction, transportation and processing of gas condensate. Issue 1. Astrakhan. 1999. pp. 39–45. (In Russ.)
5. Korostyshevsky M.N. Features of determining productive volumes by deposits in Triassic deposits in the Southern Mangyshlak. Exploration of Mangyshlak oil fields. Grozny. Sevkavniptneft. 1978. pp. 14–16. (In Russ.)
6. Korostyshevsky M.N., Kuznetsov V.V. Structure of productive strata in Triassic sediments

in the Southern Mangyshlak. Exploration of Mangyshlak oil fields. Grozny. Sevkavniptneft. 1979. pp. 9–14. (In Russ.)

7. Kuznetsov V.V., Pronyakov V.A., Inyutkina A.V., Vandyuk V.P., Kotov V.P. Oil and gas reservoirs of productive Triassic deposits of Southern Mangyshlak. Estimation of parameters of carbonate reservoirs and geometrization of oil deposits in various geotectonic conditions on the territory of the USSR. Perm. 1978. pp. 36–37. (In Russ.)

8. Lipatova V.V. Project of stratigraphic schemes of the Triassic deposits of Mangyshlak and Ustyurt. Stratigraphy and paleontology of the Triassic deposits of Mangyshlak and Ustyurt. Moscow. VNIGNI. 1984. pp. 33–56. (In Russ.)

9. Popkov V.I., Popkov I.V. Lithological subdivision and correlation of petroleum bearing Triassic strata of the Southern Mangyshlak. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2023. Vol. 18. No. 2. 24 p. DOI: 10.17353/2070-5379/16\_2023. (In Russ.)

10. 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.)

11. Kharchenko V.M., Chernenko K.I., Eremina N.V., Samusev D.D. Some regularities of the formation and distribution of reef structures in Triassic sediments in the territory of the Eastern Caucasus in connection with oil and gas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 133–145. DOI: 10.46698/VNC.2022.80.35.009. (In Russ.)

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

13. Balini M., Gavrilova V.A., Nicora A. Biostratigraphical revision of the classic Lower Triassic Dolnapa section (Mangyshlak, West Kazakhstan). *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*. 2000. Vols. 11–12. pp. 1441–1462.

14. Gurbanov V.Sh. Lithostratigraphic characteristic and lithology of triassic-paleozoic rocks of Southern Mangyshlak. *Lithology and Mineral Resources*. 2004. No. 39. Issue 6. pp. 541–554.

15. Feinberg H., Gurevitch E.L., Westphal M., Pozzi J.P., Khramov A.N. Palaeomagnetism of a Permian. Triassic sequence in Mangyshlak (Kazakhstan, CIS). *C. R. Acad. Sci*. 1996. No. 322. pp. 617–623.

16. Hasanov M.A., Aleksandrov B.L., Eljayev A.S., Ezirbaev T.B., Gatsaeva S.S. Forecasting cracked collectors on anticlinal type structures at late stage of exploration in oil and gas area. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017. No. 87. pp. 052008.

17. Natalin B., Sengor C. Paleozoic–Early Mesozoic accretion in the Turan/Scythian region and evolution of the northern margin of the Paleo-Tethyan ocean. *International Workshop on Accretionary Orogens and Continental growth*. Central Geological Survey of Taiwan. Longtanm. 2004. pp. 74–78.

18. Nelepov M., Gridin R., Lutsenko O., Sterlenko Z., Tumanova Ye., Yeriomina N., Chernenko K., Gridin V. Fracture modeling of carbonate reservoirs of Low Triassic Neftekumsk 144 formation of hydrocarbon field in Petrel software. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 24. pp. 23–32. DOI: 10.1051/e3 sconf/202124403020.

19. Nikishin A.M., Cloetingh S., Brunet M.-F., Stephenson R., Bolotov S.N., Ershov A.V. Scythian platform, Caucasus and Black Sea region: Mesozoic–Cenozoic tectonic and dynamics. *Crasquin-Soleau, S. Barrier, E. (Eds.), Peri-Tethys Memoir: 3: Stratigraphy and Evolution of Peri-Tethyan Platforms Vol. 177. Memoires du Museum national d’Historire naturelle*. Paris. 1988. pp. 163–176.

20. Zhidovinov S.N. Triassic stratigraphy of Mangyshlak and Ustyurt. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological series*. 1993. No. 68. Issue 5. pp. 72–78.

УДК 553.98

DOI: 10.46698/VNC.2024.90.18.014

Оригинальная статья

## Геодинамическая природа размещения нефтегазовых месторождений (на примере территории Ставропольского края)

Е.А. Сидорчук , С.А. Добрынина 

Институт проблем нефти и газа РАН, Россия, 119333,  
г. Москва, ул. Губкина, дом 3, e-mail: elena\_sidorchuk@mail.ru

Статья поступила: 21.02.2024, доработана: 17.03.2024, принята к публикации: 18.03.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Разработка и совершенствование научно-методических основ прогноза и поисков скоплений углеводородов (УВ) является актуальным на протяжении всего существования нефтегазовой геологии. Геодинамические процессы в течение геологической истории приводят к определенному размещению природных резервуаров в осадочном чехле нефтегазоносных бассейнов. **Целью** выполненной работы было решение двух задач. Одна задача включала совершенствование технологии поисков наиболее крупных по запасам скоплений УВ с использованием современной методологии прогноза. Другая задача состояла в установлении связи масштабности по запасам скоплений нефти и газа с геологическими факторами. **Методы исследования.** Для достижения целей и выполнения поставленных задач использовались обобщение и систематизация геологических данных, корреляционный анализ, картографические построения, сопоставление результатов расчетов, выполненных авторами и другими исследователями по изучаемой теме. **Результаты работы.** Авторы показали на примере нефтегазоперспективной территории в нефтегазоносном бассейне двухэтажного строения существование двух типов зависимости геологических запасов от эффективного объема. Этот интересный результат авторы объясняют геодинамической природой размещения месторождений УВ, что особенно хорошо проявляется для наиболее масштабных по запасам месторождений нефти и газа. В этом регионе наблюдается очень широкий диапазон нефтегазоносности и отдельные залежи в разных стратиграфических горизонтах могут попадать в различные геодинамические условия. Особенности строения осадочного чехла и ландшафта территории рассматриваются как локальные геодинамические обстановки, имеющие определенные геолого-геофизические и структурные характеристики. Показана приуроченность наиболее масштабных по запасам месторождений УВ к локальным геодинамическим обстановкам. Для изучаемого региона локальные геодинамические обстановки, имеющие отражение в характере линеаментов рельефа, представляют собой связанные со структурами центрального типа вулканические постройки и вулканоплутонические центры триасового возраста.

**Ключевые слова:** локальные геодинамические обстановки, методологии прогноза, технологии поисков, крупномасштабное нефтегазонакопление, запасы углеводородов.

**Благодарности:** Работа написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Научно-методические основы поисков и разведки скоплений нефти и газа, приуроченных к мегарезервуарам осадочного чехла» № 122022800253-3).

**Для цитирования:** Сидорчук Е.А., Добрынина С.А. Геодинамическая природа размещения нефтегазовых месторождений (на примере территории Ставропольского края). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 179-194. DOI: 10.46698/VNC.2024.90.18.014

DOI: 10.46698/VNC.2024.90.18.014

Original paper

## Geodynamic nature of the location of oil and gas fields (on the example of the Stavropol Territory)

E.A. Sidorchuk , S.A. Dobrynina 

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences,  
3 Gubkin Str., Moscow 119333, Russian Federation,  
e-mail: elena\_sidorchuk@mail.ru

Received: 21.02.2024, revised: 17.03.2024, accepted: 18.03.2024

**Abstract: Relevance.** The development and improvement of scientific and methodological foundations for forecasting and searching for hydrocarbon (HC) accumulations has been relevant throughout the existence of oil and gas geology. Geodynamic processes during geological history lead to a certain placement of natural reservoirs in the sedimentary cover of oil and gas basins. **The aim of the work** performed was to solve two problems. One task included improving the technology for searching for the largest hydrocarbon accumulations in terms of reserves using modern forecasting methodology. Another task was to establish a connection between the scale of oil and gas accumulations and geological factors. **Research methods.** To achieve the goals and fulfill the assigned tasks, generalization and systematization of geological data, correlation analysis, cartographic constructions, and comparison of the results of calculations performed by the authors and other researchers on the topic under study were used. **Results.** Using the example of an oil and gas prospective territory in an oil and gas basin of a two-storey structure, the authors showed the existence of two types of dependence of geological reserves on the effective volume. The authors explain this interesting result by the geodynamic nature of the placement of hydrocarbon deposits, which is especially well manifested for the most extensive reserves of oil and gas fields. A very wide range of oil and gas potential is observed in this region and individual deposits in different stratigraphic horizons may fall into different geodynamic conditions. The structural features of the sedimentary cover and the landscape of the territory are considered as local geodynamic conditions having certain geological, geophysical and structural characteristics. It is shown that the largest reserves of hydrocarbon deposits are confined to local geodynamic conditions. For the studied region, local geodynamic conditions, reflected in the nature of the relief lineaments, are volcanic structures and volcanoplutonic centers of Triassic age associated with structures of the central type.

**Keywords:** local geodynamic conditions, forecasting methodologies, prospecting technologies, large-scale oil and gas accumulation, hydrocarbon reserves.

**Acknowledgments:** *The work was written in the framework of the state assignment «Scientific and methodological foundations for prospecting and exploration of oil and gas accumulations associated with megareservoirs of the sedimentary cover, No 122022800253-3».*

**For citation:** Sidorchuk E.A., Dobrynina S.A. Geodynamic nature of the location of oil and gas fields (on the example of the Stavropol Territory). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14.(2): 179-194. DOI: 10.46698/VNC.2024.90.18.014

### Введение

**Актуальность работы.** Особенности нефтегазонакопления зависят от длительной, многоэтапной эволюции современного осадочного бассейна. Оценка перспектив нефтегазоносности на настоящем этапе нефтегазовой геологии состоит в комплексировании известных технологий на основе обновленной методологии поисков и разведки скоплений углеводородов. Поиск наиболее крупных по величине

нефтегазовых месторождений и геологических факторов, которые могут помочь в решении поставленной задачи, всегда актуален. Одним из определяющих геологических факторов, влияющих на современное размещение скоплений УВ в осадочной толще, следующим из теории тектоники плит, являются геодинамические условия нефтегазоносных территорий.

С точки зрения теории плит типизация осадочного бассейна основана на определении глобальных геодинамических обстановок. Достаточно подробно изучены глобальные геодинамические процессы в известных нефтегазоносных бассейнах [Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция, 2004].

Использование современной методологии прогноза при разработке и совершенствовании технологий поисков, на основе представлений об определяющем влиянии геодинамических процессов на размещение месторождений УВ, проводится российскими исследователями [Голованов и др., 2016; Казанкова и др., 2019]. В Прикаспийской впадине, выявлена взаимосвязь узлов пересечения линейментов, отражающих участки с повышенной проницаемостью, и наиболее крупных месторождений УВ [Miloserdova et al., 2021]. Среди зарубежных исследователей за последнее время можно отметить ряд работ о признании геодинамической природы распределения различных объектов и явлений, как в осадочной толще, так и на поверхности Земли. Казахстанские ученые во главе с Жантаевым Ж. [Zhantayev et al., 2017] построили карты геодинамической активности регионального масштаба, указывающие на линейные структуры для поиска, в том числе месторождений нефти и газа. Коллектив китайских исследователей [Panpan et al., 2019] утверждает о зависимости накопления нефти от позднеолигоценовой тектонической инверсии, имеющей геодинамический механизм, в суббассейне Ляодун. Группа индийских ученых [Subhobroto et al., 2022] использовала геоморфологический анализ для определения сети разломов и геоморфологических максимумов как целей с точки зрения скоплений углеводородов в бассейне Западного Виндхьяна.

### Материалы и методы исследований

С точки зрения административного деления изучаемая территория соответствует границам Ставропольского края. Здесь открыто 65 месторождений УВ по данным государственного баланса полезных ископаемых. В работе использованы исходные геологические данные по 63 месторождениям и отдельным скважинам, включающие характеристики коллектора (пористость, эффективная мощность), площадь распространения коллектора, данные по запасам, добыче УВ и потерям по отдельным залежам и стратиграфическим горизонтам, карты нефтегазоносности, топографические и структурные карты. Исходные данные по двум нефтяным месторождениям Советскому и Курскому не учтены в расчетах. Эти два месторождения находятся по структурно-тектонической позиции в отличных от всех остальных месторождений условиях. Авторами настоящей статьи использованы результаты других исследователей, а также научные публикации, приведенные в списке литературы. На формирование взглядов авторов работы повлияли многочисленные публикации, выполненные по исследуемой теме в нефтегазоперспективных территориях регионов России, Ближнего и Дальнего зарубежья. Для решения поставленных задач выполнено обобщение, анализ, систематизация геологических данных, использован корреляционный анализ, сопоставление результатов расчетов, прове-

дены картографические построения. Для совершенствования технологии поисков наиболее крупных по запасам скоплений УВ и выявления значимых геологических факторов использована методология, основанная на геодинамическом принципе формирования нефтегазоносных бассейнов.

### Результаты работы и их обсуждение

В качестве источника глобальных геодинамических процессов на территории Предкавказья, приводящих к деформациям, рассматривается миграция в субмеридиональном направлении Аравийской литосферной плиты [Милюков и др., 2015, Миронов и др., 2016]. Предполагается, что в результате горизонтальных смещений кавказский сегмент Альпийско-Гималайского подвижного пояса сжимается, слои осадочных и вулканогенных пород сминаются в складки, блоки основания испытывают разнонаправленные смещения, а верхние горизонты коры нарушаются взбросами и надвигами.

С позиции геодинамики Восточное Предкавказье относится к Северо-Кавказскому нефтегазоносному бассейну (НГБ) двухэтажного строения [Клещев и др., 2003], не считая фундамент. Верхний нефтегазоносный юрско-кайнозойский этаж на территории исследования включает Ставропольский суббассейн – внутренней зоны пассивной окраины (MZ-P<sub>2</sub>) Северо-Кавказского палеомикроконтинента, слабдеформированной столкновением с Аравийским палеоконтинентом (P<sub>3</sub>-Q), и Манычский суббассейн с изостазией (J<sub>2</sub>-KZ). Нижний нефтегазоносный доюрский этаж включает суббассейны: Кряжа Карпинского – орогена столкновения Северо-Кавказского и Гурьевского палеомикроконтинентов (PZ<sub>3</sub>) и Манычский – рифтов (P<sub>2</sub>-T<sub>2</sub>) и надрифтовых прогибов (T<sub>3</sub>-J<sub>1</sub>). Этот регион в процессе своей геологической истории пережил ряд эпох нефтегазоаккумуляции и их расформирования.

Изучаемая территория приурочена к зоне сочленения нескольких крупных тектонических элементов: Ставропольского свода, Прикумской системы поднятий и зоны Манычских прогибов. Этаж нефтегазоносности в соответствии со стратиграфической шкалой значителен: от триаса и до неогена. На изучаемой территории по величине запасов УВ нет уникальных и крупных по запасам месторождений в соответствии с утвержденной классификацией запасов полезных ископаемых (Классификация запасов и прогнозных ресурсов, утвержденная приказом № 474 от 01.11.2013 г. Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации). Такая ситуация авторами объясняется особенностями распределения геодинамических напряжений в этом регионе.

На рассматриваемой территории большая часть открытых залежей углеводородов приурочена к верхнему структурному этажу, меньшая часть залежей – к нижнему структурному этажу НГБ.

Нефтегазовые месторождения тяготеют по своему размещению к разломам или, правильнее сказать, зонам деформации осадочного чехла, которые создают определенную морфологию, как внутреннего строения осадочного чехла, так и поверхности. В процессе деформации периодически возникают, исчезают и вновь возникают условия геодинамического растяжения и сжатия, формируются области напряженно-деформированного состояния горных пород. Зоны деформации осадочного чехла могут представлять собой как линейные разломы, зоны повышенной проницаемости, так и сложные структуры, например, типа сбросов с вращением блоков («домино»), по изогнутым поверхностям (листрические сбросы), кольцевые

структуры. Размеры таких участков могут быть от нескольких километров до сотен километров. В соответствии с видом зон деформации создаются распределение и изменение напряжений в осадочном чехле, определяемые его геологической структурой и геодинамическими процессами. К настоящему времени нет однозначного понимания соподчиненности общей (глобальной) и локальной геодинамики, а также природы напряженно-деформированного состояния отдельных объемов горных пород. Авторы статьи определили отдельные объемы с напряженно-деформированным состоянием горных пород, имеющих выраженную морфологию, как локальную геодинамическую обстановку. Самым сложным в применении геодинамического принципа для прогнозирования скоплений УВ с различной величиной запасов является выделение локальных геодинамических обстановок, указывающих на возможное присутствие скоплений УВ. В ландшафте нефтегазоперспективной территории эти участки отличаются условиями увлажнения, характером рельефа, почвами, растительностью, геохимической обстановкой. Такие участки обладают определенными геолого-геофизическими и структурными характеристиками и могут диагностироваться, например, по рисунку гидросети или узлам пересечения линеаментов рельефа.

Ранее авторами было показано, что наиболее информативным признаком, определяющим величину геологических запасов УВ ( $Q_{\text{геол.}}$ ), является эффективный объем ( $V_{\text{эфф.}}$ ), включающий данные коэффициентов пористости, эффективной толщины, площади распространения коллектора и, соответственно, комплексно характеризующий свойства природного резервуара [Сидорчук и др., 2023]. Для изучаемой территории были рассчитаны  $V_{\text{эфф.}}$  по данным 63 месторождений по отдельным залежам и стратиграфическим комплексам. Затем выполнено сопоставление  $Q_{\text{геол.}}$  по месторождениям УВ с соответствующим  $V_{\text{эфф.}}$  коллекторов природных резервуаров в целом по месторождению (рис.1). Анализ сопоставления показал, что в общем облаке точек при высоких значениях  $Q_{\text{геол.}}$  и  $V_{\text{эфф.}}$  выделяются две области. В одной области высоким значениям  $V_{\text{эфф.}}$  соответствуют более низкие  $Q_{\text{геол.}}$ , в другой области – наоборот.

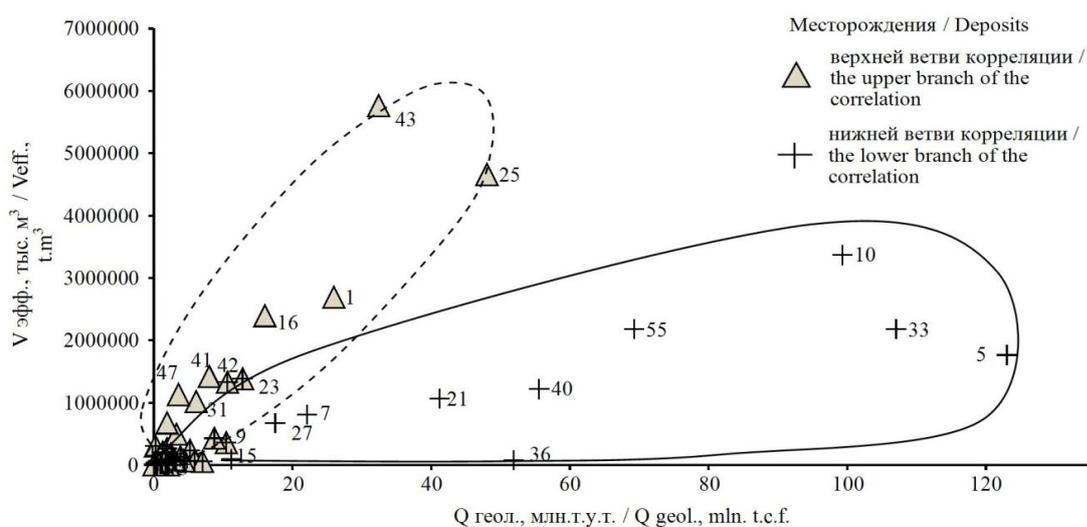


Рис. 1. Сопоставление геологических запасов УВ с эффективным объемом природного резервуара по 63 месторождениям нефти и газа на изучаемой территории (по данным Государственного баланса полезных ископаемых).

Условные обозначения: Месторождения:  
 1 – Ачикулакское; 2 – Байджановское;  
 3 – Бектемировское; 4 – Белозерское; 5 – Величаевско-Колодезное;  
 6 – Владимировское; 7 – Восточно-Безводненское; 8 – Долинное; 9 – Западно-Мектебское;  
 10 – Зимне-Ставкинско-Правобережное; 11 – Камышовое; 12 – Ковыльное; 13 – Култайское;  
 14 – Кум-Тюбинское; 15 – Курган-Амурское; 16 – Лесное; 17 – Мектебское; 18 – Молодежное;  
 19 – Надеждинское; 20 – Нефтекумское; 21 – Озек-Суат; 22 – Плавненское;  
 23 – Подсолнечное; 24 – Полевое; 25 – Прасковейское; 26 – Путиловское;  
 27 – Русский хутор Северный; 28 – Сухановское; 29 – Урожайненское; 30 – Эбелекское;  
 31 – Южно-Острогорское (Южное); 32 – Максимокумское; 33 – Чепаковское;  
 34 – Катериновское; 35 – Восточно-Арзгирское; 36 – Журавское; 37 – Казино-Грачевское;  
 38 – Каменно-Балковское; 39 – Кугутское; 40 – Мирненское; 41 – Петровско-Благодарненское;  
 42 – Расшеватское; 43 – Сенгилеевское; 44 – Такhta-Кугультинское; 45 – Южно-Радыковское;  
 46 – Кармалиновское; 47 – Краевое; 48 – Приграничное; 49 – Совхозное; 50 – Союзное;  
 51 – Андрей-Курган; 52 – Архангельское; 53 – Батырское; 54 – Веселовское;  
 55 – Воробьевское; 56 – Гороховское; 57 – Емельяновское;  
 58 – Зурмутинское; 59 – Кучерлинское; 60 – Маячное; 61 – Северо-Уралское;  
 62 – Южно-Серафимовское; 63 – Восточно-Дьяченковское /

Fig. 1. Comparison of hydrocarbon geological reserves from the effective volume of the natural reservoir for 63 oil and gas fields in the studied area (according to the State Balance of Minerals).

Legends: Deposits:

1 – Achikulakskoye; 2 – Baijanovskoye; 3 – Bektemirovskoye; 4 – Belozerskoye;  
 5 – Velichaevsko-Kolodeznoye; 6 – Vladimirovskoye; 7 – Vostochno-Bezvodnenskoye;  
 8 – Dolinnoye; 9 – Zapadno-Mektebskoye; 10 – Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye;  
 11 – Kamyshevoye; 12 – Kovylnoye; 13 – Kultayskoye; 14 – Kum-Tyubinskoye;  
 15 – Kurgan-Amur; 16 – Lesnoye; 17 – Mektebskoye; 18 – Molodezhnoye; 19 – Nadezhdinsky;  
 20 – Neftekumskoye; 21 – Ozek-Suat; 22 – Plavnskoye; 23 – Sunflower; 24 – Field;  
 25 – Praskoveisky; 26 – Putilovskoye; 27 – Russian farm Severny; 28 – Sukhanovskoye;  
 29 – Urozhodnenskoye; 30 – Ebelekskoye; 31 – Yuzhno-Ostrogorskoye (Yuzhnoye);  
 32 – Maximokumskoye; 33 – Chepakovskoye; 34 – Katerinovskoye; 35 – Vostochno-Arzhirskoye;  
 36 – Zhuravskoye; 37 – Casino-Grachevskoye; 38 – Kamennno-Balkovskoye;  
 39 – Kugutskoye; 40 – Mirnenskoye; 41 – Petrovsko-Blagodarnenskoye;  
 42 – Razshevatkoye; 43 – Sengileevskoye; 44 – Takhta-Kugultinskoye; 45 – Yuzhno-Radykovskoye;  
 46 – Karmalinovskoye; 47 – Kraevoye; 48 – Prigranichnoe; 49 – State Farm;  
 50 – Union; 51 – Andrey-Kurgan; 52 – Arkhangelsk; 53 – Batyrskoye; 54 – Veselovskoye;  
 55 – Vorobyovskoye; 56 – Gorokhovskoye; 57 – Yemelyanovskoye; 58 – Zurmutinskoye;  
 59 – Kucherlinskoye; 60 – Mayachnoye; 61 – Severo-Uralskoye; 62 – Yuzhno-Serafimovskoye;  
 63 – Vostochno-Dyachenkovskoye

Как указывалось выше, на исследуемой территории не открыто в соответствии с существующей классификацией уникальных и крупных по величине запасов месторождений УВ. Из всего облака точек авторы выделили месторождения с Qгеол. более 8 млн т.у.т. Таких месторождений УВ оказалось 19. Для данного региона это месторождения УВ с наиболее крупномасштабными геологическими запасами. Исходя из приведенного сопоставления на рисунке 1, величина в 8 млн т.у.т. отсекает по геологическим характеристикам месторождения УВ, позицию которых можно объяснить доминированием определенных геологических факторов. Остальные месторождения УВ с небольшими запасами по своим данным близки и образуют хаотичное распределение.

На рисунках 2 и 3 показаны сравнительные профили распределения Vэфф. природных резервуаров и Qгеол. по выбранным 19 месторождениям согласно данным Государственного баланса полезных ископаемых на 01.01.2019 г. и на 01.01.2022 г.

Из распределений видно, что данные по месторождениям изменились не сильно. Одна из причин, по всей видимости, – отсутствие проведения геологоразведочных работ на этой территории.

Только на двух Прасковейском и Чапаковском месторождениях произошли изменения  $V_{эфф.}$  и  $Q_{геол.}$ . В результате уточнения геологического строения на Прасковейском месторождении во всех продуктивных залежах ( $Pg_3hd$  хадумские,  $Pg_2km-kr$  кумско-керестинские,  $Pg_2l$  лютетские,  $K_2m$  маастрихтские пл. I, 2, 3, 4) увеличилась площадь продуктивности и эффективная толщина. На Чапаковском месторождении в продуктивных залежах ( $Pg_3hd$  хадумские,  $Pg_2km-kr$  кумско-керестинские,  $Pg_2$  черкесские) увеличилась площадь продуктивности. Эффективная толщина практически не изменилась. В продуктивных отложениях  $Pg_2$  свиты Горячего Ключа произошло наоборот уменьшение площади продуктивности и эффективной толщины.

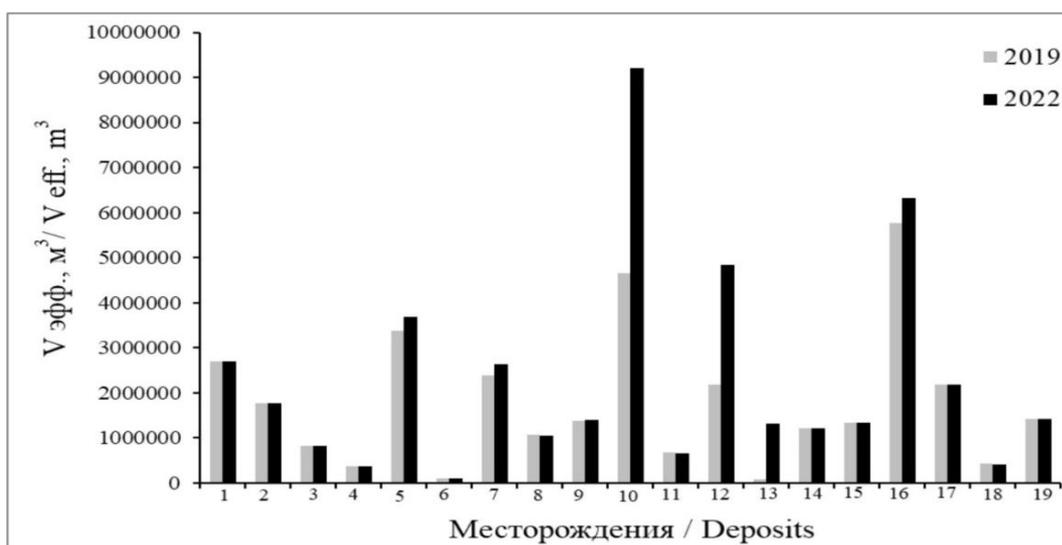


Рис. 2. Сравнительный профиль распределения эффективных объемов коллекторов природных резервуаров месторождений УВ с наиболее масштабными запасами УВ на изучаемой территории по данным государственного баланса полезных ископаемых: серым цветом – на 01.01.2019 г.; черным цветом – на 01.01.2022 г.

Условные обозначения: Месторождения:

- 1 – Ачикулакское; 2 – Величаевско-Колодезное;  
 3 – Восточно-Безводненское; 4 – Западно-Мектебское; 5 – Зимне-Ставкинско-Прибрежное;  
 6 – Курган-Амурское; 7 – Лесное; 8 – Озек-Суат; 9 – Подсолнечное; 10 – Прасковейское;  
 11 – Русский хутор Северный; 12 – Чапаковское; 13 – Журавское; 14 – Мирненское;  
 15 – Расшеватовское; 16 – Тахта-Кугультинское; 17 – Воробьевское; 18 – Урожайненское;  
 19 – Петровско-Благодарненское/

Fig. 2. Comparative profile of the distribution of effective volumes of reservoirs of natural reservoirs of hydrocarbon deposits with the largest reserves of hydrocarbons in the studied territory according to the state balance of minerals: in gray – on 01.01.2019; in black – on 01.01.2022

Legends: Deposits:

- 1 – Achikulakskoye; 2 – Velichaevsko-Kolodeznoye; 3 – Vostochno-Bezvodnenskoye; 4 – Zapadno-Mektebskoye; 5 – Zimne-Stavkinsko – Pravoberezhnoye; 6 – Kurgan-Amur; 7 – Lesnoye;  
 8 – Ozek-Suat; 9 – Sunflower; 10 – Praskoveysky; 11 – Russian farm Severny; 12 – Chepakovskoye;  
 13 – Zhuravskoye; 14 – Mirnenskoye; 15 – Razshevatovskoye; 16 – Takhta-Kugultinskoye;  
 17 – Vorobyovskoye; 18 – Urozhodnenskoye; 19 – Petrovsko-Blagodarnenskoye

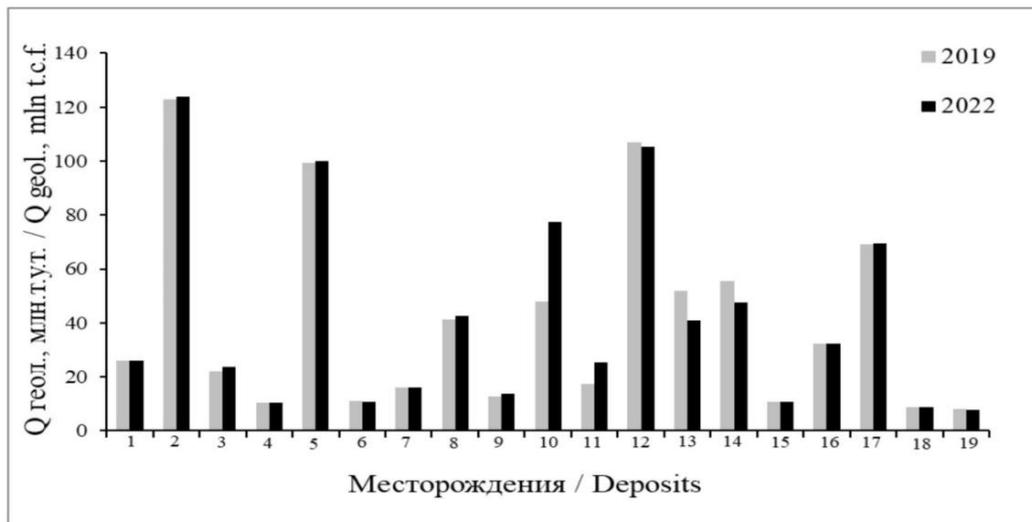


Рис. 3. Сравнительный профиль распределения геологических запасов УВ месторождений нефти и газа с наиболее масштабными запасами на изучаемой территории по данным государственного баланса полезных ископаемых: серым цветом – на 01.01.2019 г.; черным цветом – на 01.01.2022 г. Условные обозначения: смотри рис. 2 /

Fig. 3. Comparative profile of the distribution of geological reserves of hydrocarbon deposits of oil and gas with the largest reserves in the studied territory according to the state balance of minerals: in gray – on 01.01.2019; in black – on 01.01.2022. Legends: see fig. 2

По полученным результатам расчетов выполнены сопоставления между  $Q_{\text{геол.}}$  и  $V_{\text{эфф.}}$  природных резервуаров по наиболее масштабным 19 месторождениям УВ отдельно по данным на 01.01.2019 г. и на 01.01.2022 г. (рис. 4).

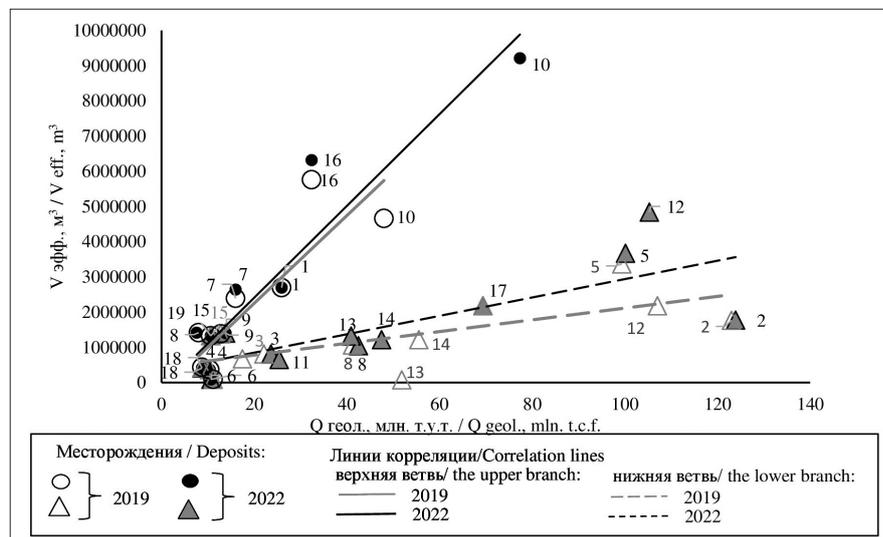


Рис. 4. Сопоставление геологических запасов УВ с эффективным объемом коллекторов по 19 наиболее масштабным нефтегазовым месторождениям изучаемой территории по данным государственного баланса полезных ископаемых на 01.01.2019 г. и 01.01.2022 г. с выделенными линиями корреляции

Условные обозначения: Месторождения: см. рис. 2 /

Fig. 4. Comparison of the geological reserves with the effective volume collectors for the 19 largest oil and gas fields of the studied territory according to the data of the state balance of minerals as of 01.01.2019 and 01.01.2022 with the selected correlation lines  
Legends: see fig. 2

Анализ этих сопоставлений показал, что в обоих случаях, несмотря на изменения в исходных данных, выделяются две области точек. По каждой из этих областей выполнен корреляционный анализ.

По результатам корреляции по данным 2019 г. и 2022 г. выделены верхняя и нижняя ветви, имеющие разные углы наклона к горизонтальной оси. Коэффициенты корреляции по двум ветвям составляют: по верхней ветви по данным на 2019 год – 0.59, на 2022 год – 0.94; по нижней ветви по данным на 2019 год – 0.72, на 2022 год – 0.78. Систематизация результатов корреляции для изучаемой территории подтвердила существование двух типов зависимости Qгеол. от Vэфф. природного резервуара, что отражено двумя ветвями с разными углами наклона к горизонтальной оси. На верхней ветви, с более крутым углом наклона, более высокими значениями Vэфф. соответствуют более низкие Qгеол., на нижней ветви более низким значениям Vэфф. соответствуют более высокие Qгеол.

Обобщение полученных результатов с исследованиями по территории зоны сочленения Западно-Сибирской плиты, Енисей-Хатангского прогиба и Сибирской платформы (Средняя Сибирь) [Сидорчук и др., 2023] показывает следующее. На территории Средней Сибири, где стратиграфический нефтегазоносный диапазон залежей УВ практически на 100% включает меловые отложения, был выявлен один тип зависимости Qгеол. от Vэфф. природного резервуара. Значительное расширение стратиграфического этажа нефтегазоносности на изучаемой территории Восточного Предкавказья приводит к добавлению новой корреляционной ветви зависимости Qгеол. от Vэфф. природного резервуара с другим углом наклона к горизонтальной оси.

Ниже приведена таблица по наиболее масштабным для изучаемой территории 19 нефтегазовым месторождениям с указанием типа флюида, стратиграфического диапазона нефтегазоносности и позиции по корреляционным ветвям.

Таблица 1 / Table 1

**Наиболее масштабные по геологическим запасам месторождения УВ на изучаемой территории с указанием типа флюида, стратиграфического диапазона нефтегазоносности и позиции по корреляционным ветвям /**

**The largest hydrocarbon deposits in terms of geological reserves in the studied area, indicating the type of fluid, the stratigraphic range of oil and gas content and the position of the correlation branches**

№ п/п	Месторождение / Deposit	Тип флюида / Type of fluid	Стратиграфический диапазон нефтегазоносности / Stratigraphic range of petroleum potential	Позиция по корреляционным ветвям / Position by correlation branches
1	Ачикулакское / Achikulakskoe	Нефть / Oil	K-Pg	Верхняя / upper
2	Величаевско-Колодезное / Velichaevsko-Kolodeznoye	Газ-нефть / Gas-oil	T-J-K-Pg	Нижняя / lower
3	Восточно-Безводненское / Vostochno-Bezvodnenskoe	Газ-нефть / Gas-oil	T-J-K	Нижняя / lower

4	Западно-Мектебское / Zapadno- Mektebskoe	Нефть / Oil	K-Pg	Верхняя-нижняя / upper-lower
5	Зимне-Ставкинско- Правобережное / Zimne-Stavkinsko- Pravoberezhnoe	Газ-нефть / Gas-oil	T-J-K-Pg	Нижняя / lower
6	Курган-Амурское / Kurgan-Amurskoe	Нефть / Oil	J-K-Pg	Верхняя-нижняя / upper-lower
7	Лесное / Lesnoye	Нефть / Oil	Pg-N	Верхняя / upper
8	Озек-Суат / Ozek-Suat	Нефть / Oil	J-K-Pg	Нижняя / lower
9	Подсолнечное / Podsolnecnoye	Нефть / Oil	J-K-Pg	Верхняя-нижняя / upper - lower
10	Прасковейское / Praskoveyskoe	Нефть / Oil	K-Pg-N	Верхняя / upper
11	Русский Хутор Северный / Russian Khutor Severny	Нефть-газ- конденсат / Oil- gas- condensate	T-J-K-Pg	Нижняя / lower
12	Чепаковское / Chepakovskoye	Нефть/ Oil	J-K-Pg	Нижняя / lower
13	Журавское / Zhuravskoe	Газ-нефть / Gas-oil	K-Pg-N	Нижняя / lower
14	Мирненское / Mirnenskoe	Газ-конденсат / Gas- condensate	K-Pg N	Нижняя / lower
15	Расшеватское / Rashevatskoye	Газ-конденсат / Gas- condensate	T-J-K-Pg	Верхняя-нижняя / upper-lower
16	Тахта-Кугульгинское / Takhta-Kugultinskoe	Газ/ Gas	Pg-N	Верхняя / upper
17	Воробьевское / Vorobyovskoe	Нефть/ Oil	Pg	Нижняя / lower
18	Урожайненское / Urozhaynenskoye	Газ-нефть/ Gas- oil	T-J-K	Верхняя-нижняя/ upper-lower
19	Петровско- Благодарненское / Petrovsko- Blagodarenskoye	Газ / Gas	Pg-N	Верхняя / upper

Из приведенных графиков на рисунке 4 и таблицы 1 видно, что на нижней ветви наиболее высокие Qгеол. принадлежат месторождениям с наиболее широким интервалом нефтегазоносности. Залежи наиболее масштабных газонефтяных месторождений Величаево-Колодезного и Зимне-Ставкинско-Правобережного приурочены к четырем и более древним стратиграфическим горизонтам – триас-юра-мел-палеоген. Также на наиболее масштабном Чепаковском нефтяном месторождении с нижней ветви корреляции залежи открыты в трех стратиграфических горизонтах – юра-мел-палеоген, в том числе более древней юре. На верхней ветви совсем другая картина. На наиболее масштабных нефтяном Прасковейском и газовом Тахта-Кугульгинском месторождениях залежи открыты в более узком и молодом стратиграфическом диапазоне: соответственно, мел-палеоген-неоген и палеоген.

Исключение составляет Воробьевское нефтяное месторождение с узким стратиграфическим интервалом подтвержденной нефтегазоносности, низким Vэфф. и достаточно масштабными Qгеол. Предположительно, геологическое строение месторождения не доизучено. Месторождения с Qгеол., значения которых около 8 млн т.у.т., трудно разделить по ветвям корреляции, поэтому они входят в выборку рас-

четов как для нижней, так и для верхней ветви корреляции. В целом можно констатировать, что наиболее масштабные месторождения верхней ветви открыты в более узком и молодом стратиграфическом диапазоне. Наиболее масштабные месторождения нижней ветви открыты в наиболее широком стратиграфическом диапазоне с залежами в наиболее древних породах триаса и юры.

Сравнение результатов модельных экспериментов с производными цифровыми картами от топографической карты поверхности (карты крутизны рельефа, направлений падения склонов рельефа, общей плотности линеаментов и т.п.), подтверждает [Ульмасвай и др., 2001], что области с упорядоченным расположением линеаментов указывают на локальное сжатие, а области с неупорядоченным расположением линеаментов – на локальное растяжение. На изучаемой территории анализ и систематизация карты общей плотности линеаментов показали существование областей с упорядоченным и неупорядоченным расположением линеаментов на поверхности изучаемой территории [Ульмасвай и др., 2013]. Сопоставление карты общей плотности линеаментов рельефа поверхности с расположением залежей месторождений УВ в разных стратиграфических комплексах выявило тенденцию приуроченности месторождений в более молодых отложениях (неоген-палеоген) к зонам растяжения, а месторождений глубоких интервалов палеогена-триаса – к зонам сжатия. Наиболее древние (триас-юра) и глубокие залежи месторождений УВ прогнозируются зонами сжатия.

Нефтегазоносность триасовых отложений, согласно [Харченко и др., 2022], связана с вулканоплутоническими центрами триасового времени (СЦТ). Исследования [Туртуков, 1991; Tikhomirov et al., 2004] показали, что триасовый этап развития Восточного Предкавказья характеризовался активной вулканической деятельностью, создавшей своеобразный рельеф триасовой поверхности. В работе [Харченко и др., 2022] указано на существование закономерной связи и приуроченности вулканических построек триасового периода к вероятным глубинным тектоническим нарушениям субширотного и диагонального простирания и к границам различных региональных структур первого порядка. В то же время разрывные нарушения, дешифрируемые на космоснимках регионального плана, отражают направления осей главных нормальных напряжений наибольшего растяжения и в поверхности современного рельефа выделяются линеаментами субширотного-диагонального простирания, что отмечено [Черненко и др., 2022]. Линеаменты ортогонально-субмеридионального направления, которые лучше фиксируются в поверхности современного рельефа геолого-геофизическими методами, отражают участки сжатия. Линеаментные узлы отображают результаты разнонаправленных движений блоков фундамента и образуют участки с повышенной трещиноватостью и наилучшими коллекторскими свойствами [Саидова и др., 2022; Kroeger et al., 2022]. Линеаментные узлы имеют наиболее характерное морфологическое выражение в рельефе поверхности и рассматриваются как локальные геодинамические обстановки.

Авторы выполнили совмещение положения на схеме тектонического районирования известных из [Харченко и др., 2022] геодинамических центров СЦТ и вулканических построек с размещением наиболее масштабных месторождений УВ. На рисунке 5 показана совмещенная схема тектонического районирования [Летавин и др., 1987] с вулканическими постройками триасового времени [Туртуков, 1991; Tikhomirov et al., 2004], центрами СЦТ [Харченко и др., 2022] и наиболее масштабными месторождениями УВ.

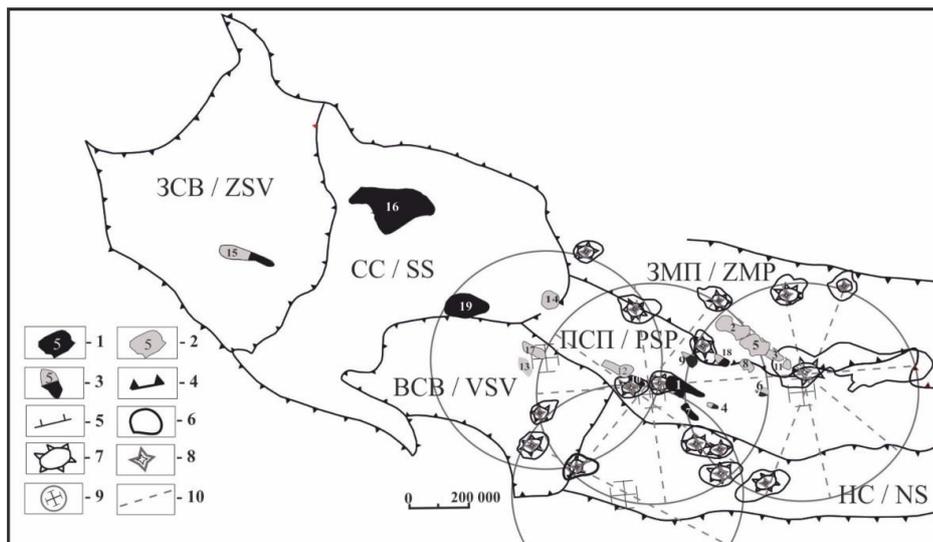


Рис. 5. Совмещенная схема тектонического районирования (по Летавину [1987]) с вулканическими постройками триасового времени, центрами СЦТ и наиболее масштабными месторождениями УВ по ветвям линий корреляции, согласно рис. 4.

Условные обозначения: Месторождения принадлежат к: 1 – верхней ветви; 2 – к нижней ветви; 3 – к верхней и нижней ветвям; Границы тектонических элементов: 4 – 1-го порядка; 5 – 2-го порядка; 6 – локальные поднятия; 7 – прикратерные фации; 8 – жерловые фации; 9 – геодинамические центры СЦТ; 10 – линеаменты.

Тектонические элементы 1-го порядка: ЗСВ – Западно-Ставропольская впадина; СС – Ставропольский свод; ВСВ – Восточно-Ставропольская впадина; ПСП – Прикумская система поднятий; ЗМП – зона Манычских прогибов; НС – Ногайская ступень.

Месторождения: 1 – Ачикулакское; 2 – Величаевско-Колодезное; 3 – Восточно-Безводненское; 4 – Западно-Мектебское; 5 – Зимне-Ставкинско-Прибрежное; 6 – Курган-Амурское; 7 – Лесное; 8 – Озек-Суат; 9 – Подсолнечное; 10 – Прасковейское; 11 – Русский хутор Северный; 12 – Чепакское; 13 – Журавское; 14 – Мирненское; 15 – Расшеватовское; 16 – Тахта-Кугультинское; 17 – Воробьевское; 18 – Урожайненское; 19 – Петровско-Благодарненское /

Fig.5. A combined scheme of tectonic zoning (according to Letavin [1987]) with volcanic structures of the Triassic period, the centers of the SCT and the largest hydrocarbon deposits along the branches of the correlation lines, according to Fig. 4.

Legends: The deposits belong to: 1 – the upper branch; 2 – the lower branch; 3 – the upper and lower branches; Boundaries of tectonic elements: 4 – 1st order; 5 – 2nd order; 6 – local uplifts; 7 – crater facies; 8 – vent facies; 9 – geodynamic centers of the SCT; 10 – lineaments.

Tectonic elements: ZSV – West Stavropol depression; SS – Stavropol dome; VSV – East Stavropol depression; PSP – Prikum uplift system; ZMP – zone of the Manych troughs; NS – Nogai stage.

Deposits: 1 – Achikulakskoye; 2 – Velichaevsko-Kolodeznoye; 3 – Vostochno-Bezvodnenskoye; 4 – Zapadno-Mektebskoye; 5 – Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye; 6 – Kurgan-Amur; 7 – Lesnoye; 8 – Ozek-Suat; 9 – Sunflower; 10 – Praskoveisky; 11 – Russian farm Severny; 12 – Chepakovskoye; 13 – Zhuravskoye; 14 – Mirnenskoye; 15 – Razshevatovskoye; 16 – Takhta-Kugultinskoye; 17 – Vorobyovskoye; 18 – Urozhodnenskoye; 19 – Petrovsko-Blagodarnenskoye

На основе анализа этой совмещенной схемы можно отметить следующее. Группа месторождений на Величаевско-Максимокумском вале (Величаево-Колодезное, Восточно-Безводненское, Зимне-Ставкинско-Правобережное, Русский хутор Северный) как бы «в цепочку» размещена между двумя вулканическими постройками. Один из четырех предполагаемых геодинамических центров СЦТ [Харченко и др., 2022] расположен рядом с одним из месторождений этой «цепочки» Русский хутор Северный. Месторождения на Ачикулакском вале (Прасковейское и Чепакское) по размещению соответствуют двум вулканическим постройкам (Прасковейской и

Ачикулакской) и геодинамическому центру СЦТ, определенному [Харченко и др., 2022]. Месторождения УВ Журавское и Воробьевское, расположенные на границе Журавского поднятия и Спицевского прогиба, по размещению соответствуют геодинамическому центру СЦТ, определенному [Харченко и др., 2022]. Урожайненское, Подсолнечное и Озек-Суатское месторождения, на границе Прикумской системы поднятий и зоны Маньчских прогибов, по своему положению совпадают с расположением Зурмутинской вулканической постройки [Харченко и др., 2022]. Месторождения с узким стратиграфическим диапазоном нефтегазоносности: Курган-Амурское, Западно-Мектебское, Лесное расположены в стороне от геодинамических центров и вулканических построек. Положение Тахта-Кугультинского и Расшеватского месторождений по отношению к геодинамическим центрам СЦТ и вулканическим постройкам триасового времени нет возможности определить из-за отсутствия информации.

### Выводы

Обобщая приведенные выше рассуждения, можно сделать следующие выводы.

1. Результаты корреляции  $Q_{\text{геол.}}$  и  $V_{\text{эфф.}}$  природного резервуара для изучаемой территории выявили существование двух типов зависимости. Авторы настоящего исследования считают выявление двух ветвей с разными углами наклона к горизонтальной оси следствием изменения геодинамических процессов за время геологической истории региона исследований. Нижняя ветвь корреляции включает месторождения с наиболее широким диапазоном нефтегазоносности, включающим более глубокие и древние (триас-юра) залежи. Более глубокие и древние залежи УВ (триас-юра) относятся к нижнему структурному этажу, приуроченному к иному геодинамическому типу осадочного бассейна. Этот вывод впервые сделан для изучаемой территории и связан с расширенным диапазоном нефтегазоносности от триаса до неогена, формировавшимся в разных геодинамических условиях сжатия или растяжения.

2. Характер распределения линеаментов рельефа территории является индикатором геодинамических условий, указывающих на локальную геодинамическую обстановку растяжения или сжатия. Учитывая фактические данные по распределению месторождений по ветвям корреляции (рис. 4), наиболее масштабные месторождения верхней ветви приурочены к зонам растяжения, а часть залежей древних и глубоких (триас-юра) месторождений с нижней ветви – к зонам сжатия.

3. С другой стороны авторы получили хорошее совмещение положения наиболее масштабных месторождений с расположением вулканических построек триасового времени и геодинамическими центрами СЦТ [Харченко и др., 2022] (рис. 5). Вулканические постройки триасового возраста и геодинамические центры СЦТ имеют отражение в распределении линеаментов современного ландшафта и рассматриваются как локальные геодинамические обстановки. Для изучаемого региона прогноз наиболее масштабных месторождений УВ рекомендуется связывать с имеющимися материалами о подобных локальных геодинамических обстановках.

4. Определение характерных для региона локальных геодинамических обстановок – необходимый этап в поисках наиболее масштабных по запасам скоплений УВ. Выявленные авторами закономерности и особенности протекания геодинамических процессов, изучаемые также другими исследователями, подтверждают геодинамическую природу размещения наиболее масштабных месторождений в Восточном Предкавказье.

## Литература

1. Голованов К.С., Харченко В.М., Волошина Т.В., Зенин Д.И. Теоретические основы и технология выявления зон аномально высоких давлений (АВПД) (на примере объектов Азово-Кубанской, Кумо-Манычской впадин и зоны сочленения Прикаспийской впадины и кряжа Карпинского). // *Наука, инновации, технологии*. – 2016. – № 1. – С. 107–120.
2. Казанкова Э.Р., Корнилова Н.В. Формирование залежей углеводородов на больших глубинах с позиций нелинейной геодинамики. // *Сборник научных трудов «Новые идеи в геологии нефти и газа»*. М.: Перо, 2019. – С. 200–204.
3. Клещев К.А., Шеин В.С. Плитотектонические модели нефтегазоносных бассейнов России. // *Геология нефти и газа*. – 2004. – № 1. – С. 24–39.
4. Летавин А.И., Орел В.С., Чернышев С.М. и др. Тектоника и нефтегазоносность Северного Кавказа. М.: Наука, 1987. – 94 с.
5. Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений северного Кавказа по GPS наблюдениям. // *Геотектоника*. – 2015. – № 3. – С. 56–65.
6. Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М. Современные движения Северного Кавказа и Крыма по GPS наблюдениям. // *Тектоника и актуальные вопросы наук о земле: Материалы докладов четвертой тектонофизической всероссийской конференции с международным участием*. М.: ИФЗ РАН, 2016. – Т. 1. – С. 168–170.
7. *Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция: монография / под ред. Леонова Ю.Г., Воложа Ю.А.* М.: Научный мир, 2004. – 526 с.
8. Саидова К.М., Луценко О.О., Черненко К.И., Рыжевский 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.
9. Сидорчук Е.А., Добрынина С.А. Уточнение размещения запасов углеводородов на основе современной геодинамики. // *Socarg Proceedings*. – 2023. – Спецвыпуск 2. – С. 14–20.
10. Туртуков Г.Я. Триасовый вулканизм в Восточном Предкавказье и его влияние на формирование локальных структур. // *Геология нефти и газа*. – 1991. – № 3. – С. 26–28.
11. Ульмасвай Ф.С., Налимова Н.А. Положение месторождений нефти и газа в современном геодинамическом поле северного Сахалина. // *Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа: Материалы пятой международной конференции*. М.: МГУ, 2001. – С. 336–338.
12. 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. – Т. 49. № 2. – С. 60–71.
13. Харченко В.М., Черненко К.И., Еремина Н.В., Самусев Д.Д. Некоторые закономерности формирования и распространения рифогенных построек в триасовых отложениях на территории Восточного Предкавказья в связи с нефтегазоносностью. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. – № 3. – С. 133–145. DOI: 10.46698/VNC. 2022.80.35.009.
14. 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.
15. Kroeger K.F., Bischoff A., Nicol A. Petroleum systems in a buried stratovolcano: Maturation, migration and leakage. // *Marine and Petroleum Geology*. – 2022. – Vol. 141. – pp. 105–682. DOI: 10.1016/j. marpetgeo. 2022.105682.
16. 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. – Vol. 6. – pp. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26.

17. Panpan Hu, Fengli Yang, Lixin Tian, Kui Wu, Wei Wang Stress field modelling of the Late Oligocene tectonic inversion in the Liaodong Bay Subbasin, Bohai Bay Basin (northern China): Implications for geodynamics and petroleum accumulation. // *Journal of Geodynamics*. – 2019. – Vol. 126. – pp. 32–45.

18. Subhobroto Mazumder, Ashish Misra GIS based integration of multi-spectral remotesensing and morphostructural analysis for delineating potential areas of hydrocarbon exploration in Western Vindhyan Basin, India. // *Energy Geoscience*. – 2022. – Vol. 3. – Issue 2. – pp. 191–201.

19. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 381. – pp. 119–142. DOI: 10.1016/j.tecto.2003.10.014.

20. Zhantayev Z., Bibossinov A., Fremd A., Talgarbayeva D., Kikkarina A. Automated lineament analysis to assess the geodynamic activity areas. // *Procedia Computer Science*. – 2017. – Vol. 121. – pp. 699–706.

## References

1. Golovanov K.S., Kharchenko V.M., Voloshina T.V., Zenin D.I. Theoretical foundations and identification technology of zones of abnormally high pressures (for example, objects of the Azov Kuban cavity, the Kumo-Manych cavity and the junction zone of the Caspian cavity and the Karpinski ridge). *Science, Innovations, Technologies*. 2016. No. 1. pp. 107–120. (In Russ.)

2. Kazankova E.R., Kornilova N.V. Formation of hydrocarbon deposits at great depth from the position of nonlinear geodynamics. In: *Proceedings New ideas in the geology of oil and gas*. Moscow. Pero. 2019. pp. 200–204. (In Russ.)

3. Klechev K.A., Shein V.S. Plate-tectonic models of oil and gas basins. *Oil and Gas Geology*. 2004. No 1. pp. 24–39. (In Russ.)

4. Letavin A.I., Oryol V.S., Chernyshev S.M., et al. Tectonics and oil and gas content of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1987. 94 p. (In Russ.)

5. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. *Geotectonics*. 2015. No 3. pp. 56–65. (In Russ.)

6. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblov G.M. Modern Movements of the North Caucasus and Crimea on GPS Observations. *Tectonics and Topical Issues of Earth Sciences. Materials of Reports of the Fourth Tectonophysical All-Russian Conference with International Participation*. Moscow. IPE RAS, 2016. – Vol. 1. pp. 168–170. (In Russ.)

7. *Sedimentary basins: study methods, structure and evolution: monograph* / Eds. Leonov Yu.G., Volozh Yu.A. Moscow. Nauchnyj mir. 2004. 526 p. (In Russ.)

8. Saidova K.M., Lutsenko O.O., Chernenko K.I., Ryzhevsky T.I. Modeling of the fracture network in the volume of natural reservoirs of the Neftekumsky deposits of the Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field based on the field-linear 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.)

9. Sidorchuk E.A., Dobrynina S.A. Refining hydrocarbon reserve location using modern geodynamics. *Socar Proceeding*. 2023. Special Issue No 2. pp. 14–20. (In Russ.)

10. Turtukov G. Ya. Triassic volcanism in the Eastern Precaucasus and its influence on the formation of local structures. *Geology of Oil and Gas*. 1991. No. 3. pp. 26–28. (In Russ.)

11. Ulmasvai F.S., Nalimova N.A. The position of oil and gas fields in the modern geodynamic field of northern Sakhalin. In: *Proc. of the 5th Int. conf. New ideas in geology and geochemistry of oil and gas*. Moscow. MSU. 2001. pp. 336–338. (In Russ.)

12. 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. Vol. 49. No 2. pp. 60–71. (In Russ.)

13. Kharchenko V.M., Chernenko K.I., Yeriomina N.V., Samusev D.D. Some patterns of

formation and distribution of reef buildups in Triassic deposits on the territory of the Eastern Fore-Caucasus in connection with oil-and-gas potential. *Geology and geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No 3. pp. 133–145. DOI: 10.46698/VNC. 2022.80.35.009 (In Russ.)

14. 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. Innovations. Technologies*. 2022. No 3. pp. 29–46. (In Russ.)

15. Kroeger K.F., Bischoff A., Nicol A. Petroleum systems in a buried stratovolcano: Maturation, migration and leakage. *Marine and Petroleum Geology*. 2022. Vol. 141. pp. 105–682. DOI: 10.1016/j. marpetgeo.2022.105682.

16. 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. Vol. 6. pp. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26.

17. Panpan Hu, Fengli Yang, Lixin Tian, Kui Wu, Wei Wang Stress field modelling of the Late Oligocene tectonic inversion in the Liaodong Bay Subbasin, Bohai Bay Basin (northern China): Implications for geodynamics and petroleum accumulation. *Journal of Geodynamics*. 2019. Vol. 126. pp. 32–45.

18. Subhobroto M., Ashish M. GIS based integration of multi-spectral remotesensing and morphostructural analysis for delineating potential areas of hydrocarbon exploration in Western Vindhyan Basin, India. *Energy Geoscience*. 2022. Vol. 3. Issue 2. pp. 191–201.

19. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 381. pp. 119–142. DOI: 10.1016/j.tecto. 2003.10.014.

20. Zhantayev Z., Bibossinov A., Fremd A., Talgarbayeva D., Kikkarina A. Automated lineament analysis to assess the geodynamic activity areas. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 121. pp. 699–706.

УДК 550.832

DOI: 10.46698/VNC.2024.29.28.015

Оригинальная статья

## Анализ зависимости пористости нижнемеловых коллекторов Терско-Сунженской нефтегазоносной области от петрофизических параметров

Т.Б. Эзирбаев<sup>1,2</sup>, С.С.-А. Гацаева<sup>1</sup>, Х.А. Абдулшахидова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Грозненский государственный нефтяной технический университет  
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный,  
пр. Х. Исаева, 100, e-mail: timersno@mail.ru;

<sup>2</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,  
Россия, 364051, г. Грозный, В. Алиева, 21 а

Статья поступила: 15.01.2024, доработана: 24.03.2024, принята к публикации: 25.03.2024

**Резюме: Актуальность работы.** На глубокозалегающие терригенные коллекторы приходится более 50% залежей нефти и газа. Однако данные коллекторы характеризуются высокой глинистостью, низкой пористостью и высокой неоднородностью. Тем не менее, нижнемеловые альб-аптские коллекторы изучаемого района на сегодняшний день являются наиболее перспективными, но требуют более углубленного изучения. Характер распределения глинистых частиц в породах-коллекторах для интерпретатора представляет собой одну из ключевых проблем, ввиду их довольно неоднозначного влияния на качество коллектора. Поэтому содержание в пласте глинистых, алевролитистых частиц усложняет определение и оценку петрофизических параметров продуктивных толщ. Соответственно, анализ типа, содержания и режима распределения глинистости в пласте имеет важное значение для оценки нефтегазоносности пласта. В статье собраны результаты петрофизического анализа кернов из некоторых скважин вскрывших нижнемеловые терригенные отложения Терско-Сунженской нефтегазоносной области (ТСНО). Проведен обзор зависимости пористости пропитыванием от др. петрофизических параметров (глинистости, карбонатности, плотности, суммарной доли глинистого, карбонатного и терригенного веществ) по всей совокупности соответствующих параметров. **Цель исследования.** Получение зависимостей пористости насыщения от карбонатности, алевролитовой фракции и глинистости, для оценки влияния петрофизических параметров на коллекторские свойства терригенных отложений нижнего мела Терско-Сунженской нефтегазоносной зоны. **Методика исследования.** Для установления парных связей между пористостью с одной стороны, и суммарным параметром, учитывающим одновременно характеристики терригенной, карбонатной и глинистой частей породы с другой стороны, использовались результаты лабораторных анализов кернов терригенных меловых отложений, проведенных в разные годы. **Результаты исследования.** Полученные зависимости приведены в табличных и графических видах. Наиболее устойчивые из них могут быть применены для прогнозных расчетов. Установление подобных зависимостей рекомендуется во всех случаях массового отбора керна при бурении, как для прогноза, так и для распознавания и проверки аномальных результатов петрографических параметров. Также полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем при создании трехмерной модели нижнемеловой залежи ТСНО.

**Ключевые слова:** нижний мел, альб-апт, глинистость, алевролитость, плотность, зависимость, пористость.

**Для цитирования:** Эзирбаев Т.Б., Гацаева С.С.-А., Абдулшахидова Х.А. Анализ зависимости пористости нижнемеловых коллекторов Терско-Сунженской нефтегазоносной области от петрофизических параметров. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 194-206. DOI: 10.46698/VNC.2024.29.28.015

DOI: 10.46698/VNC.2024.29.28.015

Original paper

# Analysis of dependence of porosity of Lower Cretaceous reservoirs of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing area on petrophysical parameters

T.B. Ezirbaev<sup>1,2</sup>, S.S-A. Gatsaeva<sup>1</sup>, H.A. Abdulshahidova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, 100 Ave. H.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation, e-mail: timersno@mail.ru;

<sup>2</sup> Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences, 21 a V. Alieva, Grozny 364051, Russian Federation

Received: 15.01.2024, revised: 24.03.2024, accepted: 25.03.2024

**Abstract: Relevance.** Deep terrigenous reservoirs account for more than 50% of oil and gas deposits. However, these reservoirs are characterized by high clay content, low porosity and high heterogeneity. Nevertheless, the Lower Cretaceous Alb-Aptian reservoirs in the studied area are currently the most promising, but require more in-depth study. The nature of clay particles distribution in reservoir rocks is one of the key problems for the interpreter due to their rather ambiguous influence on reservoir quality. Therefore, the content of clayey, siltstone particles in the reservoir complicates the determination and evaluation of petrophysical parameters of productive strata. Accordingly, analysis of the type, content and mode of clay content distribution in the reservoir is important to assess the oil and gas content of the reservoir. The article contains the results of petrophysical analysis of cores from some wells that penetrated the Lower Cretaceous terrigenous sediments of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing area. Dependence of porosity by impregnation on other petrophysical parameters (clay content, carbonateness, density, total fraction of clay, carbonate and terrigenous substances) was reviewed for the whole set of the corresponding parameters. **Purpose of the study.** To obtain dependences of saturation porosity on carbonateness, siltstone fraction and clay content, in order to evaluate the influence of petrophysical parameters on the reservoir properties of terrigenous deposits of the Lower Cretaceous. **Methodology of the study.** The results of laboratory analyses of cores of terrigenous Cretaceous sediments collected during the years of the study were used to establish pairwise relationships between porosity on the one hand, and the total parameter, which simultaneously takes into account the characteristics of terrigenous, carbonate and clay parts of the rock on the other hand. **Results.** The obtained dependences are given in tabular and graphical forms. The most stable of them can be applied for forecast calculations. Establishment of similar dependencies is recommended in all cases of mass core sampling during drilling, both for forecasting and for recognizing and checking anomalous results of petrographic parameters. Also, the results obtained can be used in the future in creating a three-dimensional model of the Lower Cretaceous deposit of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing area.

**Keywords:** Lower Cretaceous, Alb-Apt, clayey, siltstone, density, dependence, porosity.

**For citation:** Ezirbaev T.B., Gatsaeva S.S-A., Abdulshahidova H.A. Analysis of dependence of porosity of Lower Cretaceous reservoirs of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas bearing area on petrophysical parameters. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 195-206. DOI: 10.46698/VNC.2024.29.28.015

## Введение

Большинство из крупнейших нефтяных месторождений мира сосредоточены в терригенных и карбонатных толщах мелового комплекса [Moore, Wade, 2013]. Терригенные коллекторы являются важнейшим источником углеводородов во всем мире, и их петрофизические свойства играют решающую роль в добыче углеводородов.

родов [Mehtar et al., 2022]. Пористость, проницаемость и нефтегазонасыщенность являются важнейшими петрофизическими свойствами пород-коллекторов. Плотные терригенные карбонатные коллекторы обычно обладают пористостью менее 10 % и проницаемостью менее 0,1 мд [Borgomano et al., 2013; Cardona, Santamarina, 2020]. Терригенные нижнемеловые отложения оказались промышленно нефтегазонасыщенными на целом ряде площадей Передовых хребтов Восточного Предкавказья. Залежи нефти в альб-аптских отложениях открыты на площадях Карабулак-Ачалуки, Ахлово, Малгобек-Вознесенская, Хаян-Корт и Старогрозненское. В свете этого большой интерес приобретают сведения о коллекторских свойствах этих отложений вообще и об их межгранулярной пористости в частности.

За годы разработки данных отложений был накоплен довольно большой массив результатов лабораторного определения петрофизических параметров кернов из терригенного мела на площадях, принадлежавших на тот момент объединению «Грознефть». В сводке этих данных на начало 1970 г., содержатся также анализы парных взаимосвязей между пористостью кернов пропитыванием и другими их петрофизическими параметрами [Меркулов и др., 1981].

Результаты анализов кернов включают данные о гранулометрическом составе пород, их карбонатности, пористости (пропитыванием) и, частично, плотности. В тех случаях, когда при отсутствии данных о плотности имелись промежуточные данные расчета пористости пропитыванием, плотность определена по этим данным [Афанасьев и др., 1975].

Одной из актуальных задач прикладных исследований в области изучения месторождений нефти и газа является определение характеристик коллекторов, так как на приток и извлечение флюида из пласта значительное влияние оказывают характеристики коллектора, включая насыщенность, проницаемость и пористость. А пористость и проницаемость в коллекторах, как известно, зависят от различных факторов, таких как плотность и структура породы, литология, диагенез, гранулометрический состав пород и др. [Jassam et al., 2023].

## Методы исследования

При подсчете запасов и проектировании разработки любого месторождения необходимо определить характер связи и зависимости между отдельными параметрами пласта, а иногда и зависимость между несколькими параметрами одновременно. А в частности, зависимость между пористостью и такими петрофизическими параметрами как плотность, карбонатность, терригенность и глинистость [Clyde et al., 2013; Ahmed et al., 2024].

С начала 1970-х годов XX века, которые как раз приходятся на открытие промышленных запасов нефти нижнемеловых отложений Терской и Сунженской антиклинальных зон, был проведен ряд исследований, связанных с определением влияния петрофизических параметров терригенных отложений нижнего мела на коллекторские свойства пород [Дахкильгов, Демушкина, 1982; Демушкина, Шнурман, 1982]. Одним, из которых является исследование по установлению парных связей между петрофизическими параметрами кернов из терригенного нижнего мела скважин объединения «Грознефть». Одним из этих параметров в каждой такой паре была межгранулярная эффективная пористость (пористость пропитыванием или насыщением), представляющая большой интерес для прогнозирования коллекторских свойств пород и подсчета запасов нефти и газа.

Указанные связи устанавливались в виде неоднородных линейных зависимостей между параметрами для различных площадей и различных частей разреза.

В результате экспериментов были получены четкие зависимости между пористостью и плотностью для 22 образцов из 23 рассмотренных выборок. Менее четкими являются зависимости пористости от карбонатности, полученные для 14 из 24 выборок. Что же касается параметров, характеризующих терригенную составляющую породы, таких как содержание глинистых частиц, медианный диаметр терригенных зёрен и коэффициент сортировки последних, то в их парных отношениях с пористостью закономерность практически нигде не отслеживается. Так, например, нечёткие зависимости пористости от содержания глинистых частиц были получены только для 3 выборок из 22 рассмотренных [Смолянинова, 1977].

С учётом предыдущих результатов работы шли по двум направлениям:

Установление множественных связей между пористостью, с одной стороны, и другими петрофизическими параметрами, с другой стороны.

Установление парных связей между пористостью с одной стороны, и суммарным параметром, учитывающим одновременно характеристики терригенной и карбонатной частей породы, с другой стороны.

Для исследования использовались данные лабораторных анализов терригенных меловых кернов из предыдущих исследований, дополненные собранными в последующие годы материалами [Страхов и др., 2009; Хасанов, Эзирбаев, 2009].

Как уже упомянуто выше, в качестве основного параметра была выбрана пористость ( $K_{п}$ , %), производными служили глинистость ( $Pl$ , % к терригенной части породы), карбонатность ( $Ca$ , % ко всей породе), плотность ( $\sigma$ , г/см<sup>3</sup>), медианный диаметр обломочных зёрен ( $Md$ , мм) и коэффициент сортировки последних ( $So$ , величина безразмерная).

Анализ был проведен по следующим видам связей:  $K_{п} = f(Pl, Ca)$ ,  $K_{п} = f(\sigma, Ca)$ ,  $K_{п} = f(\sigma, Pl, Ca)$ ,  $K_{п} = f(Md, So, Ca)$ .

Таким образом, рассмотрению подвергнута зависимость пористости пропитыванием от различных комбинаций петрофизических параметров, характеризующих терригенную часть породы ( $Pl, Md, So$ ), ее карбонатную составляющую ( $Ca$ ), а также всю породу в целом ( $\sigma$ ). Для установления связей путем аппроксимации параметров функции пористости от производных, которые предполагались равновесными из числа результатов лабораторного анализа терригенных меловых кернов, собранных в разные годы исследований, были отобраны те, которые содержали сведения по всем необходимым параметрам.

Аппроксимация исходной совокупности значений параметров линейной неоднородной зависимостью параметра – функции от параметров – производных проводилась по методу наименьших квадратов. При этом вычислялись коэффициенты линейной зависимости (коэффициенты регрессии), а также среднеквадратическое отклонение аппроксимирующей функции [Долгаль и др., 2017; Аббасова, 2021].

### Результаты исследования

Графические изображения двух (производных) зависимостей сделаны в плоскости координат-производных. В этой плоскости нанесены исходные точки, а также изолинии аппроксимирующей плоскости, т.е. линии равных значений расчетной пористости (рис. 1).

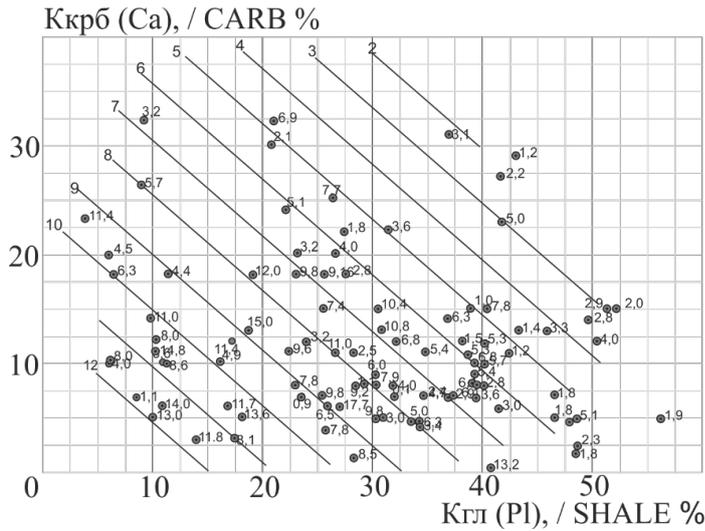


Рис. 1. Обобщенный график зависимости пористости от карбонатности и глинистости нижнемеловых пород / Fig. 1. Generalized graph of porosity dependence on carbonate and clay content of Lower Cretaceous rocks

Также графики зависимостей были построены в мелком масштабе для всех выборок (рис. 2). Наряду с каждым из графиков дополнительно построены гистограммы частоты  $\eta$  отклонений аппроксимации  $\Delta K_{п}$  (%) как показано на рисунке 3. Мелкомасштабный график и гистограмма отклонений наглядно показывают вид двумерной линейной зависимости, распределение исходных данных по величине аргументов, а также частоты интервальных отклонений аппроксимации в исходных точках.

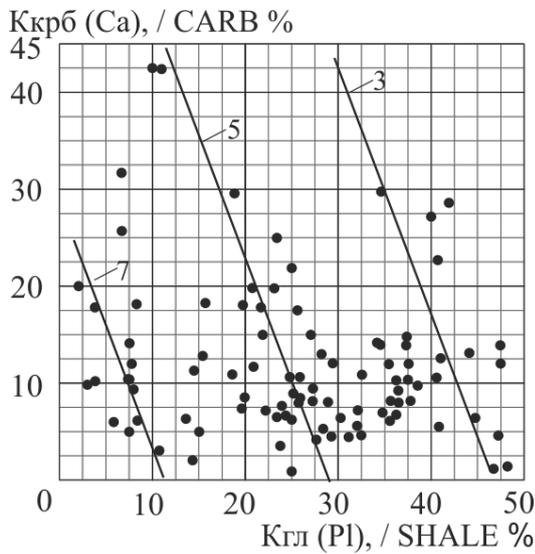


Рис. 2. Зависимость пористости от карбонатности и глинистости меловых пород / Fig. 2. Dependence of porosity on carbonate and clay content of Lower Cretaceous rocks

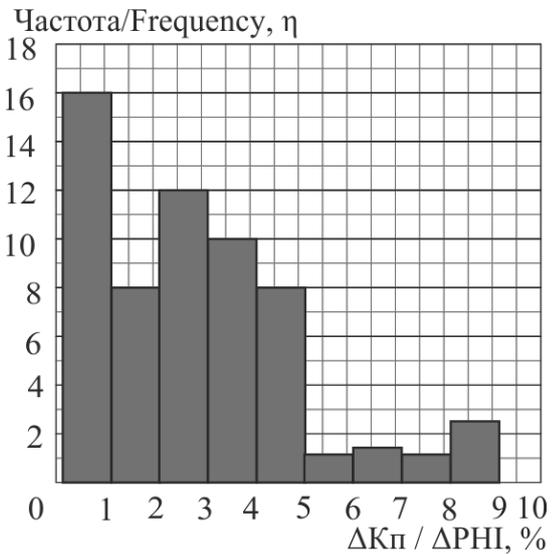


Рис. 3. Частота  $\eta$  отклонений аппроксимации  $\Delta K_{п}$  / Fig. 3. The frequency of the deviations of the approximation of the porosity

Зависимости  $K_{п} = f(Pl, Ca)$  имеют вид  $K_{п} = D_0 + D_{Pl} * Pl + D_{Ca} * Ca$  (см. рис. 1). Расчеты были проведены для 17 выборок с числом точек от 20 до 177. Среднеквадратические отклонения аппроксимации колеблются в пределах 2,3–4,9% пористости.

Коэффициент  $D_{Ca}$  отрицателен для всех выборок, коэффициент  $D_{Pl}$  отрицателен для 14 выборок из 16. Это вполне согласуется с нашими представлениями о том, что эффективная межгранулярная пористость терригенной породы уменьшается при увеличении, как глинистости, так и карбонатности породы. Из двух положительных значений  $D_{Pl}$  одно практически нулевое (+0,006 для пачки апта), второе было получено для альбского яруса (+0,058). Эти результаты считаются малодостоверными и ими можно пренебречь.

Сопоставление с результатами расчета парных связей показывает следующее. Среднеквадратические отклонения парной зависимости пористость-карбонатность колеблются в пределах  $1,6 \div 5,1\%$  пористости (из 24 выборок 17 характеризуются отклонениями более 3%). Для связи пористость-глинистость соответствующие пределы составляют  $2,2 \div 5,9\%$  (из 10 опробованных выборок у семи отклонения более 3%).

Коэффициент  $D_{Pl}$  показывает снижение пористости в процентах, соответствующее каждому проценту прироста глинистости; коэффициент  $D_{Ca}$  имеет такое же значение по отношению к карбонатности. Свободный член ( $D_0$ ) зависимости соответствует расчетной пористости породы, не содержащей ни глинистой, ни карбонатной частей. При использовании полученных зависимостей для прогноза межгранулярной эффективной пористости точность полученных результатов в пределах области изменения исходных аргументов (точность интерполяции) определяется среднеквадратическим отклонением аппроксимации. Линейность зависимостей вдали от области изменения исходных аргументов может привести просто к бессмысленным результатам. Области изменений исходных аргументов каждой выборки хорошо видны на соответствующих графиках рис. 1, 2. Эта сторона графиков представляет, помимо упомянутого, также самостоятельный интерес, давая наглядное представление о группировке кернов выборки по весовому проценту глинистых частиц и карбонатов. В этом отношении графики дают такую же картину как соответствующие треугольные диаграммы, имея, однако, перед последними преимущества большей наглядности и меньшей трудоемкости построения.

Характерной особенностью зависимостей  $K_{II} = f(Pl, Ca)$  различающей их от зависимостей  $K_{II} = f(\sigma, Ca)$ , является равноправие обоих аргументов. Так, коэффициент регрессии при глинистости  $D_{Pl}$  колеблется (по абсолютной величине) в пределах  $0,03-0,21$ , в то время как  $D_{Ca}$  – в пределах  $0,02-0,51$  (пределы изменения обоих аргументов практически одинаковы). Отмечаются, как правило, большие абсолютные значения коэффициентов  $D_{Ca}$  по сравнению с  $D_{Pl}$ , т.е. прослеживается большее влияние карбонатности на пористость, чем на глинистость.

Поведение коэффициента  $D_0$  зависит, в основном, от средних значений пористости для соответствующих выборок.

Так, например, для Кабардино-Балкарских площадей, где пористость пород терригенного нижнего мела более высока, характерны значения  $D_0$   $16 \div 25$ . На Передовых хребтах наблюдаются значения для апта  $13 \div 17$ .

Зависимость  $K_{II} = f(\sigma, Ca)$  имеет вид  $K_{II} = D_0 + D_{\sigma} * \sigma + D_{Ca} * Ca$  (рис. 4). Обработано 16 выборок. Среднеквадратические отклонения аппроксимации колеблются в пределах  $0,6 - 3,4\%$  пористости.

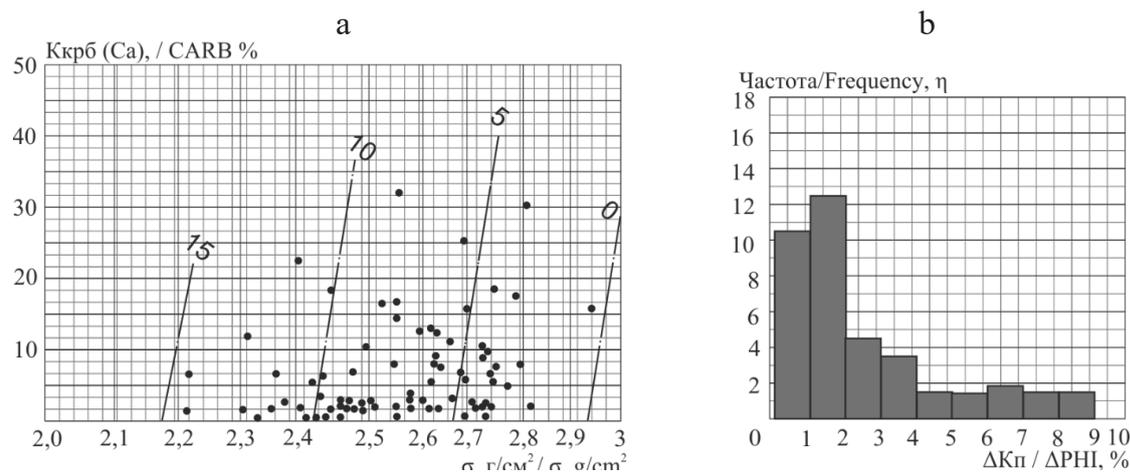


Рис. 4. Зависимость пористости от карбонатности и плотности терригенных пород (а), частота  $\eta$  отклонений аппроксимации  $\Delta$  пористости (б) /

Fig. 4. Dependence of porosity on carbonateness and density of terrigenous rocks (a), the frequency of the deviations of the approximation of the porosity (b)

Наиболее характерной особенностью этих результатов является сильная зависимость пористости от плотности и слабая – от карбонатности. Это видно из того, что абсолютная величина коэффициента при карбонатности  $D_{Ca}$  колеблется в пределах 0,01–0,11% на 1% карбонатности. Поскольку значения карбонатности лежат между 0 и 50%, причем значения более 20–30% редки, вклад карбонатности в колебания аппроксимированного значения пористости составляет всего лишь 0–3%, редко до 5%. Таким образом, этот вклад, как правило, ненамного превышает величину среднеквадратического отклонения. Основную часть колебаний аппроксимированного значения пористости даёт плотность (1,8÷2,9 г/см<sup>3</sup>) благодаря большим по абсолютной величине значениям соответствующего коэффициента регрессии – 9÷39% на 1 г/см<sup>3</sup> плотности.

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что для 12 выборок из 16 коэффициент  $D_{Ca}$  отрицателен, что вполне согласуется с нашими представлениями об уменьшении пористости терригенных пород с увеличением их карбонатности. Из четырех положительных значений  $D_{Ca}$  – одно практически нулевое (+ 0,007 для IV пачки апта Карабулака-Ачалуков), два (+0,052 и +0,025) представляют аптские отложения Терской антиклинальной зоны. Указанное обстоятельство показывает, что коэффициент при карбонатности  $D_k$  несмотря на малые абсолютные значения вносит все же дополнительное уточнение в зависимость.

В отклонении коэффициента при плотности  $D_\sigma$  необходимо отметить, что он отрицателен для всех выборок, в полном соответствии с известной парной связью  $K_{II}(\sigma)$ .

Среднеквадратические отклонения зависимости  $K_{II}(Ca)$  колеблются в пределах 1,6÷5,1% пористости; большинство выборок характеризуются отклонениями более 3%. Для сравнения отметим, что среднеквадратические отклонения зависимости  $K_{II}=f(\sigma, Ca)$  колеблются в пределах 0,6÷3,4% пористости и из 16 выборок только две характеризуются отклонениями более 3%. Таким образом, по отношению к парной связи  $K_{II}(Ca)$  имеется заметное снижение среднеквадратических отклонений. Это вполне естественно, поскольку зависимости между  $K_{II}$  и  $\sigma$  гораздо чётче, чем между  $K_{II}$  и  $Ca$  [Попков, Попков, 2023; Шнурман, 2005].

По сравнению со связью  $K_{п} = f(P_l, C_a)$  среднеквадратические отклонения зависимостей  $K_{п} = f(\sigma, C_a)$  существенно ниже.

Сохраняют силу и замечания относительно зависимости точности коэффициентов регрессии от объемов выборок, равно, как и о необходимости повторной проверки анализов с аномально большими отклонениями от аппроксимирующей зависимости.

Однако нужно отметить, что полезность зависимостей  $K_{п} = f(\sigma, C_a)$  для прогнозирования эффективной межгранулярной пористости, видимо, меньше, чем соответствующих зависимостей  $K_{п} = f(P_l, C_a)$ , хотя, как уже было сказано, среднеквадратические отклонения для первых существенно ниже, чем для последних. Дело в том, что плотность пород – неудобный исходный параметр для прогнозирования пористости.

На сегодняшний день нет ни у кого сомнений в том, что пористость альб-аптских отложений нижнего мела ТСНО зависит от терригенной составляющей породы и, главным образом, от содержания глинистых частиц. А полученный ранее отрицательный результат как отсутствие явных зависимостей является следствием того что данные взаимосвязи параметров имеют более сложный характер, вследствие чего при сопоставлении друг с другом только двух из них, например, только пористости и глинистости или только пористости и плотности, закономерность не видна.

В связи с этим в последующие годы были проведены исследования по установлению зависимости пористости от параметров, характеризующих терригенную часть породы, и, в первую очередь, от содержания глинистых частиц (рис. 5).

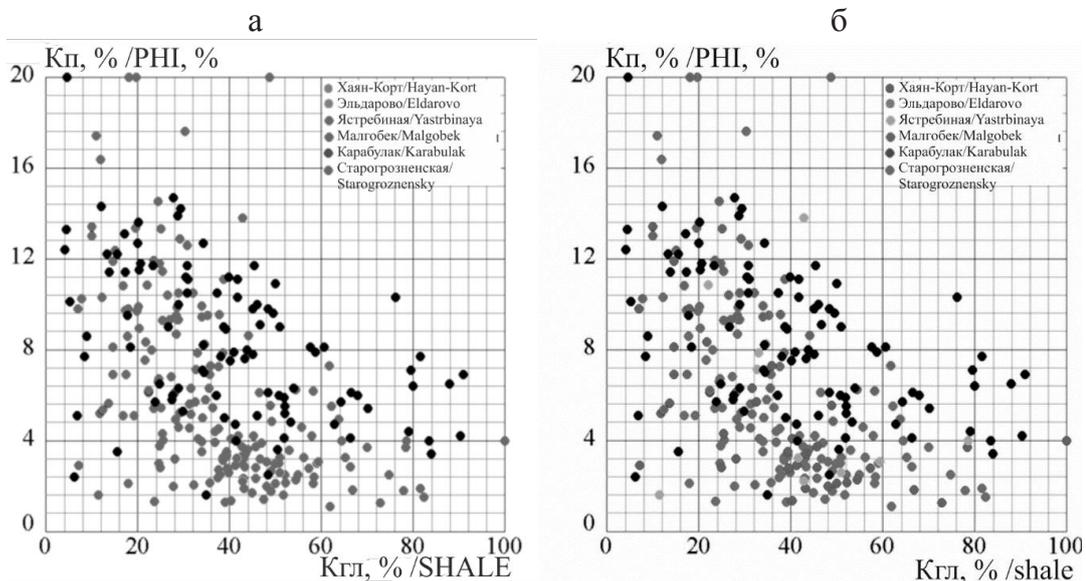


Рис. 5. Зависимость пористости пород от содержания:

(а) алевритовой фракции, (б) глинистой фракции /

Fig. 5. Porosity dependence with the content of: (a) silty fraction, (b) clay fraction

Как видно, на графиках наблюдается значительный разброс точек, свидетельствующий о том, что разрез альб-аптских отложений характеризуется существенной изменчивостью по пористости, алевритистости и глинистости. Наблюдается тенденция снижения пористости с ростом глинистости. Однако при одной и той

же величине глинистости или алевроитистости пористость породы изменяется от минимальных величин порядка  $K_{n,мин} = 2-3 \%$  до максимальных значений, уровень которых не зависит от алевроитистости, но контролируется величиной глинистости и уменьшается с ее ростом. Проницаемость пород в подавляющем большинстве случаев не превышает 1 мд и в редких случаях доходит до 20 мд [Хасанов, Эзирбаев, 2009].

### Выводы

В результате проведенных работ сводка результатов петрофизического анализа кернов из терригенных пород нижнего мела на некоторых месторождениях Терско-Сунженской нефтегазоносной области дополнена новыми материалами. Для всей совокупности данных установлен ряд связей пористости пропитыванием, характеризующей эффективную межгранулярную пористость, с другими петрофизическими параметрами и глубиной залегания. Эти связи получены аппроксимацией исходных данных неоднородными линейными зависимостями методом наименьших квадратов [Шнурман, 2003; Шнурман, 2005]. Получены зависимости пористости пропитыванием от весовой глинистости и карбонатности  $K_{п} = f(PI, Ca)$  для ряда выборок по различным площадям и терригенным отложениям нижнего мела. Эти зависимости по среднеквадратическим отклонениям не хуже парных зависимостей пористости от карбонатности и глинистости.

Получены также зависимости пористости пропитыванием от плотности породы и ее карбонатности  $K_{п} = f(\sigma, Ca)$ .

В отличие от предыдущего вида зависимостей здесь оба аргумента неравноправны – основным из них является плотность. Карбонатность вносит хотя и закономерный, но незначительный вклад в расчетные значения пористости. Причина такого различия между перечисленными двумя видами зависимостей, по-видимому, в том, что глинистость и карбонатность характеризуют различные компоненты породы и поэтому выступают как равноправные аргументы зависимости, в то время как плотность, зависящая от всей породы в целом, характеризует так же и ее карбонатную часть. Вследствие этого данные о карбонатности в зависимости  $K_{п} = f(\sigma, Ca)$  получают подчинённое значение.

Из двух полученных связей  $K_{п} = f(\sigma, Ca)$  характеризуется меньшими среднеквадратическими отклонениями аппроксимации и, следовательно, большей точностью прогноза. В то же время зависимость  $K_{п} = f(PI, Ca)$  представляет больший интерес для прогнозов, поскольку глинистость является более удобным параметром для этой цели, чем плотность.

Расчет этих двух видов зависимостей целесообразен во всех случаях, когда на ограниченных площадях и в сравнительно литологически одинаковых интервалах разреза имеется достаточно большое число анализов керна. Помимо прямого результата такая обработка данных позволяет быстро обнаружить аномальные результаты анализов по их высоким отклонениям от аппроксимирующей зависимости. Повторная проверка таких анализов укажет либо на какое-то литологическое отличие образца от остальных, либо на ошибку, допущенную при анализе.

И в заключение нужно сказать, что новизна работы заключается в том, что практически все результаты исследований нижнемеловых коллекторов изучаемого района были проведены на заре внедрения машинной обработки данных ГИС, а то и раньше – вручную. На сегодняшний день, имея на руках необходимые геолого-гео-

физические материалы и результаты лабораторного анализа кернов, авторы имеют возможность произвести обработку этих данных на автоматизированных системах посредством современного программного обеспечения [Эзирбаев, 2021]; некоторые из полученных таким образом результатов приведены на рисунке 4.

### Литература

1. Аббасова Г.Г. Исследование петрофизических свойств нижнего мела в Хизинской зоне Азербайджана. // Недропользование. – 2021. – Т. 21. № 4. – С. 152–155. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.4.1.
2. Афанасьев В.С., Шнурман Г.А, Терентьев В.Ю. Методика оценки пористости и компонентного состава песчано-алеврито-глинистых пород по промыслово-геофизическим данным. // Нефтепромысловая геофизика. – 1975. – Вып. 5. – С. 88–94.
3. Дахкильгов Т.Д., Демушкина Н.В. Петрофизическое обоснование методов интерпретации данных геофизических исследований месторождений ЧИАССР. // Нефтегазовая геология и геофизика. – 1982. – № 12. – С.20–22.
4. Демушкина Н.В., Шнурман Г.А. Обоснование типа коллектора альб-аптских отложений Чечено-Ингушетии по данным ГИС. // Нефтегазовая геология и геофизика. – 1982. – № 12. – С. 25–25.
5. Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В., Рашидов В.А., Христенко Л.А. Практическое применение истокообразной аппроксимации геолого-геофизических данных. // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 29–37.
6. Меркулов А.В., Смольянинова К.И., Енгибаров В.Н. Тип коллектора аптских отложений месторождений ЧИАССР. // Геология нефти и газа. – 1981. – № 9. – С. 37–70.
7. Попков В.И. Попков И.В. О сохранении поровых коллекторов в нижней части разреза нефтегазоносных отложений триаса Скифско-Туранской платформы. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 106–117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009.
8. Страхов В.Н., Керимов И.А., Степанова И.Э. Разработка теории и компьютерной технологии построения линейных аналитических аппроксимаций гравитационных и магнитных полей (монография). М.: ИФЗ РАН, – 2009. 254 с.
9. Смольянинова К.И. Коллекторские особенности пород нижнего мела Терско-Сунженского нефтеносного района на глубинах свыше 3000 м. // Изучение коллекторов нефти и газа, залегающих на больших глубинах. – 1977. – Вып. 124. – С. 130–132.
10. Хасанов М.А., Эзирбаев Т.Б. Петрофизические характеристики терригенных нижнемеловых продуктивных коллекторов Терско-Сунженской нефтегазоносной области как основа интерпретации данных ГИС. // Каротажник. – 2009.– № 8. Вып. 185. – С. 3–9.
11. Шнурман И.Г. Изучение терригенных коллекторов Предкавказья по результатам геофизических исследований скважин (монография). Кдр.: Просвещение-Юг, – 2003. 397 с.
12. Шнурман И.Г. Петрофизические и интерпретационные модели геофизических методов исследования скважин для оценки фильтрационно-емкостных свойств и насыщенности сложно построенных терригенных коллекторов Предкавказья. / Автореф. дисс. д-ра геол.-минерал. наук. – Кдр., 2005. 48 с.
13. Эзирбаев Т.Б. Обзор технологий комплексной обработки переинтерпретации данных геофизических исследований скважин для детального расчленения разреза и переоценки запасов углеводородов. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 118–136. DOI: 10.46698/VNC.2021.40.15.009.
14. Ahmed N., Weibull W.W., Grana D., Bhakta T. Constrained non-linear AVO inversion for dynamic reservoir changes estimation from time-lapse seismic data. // Geophysics. – 2024. – Vol. 89. Issue 1. – pp. 1–15. DOI:10.1190/geo2022-0750.1.
15. Borgomano J., Masse J.-P., Fenerci-Masse M. and Fournier F. Petrophysics of lower cretaceous platform carbonate outcrops in provence (se france): implications for carbonate reservoir characterization. // Journal of Petroleum Geology. – 2013. – Vol. 36. Issue 1. – pp. 5–42.

16. Cardona A., Santamarina J.C. Carbonate rocks: Matrix permeability estimation. // AAPG Bulletin. – 2020. – Vol. 104. No. 1. – pp. 131–144. DOI: 10.1306/05021917345.

17. Clyde H. Moore, William J. Wade. The Nature and Classification of Carbonate Porosity. // Developments in Sedimentology. – 2013. – Vol. 67. – pp. 51–65. DOI: 10.1016/B978-0-444-53831-4.00004-5.

18. Jassam Safiyya, Al-Fatlawi Omar, Celal Hakan Canbaz. Petrophysical Analysis Based on Well Logging Data for Tight Carbonate Reservoir: The SADI Formation Case in Halfaya Oil Field. // Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 24. No. 3. – pp. 55–68.

19. Mehar M., Ramezanzadeh A., Bajolvand M., Hajsaeedi M.R. Estimating shear wave velocity in carbonate reservoirs from petrophysical logs using intelligent algorithms. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 212. – pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110254.

20. Moore C.H., Wade W.J. The nature and classification of carbonate porosity. // Developments in sedimentology. – 2013. – Vol. 67. – pp. 51–65. DOI: 10.1016/B978-0-444-53831-4.00004-5.

## References

1. Abbasova G.G. Study of the petrophysical properties of the Lower Cretaceous in the Khizi zone of Azerbaijan. Nedropolzovanie. 2021. Vol. 21. No. 4. pp. 152–155. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.4.1. (In Russ.)

2. Afanasyev V.S., Shnurman G.A., Terentyev V.Yu. Methodology for estimation of porosity and component composition of sandy silty-clayey rocks from field geophysical data. Oilfield geophysics. 1975. Issue 5. pp. 88–94. (In Russ.)

3. Dakhkilgov T.D., Demushkina N.V. Petrophysical substantiation of methods of interpretation of geophysical survey data of ChIASSR fields. Oil and Gas Geology and Geophysics. 1982. No. 12. pp.20–22. (In Russ.)

4. Demushkina N.V., Shnurman G.A. Justification of the reservoir type of the Alb-Aptian deposits of Chechen-Ingushetia according to well logging data. Oil and Gas Geology and Geophysics. 1982. No. 12. pp. 25–25. (In Russ.)

5. Dolgal A.S., Kostitsyn V.I., Novikova P.N., Pugin A.V., Rashidov V.A., Khristenko L.A. Practical application of source approximation of geological and geophysical data. Geophysics. 2017. № 5. pp. 29–37. (In Russ.)

6. Merkulov A.V., Smolyaninova K.I., Engibarov V.N. Reservoir type of Aptian deposits of ChIASSR deposits. Oil and Gas Geology. 1981. No. 9. pp. 37–70. (In Russ.)

7. Popkov V.I., Popkov I.V. On the preservation of pore reservoirs in the lower part of the section of oil and gas bearing deposits of the Triassic Scythian-Turanian platform. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 106–117. DOI: 10.46698/VNK.2023.10.85.009. (In Russ.)

8. Strakhov V.N., Kerimov I.A., Stepanova I.E. Development of the theory and computer technology of construction of linear analytical approximations of gravitational and magnetic fields. Moscow. IPE RAS. 2009. 254 p. (In Russ.)

9. Smolyaninova K.I. Reservoir features of Lower Cretaceous rocks of the Tersko-Sunzhensky oil-bearing region at depths exceeding 3000m. Study of oil and gas reservoirs occurring at great depths. 1977. Issue 124. pp. 130–132 (In Russ.)

10. Khasanov M.A., Ezirbaev T.B. Petrophysical characteristics of terrigenous Lower Cretaceous productive reservoirs of the Tersko-Sunzhenskaya oil-and-gas bearing area as a basis for interpretation of GIS data. Logger. 2009. No. Issue 185. pp. 3–9. (In Russ.)

11. Shnurman I.G. Study of terrigenous reservoirs of the Ciscaucasia on the results of geophysical studies of wells. Krasnodar. Prosveshcheniye-Yug. 2003. 397 p. (In Russ.)

12. Shnurman I.G. Petrophysical and interpretation models of geophysical well logging methods for estimation of filtration-capacity properties and saturation of complexly constructed

terrigenous reservoirs of the Ciscaucasia. Author's abstract of the dissertation ... Dr. of geol.-mineral. sciences. Krasnodar. 2005. 48 p. (In Russ.)

13. Ezirbaev T.B. Review of technologies of complex processing of re-interpretation of geophysical well survey data for detailed sectional delineation and hydrocarbon reserves reassessment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 118–136. DOI: 10.46698/VNC.2021.40.15.009. (In Russ.)

14. Ahmed N., Weibull W.W., Grana D., Bhakta T. Constrained non-linear AVO inversion for dynamic reservoir changes estimation from time-lapse seismic data. *Geophysics*. 2024. Vol. 89. Issue 1. pp. 1–15. DOI:10.1190/geo2022-0750.1.

15. Borgomano J., Masse J.-P., Fenerci-Masse M. and Fournier F. Petrophysics of lower cretaceous platform carbonate outcrops in provence (se france): implications for carbonate reservoir characterization. *Journal of Petroleum Geology*. 2013. Vol. 36. Issue 1. pp. 5–42.

16. Cardona A., Santamarina J.C. Carbonate rocks: Matrix permeability estimation. *AAPG Bulletin*. 2020. Vol. 104. No. 1. pp. 131–144. DOI: 10.1306/05021917345.

17. Clyde H. Moore, William J. Wade. The Nature and Classification of Carbonate Porosity. *Developments in Sedimentology*. 2013. Vol. 67. pp. 51–65. DOI: 10.1016/B978-0-444-53831-4.00004-5.

18. Jassam S., Al-Fatlawi O., Celal H.C. Petrophysical Analysis Based on Well Logging Data for Tight Carbonate Reservoir: The SADI Formation Case in Halfaya Oil Field. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2023. Vol. 24. No. 3. pp. 55–68.

19. Mehar M., Ramezanzadeh A., Bajolvand M., Hajsaeedi M.R. Estimating shear wave velocity in carbonate reservoirs from petrophysical logs using intelligent algorithms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 212. pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110254.

20. Moore C.H., Wade W.J. The nature and classification of carbonate porosity. *Developments in sedimentology*. 2013. Vol. 67. pp. 51–65. DOI: 10.1016/B978-0-444-53831-4.00004-5.

УДК 911.3:312

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.61.016

Оригинальная статья

## Состояние окружающей среды и ожидаемая продолжительность жизни населения России: тенденции и перспективы

**А.Д. Бадов** <sup>1</sup>, **О.А. Бадов** <sup>1</sup>, **Л.Х. Дзахова** <sup>2</sup>, **Д.Б. Бязрова** <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский федеральный университет,  
Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина 1,  
e-mail: badov@list.ru;

<sup>2</sup> Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова,  
Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина 44-46

Статья поступила: 26.02.2024, доработана: 14.03.2024, принята к публикации: 15.03.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Географические исследования ожидаемой продолжительности жизни (ОПЖ) являются весьма актуальными, поскольку затрагивают многие аспекты жизнедеятельности человека. Особенно они актуальны для России настоящего времени, поскольку страна до сих пор существенно отстает от ведущих государств по этому важнейшему показателю; наблюдается существенное различие в ОПЖ мужчин и женщин. **Цель исследования.** Выявить пространственно-временные особенности показателей ОПЖ и их зависимость от состояния окружающей среды на полимасштабном уровне в пределах РФ. **Методы исследования.** В ходе работы были применены следующие методы исследований: сравнительно-географический, пространственного анализа, полимасштабный, статистический, математический и др. **Результаты исследования.** Были проведены исследования динамики ожидаемой продолжительности жизни (ОПЖ), выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за 2005–2020 гг. и их пространственной дифференциации в 2020 г. в России и её регионах. Установлено, что в пределах России до 2018 г. наблюдался существенный рост ОПЖ, который затем, в связи с распространением коронавирусной инфекции, стал снижаться. В пределах Северного Кавказа также наблюдались существенные территориальные различия, где высокие показатели ОПЖ отмечались в Ингушетии, Чечне и Дагестане и сравнительно низкие – в Ставропольском крае. Отмечается, что в крае сравнительно высокие показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а в вышеозначенных республиках – низкие. Анализ тенденций развития населения России за 2005–2020 гг. показывает, что при условии преодоления негативных тенденций в демографическом развитии страны, в дальнейшем ОПЖ может достичь лучших мировых показателей уже в 2028–2030 гг.

**Ключевые слова:** ожидаемая продолжительность жизни, динамика, население, регионы, география, экология, выбросы, загрязнение атмосферы.

**Для цитирования:** Бадов А.Д., Бадов О.А., Дзахова Л.Х., Бязрова Д.Б. Состояние окружающей среды и ожидаемая продолжительность жизни населения России: тенденции и перспективы. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 207–218. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.61.016

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.61.016

Original paper

# Environmental conditions and life expectancy of the Russian population: trends and prospects

A.D. Badov <sup>1</sup>, O.A. Badov <sup>1</sup>, L.H. Dzakhova <sup>2</sup>, D.B. Byazrova <sup>2</sup>

<sup>1</sup> North Caucasus Federal University, 1 Pushkin Str., Stavropol 355017, Russian Federation, e-mail: badov@list.ru;

<sup>2</sup> North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, 44-46 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation

Received: 26.02.2024, revised: 14.03.2024, accepted: 15.03.2024

**Abstract: Relevance.** Geographic studies of life expectancy are very relevant, since they affect many aspects of human life. They are especially relevant for Russia at the present time, since country still lags behind leading countries significantly in this most important indicator; there is a significant difference in the life expectancy of men and women. **Aim.** To identify spatiotemporal features of life expectancy indicators and their dependence on the state of the environment at a multi-scale level within the Russian Federation. **Methods.** In the course of the work, the following research methods were used: comparative geographical, spatial analysis, multi-scale, statistical, mathematical, etc. **Results.** Studies were carried out on the dynamics of life expectancy, pollutants emission into the atmosphere for 2005–2020 and their spatial differentiation in 2020 in Russia and its regions. It has been established that within Russia until 2018 there was a significant increase in life expectancy which then due to the spread of coronavirus infection began to decline. The influence level of the environment state on life expectancy has been determined. A significant territorial differentiation of life expectancy indicators in Russia was revealed. Within the North Caucasus, significant territorial differences were also observed, with high life expectancy rates observed in Ingushetia, Chechnya and Dagestan and relatively low ones in the Stavropol Krai. It is worth mentioning that in the Stavropol Krai there are relatively high rates of pollutants emission into the atmosphere, and in the above-mentioned republics it is low. Trend analysis of life expectancy of the Russian population for 2005–2020 shows that provided that negative trends in the country's demographic development are overcome, life expectancy should continue to grow and reach the best global indicators in 2028–2030.

**Keywords:** life expectancy, dynamics, population, regions, geography, ecology, emissions, air pollution.

**For citation:** Badov A.D., Badov O.A., Dzakhova L.H., Byazrova D.B. Environmental conditions and life expectancy of the Russian population: trends and prospects. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 207-218. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.61.016

## Введение

Географические исследования ожидаемой продолжительности жизни являются весьма актуальными, поскольку затрагивают многие аспекты жизнедеятельности человека. Особенно они актуальны для России настоящего времени, поскольку наша страна до сих пор существенно отстает от ведущих государств по этому важнейшему показателю; наблюдается существенное различие в ОПЖ мужчин и женщин. Период 2005–2020 гг. – время прихода и первый период функционирования

новой власти, её попыток оптимизировать демографическую ситуацию в стране, в том числе меры по увеличению ожидаемой продолжительности жизни. Период разработки и функционирования программы «Демография». Отрезок с 2018 по 2020 гг. совпал, прежде всего, с жесточайшим экономическим кризисом во всем мире, и в России, в частности, а с 2020 г. – фактором ковида.

Естественно, что на ожидаемую продолжительность жизни оказывают влияние многие факторы, среди которых можно выделить: природные условия, экологическая обстановка, образ жизни населения, качество здравоохранения, питание, качество воды, состав почв и многие другие.

В настоящей статье исследуется влияние загрязнения атмосферного воздуха на ожидаемую продолжительность жизни (ОПЖ).

**Цель исследования.** Выявить пространственно-временные особенности показателей ОПЖ и их зависимость от состояния окружающей среды на полимасштабном уровне в пределах РФ.

### Материал и методы исследования

ОПЖ людей является важнейшим интегральным демографическим показателем, обозначающим в среднем число лет предстоящей жизни человека. ОПЖ рассчитывается исходя из предположения, что уровни смертности населения останутся такими же, как и в рассматриваемом году (Методика расчета показателя «Ожидаемая продолжительность жизни при рождении» за отчетный период (прошедший год). Приложение N 7 к постановлению Правительства Российской Федерации от 17 июля 2019 г. N 915). Продолжительность, как правило, рассчитывается на только что родившихся детей (0 лет), но может быть рассчитана и для любого возраста. В то же время уровень смертности и в мировом, и в региональном масштабах постоянно снижается (без учета войн, эпидемий, экономических кризисов, которые случаются в том или ином месте). ОПЖ является одним из ключевых показателей, по которому определяется индекс человеческого развития или интегральный показатель, определяющий, в целом, прогресс человечества (здоровье, доходы и образование населения).

В подавляющем большинстве методических и методологических указаний (Методика расчета показателя «Ожидаемая продолжительность жизни при рождении» за отчетный период (прошедший год). Приложение N 7 к постановлению Правительства Российской Федерации от 17 июля 2019 г. N 915) по исследованию демографических явлений, указывается, что при исчислении динамики, расчет производится за равные промежутки времени – 3-5-10 лет. В нашем случае, наиболее удобным и объективным является период в пять лет. Кроме того, в разработках Росстата превалирует именно пятилетний период. Перенос расчетов на 2021–2022 гг. привел бы к многочисленным методическим ошибкам и, как следствие, ухудшению качества настоящего исследования.

В ходе работы были применены следующие методы исследований: сравнительно-географический, пространственного анализа, полимасштабный, статистический, математический и др.

Полимасштабный анализ ожидаемой продолжительности жизни предполагает исследования данного явления в различных масштабах от общемирового уровня, до страноведческого и далее, до регионального в рамках одной страны. Предполагается также исследование в рамках одного региона в районном разрезе. Такие

исследования позволяют выявить место того или иного региона (района) в общегосударственном и даже общемировом масштабе, выявить его положительные или отрицательные черты и определить пути дальнейшего развития, используя общемировой и локальный опыт. Подобные исследования приобретают всё большую популярность среди географов и становятся общемировым трендом.

Исследования влияния состояния окружающей среды на ожидаемую продолжительность жизни населения проводились и проводятся многими учеными. В работах А. Бадова и др. [Бадов, 2013; Бадов и др., 2021] рассматриваются основные демографические показатели Северной Осетии и др. регионов, в том числе динамика численности населения, естественное движение и миграции, ожидаемая продолжительность жизни, заболеваемость и многие другие. В статье М. Колосницыной и др. [Колосницына и др., 2019] исследуются факторы роста ожидаемой продолжительности жизни по странам мира. Е. Андреев и В. Школьников [Андреев, Школьников, 2018] выявляют связь между уровнем смертности и экономическим развитием. В статье В. Заалишвили и др. [Заалишвили и др., 2023] исследуются проблемы определения уровня загрязнения атмосферного воздуха. В. Иванов и А. Суворов [Иванов, Суворов, 2003] исследовали проблемы прогнозирования здоровья населения России. Т. Коссова и др. [Коссова и др., 2017] рассматривали вопросы влияния потребления алкоголя на состояние здоровья и ожидаемую продолжительность жизни. Т. Харькова и др. [Харькова и др., 2017] выявляли зависимость продолжительности жизни от уровня образования.

Подавляющее большинство зарубежных ученых [[Bradley et al., 2017; Breyer et al., 2015; Filmer, Pritchett, 1999; Heijink et al., 2013; Heuvel van den, Olariou, 2017; Jaba et al., 2014; Martin et al., 2008; McCullough, Leider, 2017; Nixon, Ulmann, 2006; Paavola, 2017; Romaniuk, Szromek, 2006; Saunders et al., 2017; Shkolnikov et al., 2011; Taylor et al., 2016]] исследовали влияние расходов на здравоохранение на продолжительность жизни.

### Результаты исследований и их обсуждение

На общемировом фоне Россия в 2005 г. выглядела весьма неважно. Она значительно уступала многим развитым и некоторым развивающимся странам. ОПЖ России составляла всего 65 лет. Но за 2005–2018 гг., благодаря реализации ряда демографических программ и улучшению благосостояния населения, ОПЖ страны выросла на 7,5 лет или на 11%.

В 2005 г. самая высокая величина ОПЖ наблюдалась в Северо-Кавказском Федеральном Округе (табл. 1). Это было на 7 лет больше, чем в Дальневосточном Федеральном Округе (самый низкий ОПЖ). В целом, округа России можно подразделить на: 1) с высокой ОПЖ (более 67 лет, СКФО, ЮФО); 2) со средней ОПЖ (63–67 лет, ЦФО, СЗФО, ПФО, УФО); 3) с низкой ОПЖ (менее 63 лет, СФО, ДФО).

За 2005–2020 гг. ОПЖ населения России увеличилась более чем на 9%. Однако, за 2018–2020 гг. было отмечено некоторое снижение ОПЖ. Это связано, прежде всего, с накрывшей весь мир коронавирусной эпидемией и продолжившимся мировым экономическим кризисом. Самые низкие темпы роста ОПЖ наблюдались в СКФО. Однако, высокая база 2005 г. позволила населению СКФО остаться на лидирующих позициях. Так, в 2020 г. ОПЖ СКФО была на 5 с лишним лет выше, чем у жителей ДФО. Даже с учетом размеров нашей страны, разрыв весьма суще-

ственный. При этом, выявилась тенденция: чем ниже в регионе была исходная база (2005 г.), тем выше были темпы роста ОПЖ за 2005–2020 гг. В то же время во всех федеральных округах было заметно снижение ОПЖ за 2018–2020 гг.

С учетом показателей ОПЖ за 2020 г., федеральные округа России можно подразделить на следующие группы: 1) с очень высокой ОПЖ (более 74 лет, СКФО); 2) с высокой ОПЖ (72–74 года, ЦФО, СЗФО, ЮФО); 3) со средней ОПЖ (70–71,9 года, ПФО, УФО); 3) с низкой ОПЖ (менее 70 лет, СФО, ДФО). При этом основной тренд – снижение ОПЖ в России с юго-запада на северо-восток (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Динамика ожидаемой продолжительности жизни при рождении по федеральным округам РФ (все население) за 2005–2020 гг. /**

**Life expectancy dynamics at birth by federal districts of the Russian Federation (total population) for 2005–2020**

Округа / Districts	Ожидаемая продолжительность жизни, лет / Life expectancy, years				Динамика, % / Dynamics, %			
	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.
Россия / Russia	65,37	68,94	71,39	71,54	100	103,5	102,1	109,4
Центральный / Central District	66,50	69,33	72,72	72,57	100	104,9	101,8	109,1
Северо-Западный / Northwestern	64,17	68,90	71,70	72,02	100	104,1	102,2	112,2
Южный / Southern	67,14	70,12	71,89	72,09	100	102,5	102,3	107,4
Северо-Кавказский / North Caucasian	69,93	72,19	74,63	74,58	100	103,4	102,5	106,6
Приволжский / Volga	65,29	68,38	70,71	70,83	100	103,4	102,4	108,5
Уральский / Ural	65,15	68,82	70,38	70,81	100	102,3	102,3	108,7
Сибирский / Siberian	62,70	67,10	69,31	69,60	100	103,3	102,0	111,0
Дальневосточный / Far Eastern	62,18	65,76	68,68	69,15	100	104,4	102,2	111,2

*Источник:* Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020: Стат. сб./ М.: Росстат. 2021. С. 79–80 [Регионы России..., 2021] / *Source:* Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2020: Stat. comp. Moscow. Rosstat. 2021. pp. 79–80 [Regions of Russia..., 2021].

Исследования ОПЖ в разрезе регионов страны показали довольно любопытные результаты. Так, в 2005 г. в России насчитывалось 4 региона с ОПЖ менее 60 лет: Тыва (55,84), Забайкальский край (59,33), Еврейская АО (59,20), Чукотский АО (58,48). Все регионы представляют Сибирский и Дальневосточный округа. Вообще, в этих округах лишь в трех регионах ОПЖ была выше 65 лет. В противовес им в Москве (71,59), Чечне (72,07), Дагестане (73,13), Ингушетии (73,45), т.е. ОПЖ была выше семидесяти лет.

В 2020 г. общая ситуация заметно улучшилась, тем не менее, существенные различия сохранились. Так, в России насчитывалось 9 регионов с ОПЖ менее 70 лет: Сахалинская область (69,92), Магаданская область (69,62), Кемеровская область (69,32), Иркутская область (69,31), Амурская область (69,11), Забайкальский край (68,99), Еврейская АО (68,60), Тыва (66,47), Чукотский АО (63,58). Вновь в эту группу включены все регионы Сибирского (3) и Дальневосточного (6) округов. По сравнению с 2005 г., группу с низкой ОПЖ дополнили Иркутская, Кемеровская, Амурская, Магаданская и Сахалинская области.

В противовес этим регионам отметим регионы с очень высокой продолжительностью жизни (более 76 лет): Ингушетия (82,41), Дагестан (78,69), Москва (77,84), Кабардино-Балкария (76,28), Карачаево-Черкесия (76,09). Таким образом, родившиеся в 2020 г. в Ингушетии имеют возможность прожить на 9 лет дольше, чем родившиеся на Чукотке. Здесь наблюдается существенное различие между юго-западом и северо-востоком страны. Тем не менее, утверждать о крайне негативном воздействии климатических условий северных широт на ОПЖ вряд ли возможно: в группе с высокой ОПЖ находятся и ХМАО, и ЯНАО, и некоторые другие экономически благополучные регионы севера.

Россия – одна из немногих стран мира, где женщины живут намного дольше, чем мужчины. В 2005 г. в стране женщины жили на 13,55 лет дольше, а в 2018 г. – уже на 10,07. Такой разрыв нехарактерен для других стран мира, как развитых, так и развивающихся. Тем не менее, судя по официальным данным, ситуация начинает постепенно выправляться: за 2005–2018 гг. мужчины сократили отставание более чем на 3 года. Так, в 2018 г. ОПЖ мужчин равнялась 67,75 лет, а женщин – 77,82 лет.

В 2005 г. самая высокая ОПЖ и мужчин и женщин была зафиксирована в Северо-Кавказском ФО, а самая низкая – в Дальневосточном ФО. По мужчинам, ДФО отставал от СКФО на 8,5 лет, а по женщинам – на 7 лет.

В России в целом, женщины в 2020 г. жили на 9,94 года дольше, чем мужчины. Это один из самых высоких показателей в мире. В то же время необходимо отметить, что в настоящее время наблюдается постепенное сокращение разрыва между женщинами и мужчинами. Продолжительность жизни мужчин за 2005–2020 гг. увеличилась на 12,8 года, а женщин – на 5,5 лет. Тем не менее, и у мужчин, и у женщин наблюдалось увеличение ОПЖ до 2018 г. и снижение до 2020 г. Эти «качели» наблюдались в России практически повсеместно. И в 2005, и в 2020 гг. дольше всех жили мужчины и женщины Северо-Кавказского ФО. Однако темпы роста ОПЖ мужчин и женщин СКФО были ниже, чем в других округах. Указанная зависимость уже отмечалась нами, а именно, чем ниже исходная база, тем выше темпы роста. С другой стороны, в СКФО преимущество женщин перед мужчинами значительно меньше, чем в других регионах.

В 2020 г. ОПЖ женщин СКФО была на 3,83 года выше, чем в ДФО, мужчин – на 6,56 лет. С учетом показателей ОПЖ мужчин за 2020 г. федеральные округа РФ можно подразделить на: 1) с высокой ОПЖМ (более 70 лет, СКФО); 2) со средней ОПЖМ (67–69,9 лет, ЦФО, ЮФО); 3) с низкой ОПЖМ (менее 67 лет, СЗФО, ПФО, УФО, СФО, ДФО).

С учетом показателей ОПЖ женщин за 2020 г. федеральные округа РФ можно подразделить на: 1) с высокой ОПЖЖ (более 77 лет, СКФО, ЦФО); 2) со средней

ОПЖЖ (76–77 лет, СЗФО, ЮФО, ПФО); 3) с низкой ОПЖЖ (менее 76 лет, УФО, ДФО, СФО). География практически везде одинакова: с движением с юга на северо-восток ОПЖ и мужчин и женщин снижается, а разница между женщинами и мужчинами увеличивается. Несколько выбивается из общего ряда СЗФО, где разница между мужчинами и женщинами достигает 10 лет и более (так же как в УФО, СФО и ДФО).

Вышеуказанная тенденция еще более проявляется при исследовании межрегиональных различий. Так, в 2005 г. среди регионов с ОПЖ менее 54 лет у мужчин, можно выделить: Амурскую область (53,98), Псковскую область (53,81 лет), Еврейскую АО (53,76), Иркутскую область (53,26), Забайкальский край (52,93), Тыву (50,60). Всего 6 регионов. У женщин (менее 68 лет): Амурскую область (67,76), Алтай (67,64), Забайкальский край (67,18), Еврейскую АО (65,76), Чукотский АО (63,50), Тыву (61,57). Также 6 регионов.

В 2020 г. в группу с очень низкими величинами ОПЖ среди мужчин (менее 64 лет) входило 6 регионов: Кемеровская (63,66) и Иркутская (63,32) области, Забайкальский край (63,78), Еврейская АО (63,36), Тыва (61,40) и Чукотский АО (59,22). И в группу с очень низкими величинами ОПЖ среди женщин (менее 76 лет) входило 14 регионов: Хакасия (75,90), Бурятия (75,81), Камчатский край (75,72), Магаданская область (75,68), Хабаровский край (75,58), Приморский край (75,51), Сахалинская область (75,45), Иркутская область (75,19), Кемеровская область (74,88), Забайкальский край (74,32), Амурская область (74,17), Еврейская АО (73,88), Тыва (71,50), Чукотский АО (67,97).

У мужчин в группе с очень высокой ОПЖ (более 70 лет) состоят 8 регионов: Ингушетия (79,22), Дагестан (75,82), Москва (74,28), Чечня (73,91), Кабардино-Балкария (71,92), Карачаево-Черкесия (71,47), Северная Осетия (70,35), Санкт-Петербург (71,34). У женщин (более 80 лет) – 6 регионов: Ингушетия (85,41), Дагестан (81,36), Москва (81,19), Северная Осетия (80,57), Карачаево-Черкесия (80,39), Кабардино-Балкария (80,23).

И у мужчин, и у женщин в группах с очень высокой ОПЖ наблюдаются Москва и регионы Северного Кавказа, в группах с очень низкой ОПЖ – регионы Сибири и Дальнего Востока. Вновь сохраняется тенденция снижения ОПЖ с запада на восток. В Центре и на Северо-Западе высокими показателями выделяются Москва и Санкт-Петербург. Высокий уровень здравоохранения в этих городах самым непосредственным образом сказывается на ожидаемой продолжительности жизни.

Как уже было показано выше, регионы Северо-Кавказского ФО являются самыми благополучными с точки зрения ожидаемой продолжительности жизни при рождении. Тем не менее, в 2005 г. внутри СКФО можно выделить две группы регионов с показателями ОПЖ более 70 и менее 70 лет. В первую группу входили Дагестан, Ингушетия и Чечня, во вторую – Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия и Ставропольский край. В 2020 г. ситуация некоторым образом изменилась. В первую группу (более 76 лет) входили Дагестан, Ингушетия, Кабардино-Балкария и Карачаево-Черкесия; во вторую (менее 76 лет) – Северная Осетия, Чечня, Ставропольский край (табл. 2 и рис. 1). Заметим, что в крае сравнительно высокие показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а в вышеозначенных республиках – низкие.

Таблица 2 / Table 2

**Ожидаемая продолжительность жизни при рождении в СКФО (все население)  
за 2020 г. и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу /  
Life expectancy at birth in the North Caucasus Federal District (total population)  
for 2020 and air pollutants emission into the atmosphere**

Регионы / Regions	Ожидаемая продолжительность жизни в 2020 г., лет / Life expectancy, 2020, years	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в 2020 г., на единицу площади, тонн/кв.км / Air pollutant emissions into the atmosphere in 2020, per unit area, tons/sq.km
Республика Дагестан / Republic of Dagestan	78,69	0,19
Республика Ингушетия / Republic of Ingushetia	82,41	0,56
Кабардино-Балкарская Республика / Kabardino-Balkarian Republic	76,28	0,24
Карачаево-Черкесская Республика / Karachay-Cherkess Republic	76,09	1,12
Республика Северная Осетия-Алания / Republic of North Ossetia-Alania	75,68	1,25
Чеченская Республика / Chechen Republic	75,43	1,02
Ставропольский край / Stavropol Krai	74,18	1,65

*Источник:* Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020: Стат. сб./ М.: Росстат. 2021. С. 79, 439 [Регионы России..., 2021] / *Source:* Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2020: Stat. comp. Moscow. Rosstat. 2021. pp. 79, 439 [Regions of Russia..., 2021].

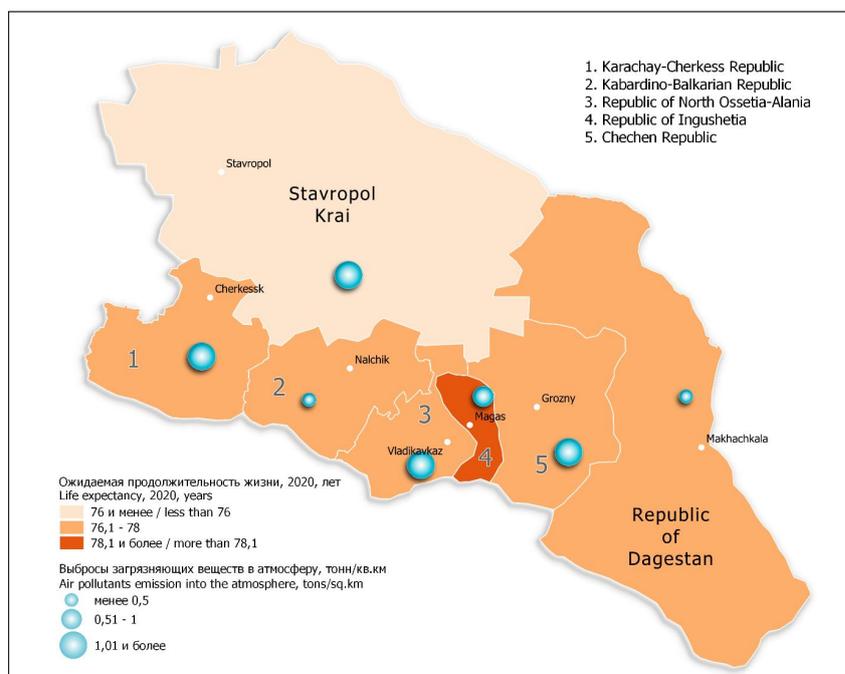


Рис. 1. Ожидаемая продолжительность жизни при рождении в СКФО (все население) за 2020 г. и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу /

Fig. 1. Life expectancy at birth in the North Caucasus Federal District (total population) for 2020 and air pollutants emission into the atmosphere

На Северном Кавказе различия между ОПЖ мужчин и женщин не такие существенные, как в среднем по России и в других федеральных округах. Так, в 2020 г. разница между мужчинами и женщинами в России равнялась 10,17 годам, а в СКФО – 6,70. Внутри СКФО также наблюдались существенные различия. Минимальная разность была зафиксирована в Чечне, а максимальная – в Северной Осетии, а разница между ними составляла 5,56 лет. В общем, показатель Северной Осетии даже выше, чем среднероссийский. В этом плане республика весьма далека от других северокавказских республик и на год с лишним превышает показатель Ставропольского края.

По величине превышения ОПЖ женщин над ОПЖ мужчин в 2020 г. регионы СКФО можно подразделить на: 1) с невысоким превышением (менее 7 лет, Чечня, Ингушетия); 2) со средним превышением (7–10 лет, КБР, РД, КЧР, СК); 3) с высоким превышением (более 10 лет, РСО-А).

В 2005 г. ОПЖ мужчин СКФО колебалась в пределах 61–69 лет. Но в РИ мужчины жили на 8 лет дольше, чем на Ставрополье. Различия между женщинами были не столь большие (Дагестан и Ставропольский край, 3,2 года). Другие регионы компактно расположились в пределах 75–76 лет.

В 2020 г. показатели ОПЖ мужчин СКФО колебались в пределах 69–79 лет. Минимальный показатель – в Ставропольском крае (69,44), а максимальный в Ингушетии (79,22). Колебания других регионов 70–73 года. У женщин колебания не столь существенные – 77,67 – ЧР и 85,41 – РИ (7,74 года). Показатели у других регионов сравнительно компактны (78–81 год). Однако, весьма интересны данные по Ингушетии, показатели которой близки к лучшим мировым стандартам.

### Выводы

Таким образом, исследования демографических факторов здоровья населения выявили весьма существенную территориальную дифференциацию в показателях естественного движения населения, младенческой смертности и ожидаемой продолжительности жизни при рождении. С одной стороны, последние дефиниции считаются важнейшими в определении состояния здоровья населения, с другой – они самым непосредственным образом оказывают влияние на это здоровье. С третьей стороны, именно состояние здоровья населения оказывает влияние и на младенческую смертность, и на ожидаемую продолжительность жизни, и на рождаемость, и на смертность, и на многие другие демографические показатели. Здесь же необходимо отметить существенное влияние состояния окружающей среды на все демографические показатели, включая ожидаемую продолжительность жизни.

Основные показатели демографического развития России показывают на тренд дальнейшего увеличения ОПЖ. При этом наблюдается также тенденция на выравнивание показателей между регионами и сокращение территориальных диспропорций, наблюдаемых в стране в начале 2000-х гг.

### Литература

1. Андреев Е., Школьников В. Связь между уровнями смертности и экономического развития в России и ее регионах. // Демографическое обозрение. – 2018. – Т. 5. № 1. – С. 6–24.
2. Бадов А.Д. Геодемография Северной Осетии (монография). // Владикавказ: СОГУ, – 2013. 432 с.

3. Бадов А.Д., Бадов О.А., Дзахова Л.Х., Бязрова Д.Б. Медико-географические факторы здоровья населения Северной Осетии. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. № 1. – С. 35–43.
4. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В., Майсурадзе М.В. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 133–148.
5. Иванов В., Суворов А. Проблемы охраны здоровья населения России. // Проблемы прогнозирования. – 2003. – № 3. – С. 99–113.
6. Колосницына М., Коссова Т., Шелунцова М. Факторы роста продолжительности жизни: кластерный анализ по странам мира. // Демографическое обозрение. – 2019. – Т. 6. № 1. – С. 124–150.
7. Коссова Т., Коссова Е., Шелунцова М. Влияние потребления алкоголя на смертность и ожидаемую продолжительность жизни в регионах России. // Экономическая политика. – 2017. – Т. 12. № 1. – С. 58–83. DOI: 10.18288/1994-5124-2017-1-03.
8. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020. // Статистический сборник. М.: Росстат, – 2021. 1122 с.
9. Харьковская Т., Никитина С., Андреев Е. Зависимость продолжительности жизни от уровня образования в России. // Вопросы статистики. – 2017. – № 8. – С. 61–69.
10. Barthold D., Nandi A., Mendoza Rodríguez J., Heymann J. Analyzing whether countries are equally efficient at improving longevity for men and women. // American Journal of Public Health. – 2014. – Vol. 104. Issue 11. – pp. 9–2163. DOI: 10.2105/AJPH.2013.301494.
11. Bradley E.H., Sipsma H., Taylor L.A. American health care paradox—high spending on health care and poor health. // QJM: An International Journal of Medicine. – 2017. – No. 1. – 61–65. DOI: 10.1093/qjmed/hcw187.
12. Breyer F., Lorenz N., Niebel T. Health care expenditures and longevity: is there a Eubie Blake effect? // The European Journal of Health Economics. – 2015. – Vol. 7. Issue 1. – pp. 95–112. DOI: 10.1007/s10198-014-0564-x.
13. Filmer D., Pritchett L. The impact of public spending on health: does money matter? // Social Science & Medicine. – 1999. – Vol. 49. – pp. 1309–1323.
14. Heijink R., Koolman X., Westert G.P. Spending more money, saving more lives? The relationship between avoidable mortality and healthcare spending in 14 countries. // European Journal of Health Economics. – 2013. – Vol. 14. – pp. 527–538. DOI: 10.1007/s10198-012-0398-3.
15. Heuvel van den W., Olariu M. How important are health care expenditures for life expectancy? A comparative European analysis. // Journal of the American Medical Directors Association. – 2017. – Vol. 18. Issue 3. – pp. 9–12.
16. Jaba E., Balan C., Robu I. The relationship between life expectancy at birth and health expenditures estimated by a cross-country and time-series analysis. // Procedia Economics and Finance. – 2014. – Vol. 15. – pp. 108–114. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)00454-7.
17. Martin S., Rice N., Smith P. Does health care spending improve health outcomes? Evidence from English programme budgeting data. // Journal of Health Economics. – 2008. – Vol. 27. – pp. 826–842. DOI: 10.1016/j.jhealeco.2007.12.002.
18. McCullough M.J., Leider J.P. Associations between county wealth, health and social services spending, and health outcomes. // American Journal of Preventive Medicine. – 2017. – Vol. 53. Issue 5. – pp. 592–598. DOI: 10.1016/j.amepre.2017.05.005.
19. Nixon J., Ulmann Ph. The relationship between health care expenditure and health outcomes. // The European Journal of Health Economics. – 2006. – Vol. 7. Issue 1. – pp. 7–18. DOI: 10.1007/s10198-005-0336-8.
20. Paavola J. Health impacts of climate change and health and social inequalities in the UK. // Environmental Health. – 2017. – Vol. 16. No. 113. – pp. 61–68. DOI: 10.1186/s12940-017-0328-z.
21. Romaniuk P., Szromek A. The evolution of the health system outcomes in Central and Eastern Europe and their association with social, economic and political factors: an analysis of

25 years of transition. // BMC Health Services Research. – 2016. – Vol. 16. Issue 95. – pp. 1–12. DOI: 10.1186/s12913-016-1344-3.

22. Saunders M., Barr B., McHale P., Hamelmann C. Key policies for addressing the social determinants of health and health inequities. // Health Evidence Network Synthesis Report, No. 52. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. – 2017. – 91 p.

23. Shkolnikov V., Andreev E., Zhang Zh., Oeppen J., Vaupel J. Losses of expected lifetime in the United States and other developed countries: Methods and empirical analyses. // Demography. – 2011. – Vol. 48. Issue 1. – pp. 211–239. DOI: 10.1007/s13524-011-0015-6.

24. Taylor L.A., Tan A.X., Coyle C.E., Ndumele C., Rogan E., Canavan M., et al. Leveraging the social determinants of health: What works? // PLoS ONE. – 2016. – Vol. 11. Issue 8. – pp. 1–20. DOI: 10.1371/journal.pone.0160217.

## References

1. Andreev E., Shkolnikov V. Relationship between mortality rates and economic development in Russia and its regions. Demographic Review. 2018. Vol. 5. No. 1. pp. 6–24. (In Russ.)

2. Badov A.D. Geodemography of North Ossetia. Vladikavkaz. NOSU. 2013. 432 p. (In Russ.)

3. Badov A.D., Badov O.A., Dzakhova L.Kh., Byazrova D.B. Medical-geographic factors of population health in North Ossetia. Sustainable development of mountain territories. 2021. Vol. 13. No. 1. pp. 35–43. (In Russ.)

4. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V., Maisuradze M.V. Determination of air pollution levels caused by the road transport in urbanized areas. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 133–148. (In Russ.)

5. Ivanov V., Suvorov A. Problems of public health protection in Russia. Problems of Forecasting. 2003. No. 3. pp. 99–113. (In Russ.)

6. Kolosnitsyna M., Kossova T., Sheluntsova M. Life expectancy growth factors: cluster analysis by countries of the world. Demographic Review. 2019. Vol. 6. No. 1. pp. 124–150. (In Russ.)

7. Kossova T., Kossova E., Sheluntsova M. The impact of alcohol consumption on mortality and life expectancy in the regions of Russia. Economic Policy. 2017. Vol. 12. No. 1. pp. 58–83. DOI: 10.18288/1994-5124-2017-1-03 (In Russ.)

8. Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2020. Statistical compendium. Moscow. Rosstat. 2021. p. 1122 (In Russ.)

9. Kharkova T., Nikitina S., Andreev E. Dependence of life expectancy on the level of education in Russia. Problems of Statistics. 2017. No. 8. pp. 61–69. (In Russ.)

10. Barthold D., Nandi A., Mendoza Rodríguez J., Heymann J. Analyzing whether countries are equally efficient at improving longevity for men and women. American Journal of Public Health. 2014. Vol. 104. Issue 11. pp. 9–2163. DOI: 10.2105/AJPH.2013.301494.

11. Bradley E.H., Sipsma H., Taylor L.A. American health care paradox—high spending on health care and poor health. QJM: An International Journal of Medicine. 2017. No. 1. 61–65. DOI: 10.1093/qjmed/hcw187.

12. Breyer F., Lorenz N., Niebel T. Health care expenditures and longevity: is there a Eubie Blake effect? The European Journal of Health Economics. 2015. Vol. 7. Issue 1. pp. 95–112. DOI: 10.1007/s10198-014-0564-x.

13. Filmer D., Pritchett L. The impact of public spending on health: does money matter? Social Science & Medicine. 1999. Vol. 49. pp. 1309–1323.

14. Heijink R., Koolman X., Westert G.P. Spending more money, saving more lives? The relationship between avoidable mortality and healthcare spending in 14 countries. European Journal of Health Economics. 2013. Vol. 14. pp. 527–538. DOI: 10.1007/s10198-012-0398-3.

15. Heuvel van den W., Olaroju M. How important are health care expenditures for life expectancy? A comparative European analysis. Journal of the American Medical Directors Association. 2017. Vol. 18. Issue 3. pp. 9–12.

16. Jaba E., Balan C., Robu I. The relationship between life expectancy at birth and health expenditures estimated by a cross-country and time-series analysis. *Procedia Economics and Finance*. 2014. Vol. 15. pp. 108–114. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)00454-7.
17. Martin S., Rice N., Smith P. Does health care spending improve health outcomes? Evidence from English programme budgeting data. *Journal of Health Economics*. 2008. Vol. 27. pp. 826–842. DOI: 10.1016/j.jhealeco.2007.12.002.
18. McCullough M.J., Leider J.P. Associations between county wealth, health and social services spending, and health outcomes. *American Journal of Preventive Medicine*. 2017. Vol. 53. Issue 5. pp. 592–598. DOI: 10.1016/j.amepre.2017.05.005.
19. Nixon J., Ulmann Ph. The relationship between health care expenditure and health outcomes. *The European Journal of Health Economics*. 2006. Vol. 7. Issue 1. pp. 7–18. DOI: 10.1007/s10198-005-0336-8.
20. Paavola J. Health impacts of climate change and health and social inequalities in the UK. *Environmental Health*. 2017. Vol. 16. No. 113. pp. 61–68. DOI: 10.1186/s12940-017-0328-z.
21. Romaniuk P., Szromek A. The evolution of the health system outcomes in Central and Eastern Europe and their association with social, economic and political factors: an analysis of 25 years of transition. *BMC Health Services Research*. 2016. Vol. 16. Issue 95. pp. 1–12. DOI: 10.1186/s12913-016-1344-3.
22. Saunders M., Barr B., McHale P., Hamelmann C. Key policies for addressing the social determinants of health and health inequities. *Health Evidence Network Synthesis Report*. No. 52. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. 2017. 91 p.
23. Shkolnikov V., Andreev E., Zhang Zh., Oeppen J., Vaupel J. Losses of expected lifetime in the United States and other developed countries: Methods and empirical analyses. *Demography*. 2011. Vol. 48. Issue 1. pp. 211–239. DOI: 10.1007/s13524-011-0015-6.
24. Taylor L.A., Tan A.X., Coyle C.E., Ndumele C., Rogan E., Canavan M., et al. Leveraging the social determinants of health: What works? / *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11. Issue 8. pp. 1–20. DOI: 10.1371/journal.pone.0160217.

УДК 551.583.13

DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017

Оригинальная статья

## Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений

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

ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова,  
Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100,  
e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Статья поступила: 02.04.2024, доработана: 26.04.2024, принята к публикации: 29.04.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Согласно докладом межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), климатические изменения проявляются не только в глобальном масштабе, но и на региональном уровне. Изменение температурного режима и режима осадков, несомненно, сказывается на агроклиматических показателях территории. Одной из ведущих отраслей Северо-Кавказского региона является сельское хозяйство, которое в достаточной мере зависит от климатических условий и их изменчивости. Так как наиболее востребованными в растениеводстве являются степные ландшафты Северного Кавказа, занимающие 40% всей территории, то тематика исследования представляет не только научный, но и практический интерес. **Цель** – оценка современных агроклиматических условий степных ландшафтов Северного Кавказа. **Задачи** – на основе традиционных методов, используемых в агрометеорологии обработать статистический материал, обобщить и интерпретировать полученные результаты, сделать обоснованные выводы о динамике агроклиматических показателей на фоне меняющегося климата. **Материалы и методы.** Для оценки агроклиматических условий использовались традиционные агроклиматические показатели, такие как суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10°C; даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0, 5 и 10°C весной и осенью; средняя температура самого холодного и самого теплого месяцев календарного года; гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК). Обработка материала проводилась методами математической статистики с использованием электронных таблиц Excel. Обработаны данные по температуре и осадкам в период с 1961 по 2020 годы по 10 метеорологическим станциям. **Результаты.** Годовая температура выросла на 0,98°C. Суммы активных температур, превышающих 5 и 10°C, выросли до 10 и 16% соответственно. Зимы стали более мягкими, а лето более жарким. Осадки выросли в среднем на 72 мм. Значение ГТК соответствует таким ландшафтными зонам как степь и лесостепь. **Выводы.** Наблюдаемые изменения климата степных ландшафтов Северного Кавказа способствуют улучшению условий тепло- и влагообеспечения.

**Ключевые слова:** современные климатические изменения, агроклиматические условия, температура, осадки, гидротермический коэффициент.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0001 «Оценка влияния современных климатических изменений на природные и природно-антропогенные комплексы (на примере Чеченской Республики)».

**Для цитирования:** Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 219-230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017

DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017

Original paper

# Dynamics of agroclimatic indicators of steppe landscapes of the North Caucasus according to ground observations

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

Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, 100 Ave. H.A. Isaeva,  
Grozny 364051, Russian Federation, e-mail: eip-eco2017@yandex.ru

Received: 02.04.2024, revised: 26.04.2024, accepted: 29.04.2024

**Abstract: Relevance.** According to the reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change is manifested not only on a global scale, but also at the regional level. Changes in temperature and precipitation regimes undoubtedly affect the agroclimatic indicators of the territory. One of the leading industries in the North Caucasus region is agriculture, which is quite dependent on climatic conditions and their variability. Since the steppe landscapes of the North Caucasus are the most popular in crop production, occupying 40% of the entire territory, the research topic is of not only scientific, but also practical interest. **Aim** – assessment of modern agroclimatic conditions of steppe landscapes of the North Caucasus. **Tasks** – based on traditional methods used in agrometeorology, process statistical material, summarize and interpret the results, draw reasonable conclusions about the dynamics of agroclimatic indicators against the backdrop of a changing climate. **Materials and methods.** To assess agro-climatic conditions, traditional agro-climatic indicators were used, such as the sum of average daily air temperatures for the period of a calendar year with an average daily temperature exceeding 0, 5 and 10° C; dates of stable transition of the average daily air temperature through 0, 5 and 10°C in spring and autumn; average temperature of the coldest and warmest months of the calendar year, Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC). The processing of the material was carried out by methods of mathematical statistics using Excel spreadsheets. Processed data on temperature and precipitation in the period from 1961 to 2020 for 10 meteorological stations. **Results.** The annual temperature increased by 0.98°C. The sums of active temperatures exceeding 5 and 10°C increased to 10 and 16%, respectively. Winters have become milder and summers hotter. Precipitation increased by an average of 72 mm. The value of the HTC corresponds to such landscape zones as steppe and forest-steppe. **Conclusions.** The observed climate changes in the steppe landscapes of the North Caucasus contribute to the improvement of heat and moisture conditions.

**Keywords:** modern climatic changes, agro-climatic conditions, temperature, precipitation, hydrothermal coefficient.

**Acknowledgments:** *The work was carried out within the framework of the state task of the State Scientific Technical University named after. Academician M.D. Millionshchikov FZNU-2024-0001 “Assessment of the impact of modern climate change on natural and natural-anthropogenic complexes (using the example of the Chechen Republic)”.*

**For citation:** Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Dynamics of agroclimatic indicators of steppe landscapes of the North Caucasus according to ground observations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(2): 219-230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017

## Введение

Природно-климатические ресурсы территории являются важнейшим фактором, влияющим на сельскохозяйственную специализацию региона. Оценка климатических изменений в глобальном и континентальном масштабах, их влияние на окружающую среду и различные секторы экономики, а также методы борьбы и адаптации к

происходящим изменениям, представлены в работах [Chausson et al., 2020; Malhi et al., 2021; Aryal et al., 2020; Abbass et al., 2022; Malhi et al., 2020; Fawzy et al., 2020] ([https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf)). На фоне глобального изменения климата, климатические ресурсы отдельных регионов также претерпевают изменения. Климатическим изменениям Северного Кавказа и его отдельных регионов посвящено множество работ. Климатические изменения в горных районах Кавказа и их влияние на развитие опасных гидрометеорологических явлений, а также современное оледенение рассмотрено в работах [Аджиева и др., 2009; Залиханов, 1985; Лурье, Панов, 2013; Яицкая и др., 2023]. Оценка современных изменений климата Ставропольского края и прогностическая оценка на XXI век дана в работе [Бадахова, Кнутас, 2007]. Подробное описание изменения элементов климата (ветра, температуры воздуха, влажности, осадков и др.) Ростовской области представлено в работе [Панов и др., 2007]. Анализ климатических изменений Юга России и их влияние на водный режим, а также прогноз возможного влияния на АПК и способы адаптации рассмотрены в работах [Лурье, 2002; Ларионов, 2001; Ашабоков и др., 2020]. Оценка современного агроклиматического потенциала Чеченской Республики дана в работе [Заурбеков и др., 2020]. Изучение климатических изменений в определенном типе ландшафта, представлено в работе [Керимов и др., 2021].

Таким образом, оценка современных агроклиматических условий территории Северного Кавказа не проводилась, наше исследование направлено на восполнение этого пробела. Учитывая, что 40% территории Северного Кавказа занимают степные ландшафты, которые активно вовлечены в сельское хозяйство, в основном для выращивания зерновых и зернобобовых культур, то целью настоящего исследования является оценка современных агроклиматических условий степных ландшафтов Северного Кавказа. Основные задачи исследования – на основе традиционных методов, используемых в агрометеорологии обработать статистический материал, обобщить и интерпретировать полученные результаты, сделать обоснованные выводы о динамике агроклиматических показателей на фоне меняющегося климата.

### Методы исследования

Все оценки, приведенные в статье, основаны на метеорологических и агрометеорологических данных наблюдательной сети Росгидромета по 10 метеорологическим станциям (Изобильный, Ставрополь, Гудермес, Грозный, Александровское, Гигант, Армавир, Краснодар, Анапа, Приморско-Ахтарск). Выбор метеостанции основывался исходя из репрезентативности и длительного и непрерывного ряда наблюдений (с 1961 по 2020 гг.). Репрезентативность оценивалась на основе коэффициента увлажнения ( $K_u$ ) Н.Н. Иванова, который установил соответствие между  $K_u$  и ландшафтными зонами [Иванов, 1948]. В качестве базового периода (нормы) используются данные из [Справочник ..., 1966].

Агроклиматические ресурсы той или иной территории определяются теплообеспеченностью, влагообеспеченностью и условиями перезимовки [Методы оценки..., 2012].

Важнейшими показателями теплообеспеченности региона являются [Кельчевская, 1971; Методы оценки ..., 2012]:

– суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10°C, подсчет сумм температур в среднем многолетнем разрезе производится по среднемесячной температуре, снятой с графика годового хода температур;

– даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0, 5 и 10°C весной и осенью, определялись по среднемесячной температуре воздуха графическим способом;

– средняя температура самого холодного и самого теплого месяцев календарного года, средняя многолетняя величина получается простым суммированием показателей и делением этой суммы на число используемых для расчета случаев или лет.

Оценка условий увлажнения вегетационного периода по количеству выпадающих осадков не может быть достаточной для познания агроклиматических ресурсов региона, т.к. не учитывается испаряемость. Для климатологической оценки степени увлажнения территории разработаны различные коэффициенты и индексы. Наиболее известными из них являются:

– коэффициент увлажнения (Ку) Н.Н. Иванова – отношение количества атмосферных осадков, выпадающих за определённый период, к величине испаряемости за тот же период, выраженное в процентах;

– гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова – отношение осадков за период с температурой выше 10°C к сумме температур ( $t > 10^\circ$ ), уменьшенной в 10 раз [Методы оценки ..., 2012].

Принимая во внимание то, что коэффициент увлажнения учитывает осадки за весь год, этот показатель, на наш взгляд, для агроклиматической характеристики не является информативным, т.к. нас интересуют осадки вегетационного периода.

### Результаты исследования

Средняя температура приземного воздуха за исследуемый период составила 11,1°C и оказалась выше нормы на 0,98°C (табл. 1). Как видно из табл. 1 наиболее сильно температура воздуха выросла с ноября по апрель, т.е. в холодный период.

*Таблица 1/ Table 1*

**Отклонение от нормы средней температуры приземного воздуха за период с 1961 по 2020 гг. / Deviation from the norm of average surface air temperature for the period from 1961 to 2020**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год / year
Изобильный / Izobilnyj	1,4	1,9	2,0	1,5	0,3	0,7	-0,2	-0,1	-0,2	-0,4	0,3	0,7	0,6
Ставрополь / Stavropol	0,8	0,8	0,8	1,2	0,2	0,6	0,4	0,2	0,3	-0,5	0,3	0,4	0,4
Гудермес / Gudermes	1,2	1,0	1,5	1,4	0,5	0,9	0,5	0,3	0,9	0,1	0,8	0,8	0,8
Грозный /Groznyj	1,3	0,9	1,7	1,7	0,4	0,3	0,2	0,3	1,0	0,2	0,8	1,1	0,8
Александровское/ Aleksandrovsкое	1,6	1,9	1,8	1,7	0,5	0,3	0,1	-0,1	0,5	0,1	0,8	1,4	0,9
Гигант /Gigant	1,9	2,0	2,1	1,7	0,6	1,0	0,6	0,6	0,9	0,6	1,2	2,0	2,1
Армавир / Armavir	1,8	2,2	1,6	1,4	0,6	1,0	0,6	0,8	0,9	0,3	1,1	1,8	1,2
Краснодар / Krasnodar	1,7	2,0	1,4	1,4	0,8	1,1	0,9	0,9	1,2	0,4	1,4	2,0	1,3
Анапа /Анапа	1,0	1,3	0,8	1,1	0,5	1,1	0,7	0,7	0,8	0,0	0,9	1,0	0,8
Приморско-Ахтарск / Primorsko-Ahtarsk	1,4	1,9	1,8	1,4	0,6	0,7	0,3	0,5	0,7	0,2	0,9	1,6	0,9
Среднее /Average	1,41	1,59	1,55	1,45	0,5	0,77	0,41	0,41	0,7	0,1	0,85	1,28	0,98

Сумма активных температур, превышающая 5°C выросла от 2 до 10 %, меньше всего в Ставрополе, больше всего – в Армавире 10% (рис. 1). Сумма активных температур, превышающая 10°C выросла на 2–16%, только в Изобильном оказалась ниже нормы (рис. 2). Отмечается смягчение зим, средняя температура января выросла (рис. 3). Средняя температура июля также выросла (рис. 4), за исключением Изобильного, где она осталась практически в пределах нормы и Грозного, где разница связана с переносом станции в 2000-х годах на новое место.

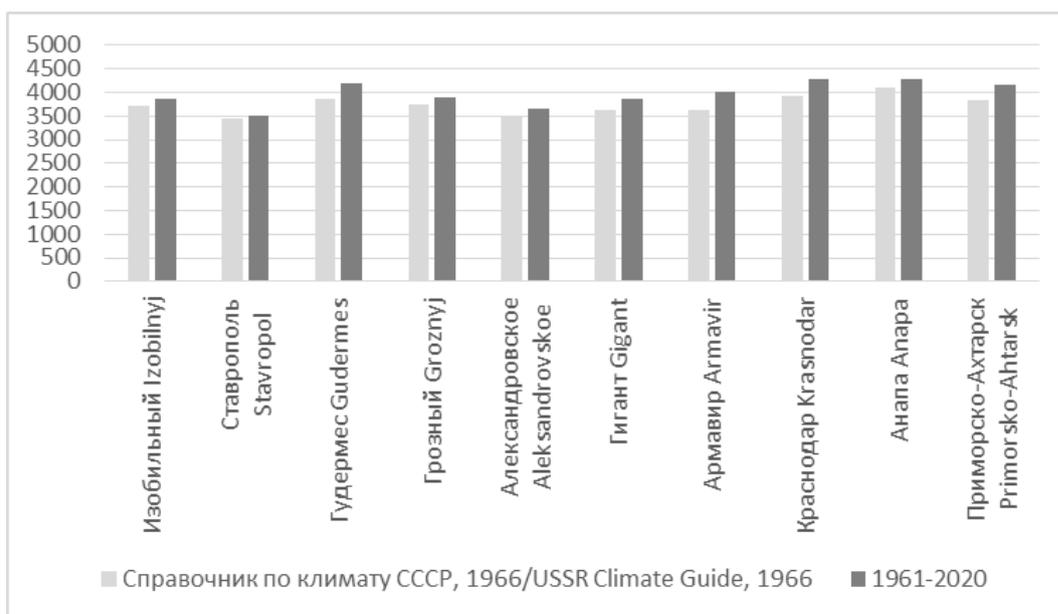


Рис. 1. Динамика суммы активных температур, превышающей 5°C за период с 1961 по 2020 гг. / Fig. 1. Dynamics of the sum of active temperatures exceeding 5°C for the period from 1961 to 2020

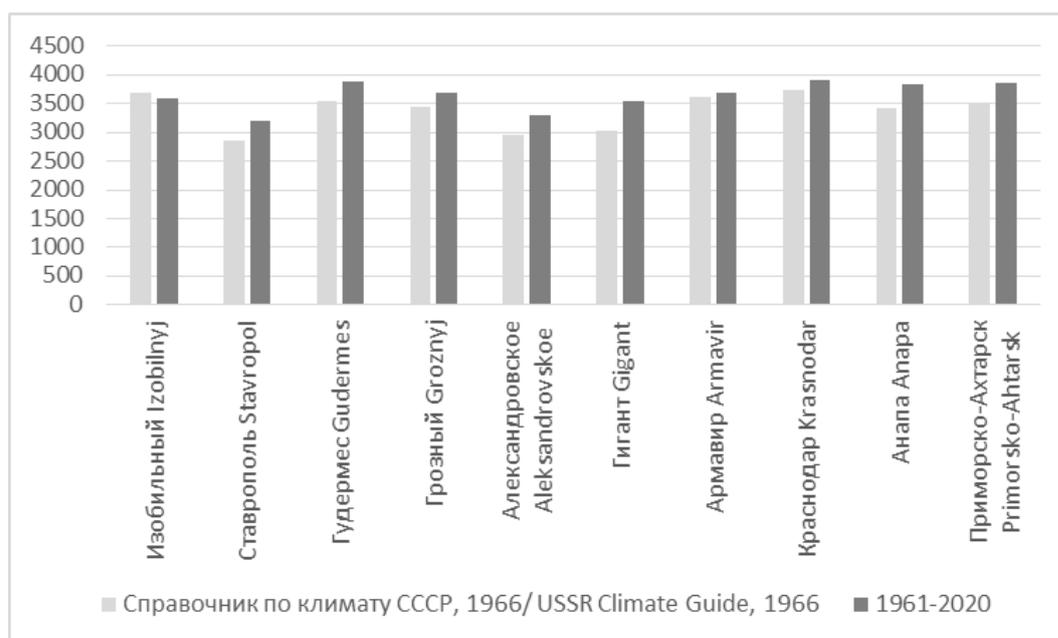
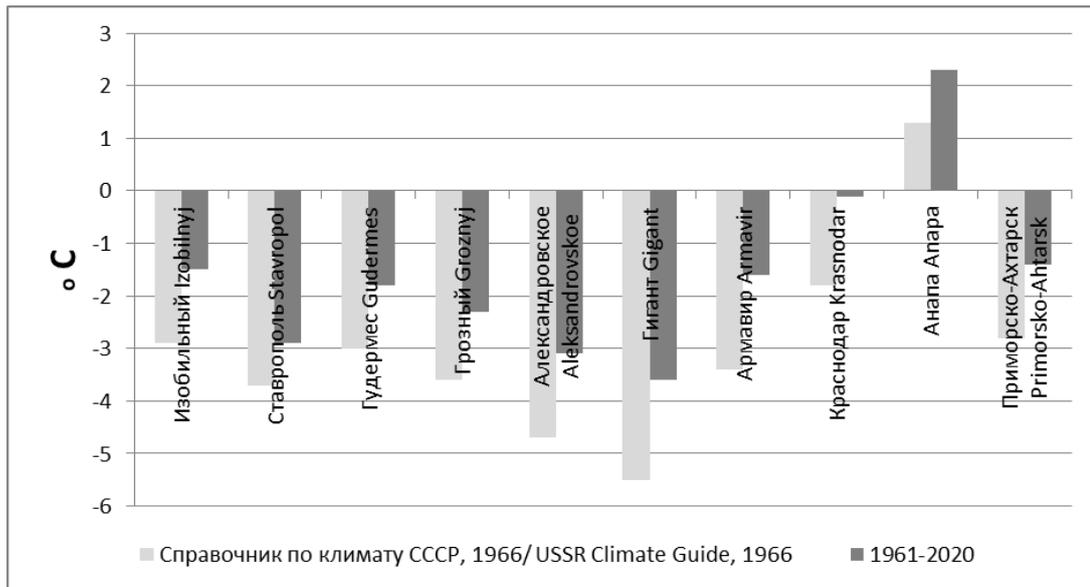
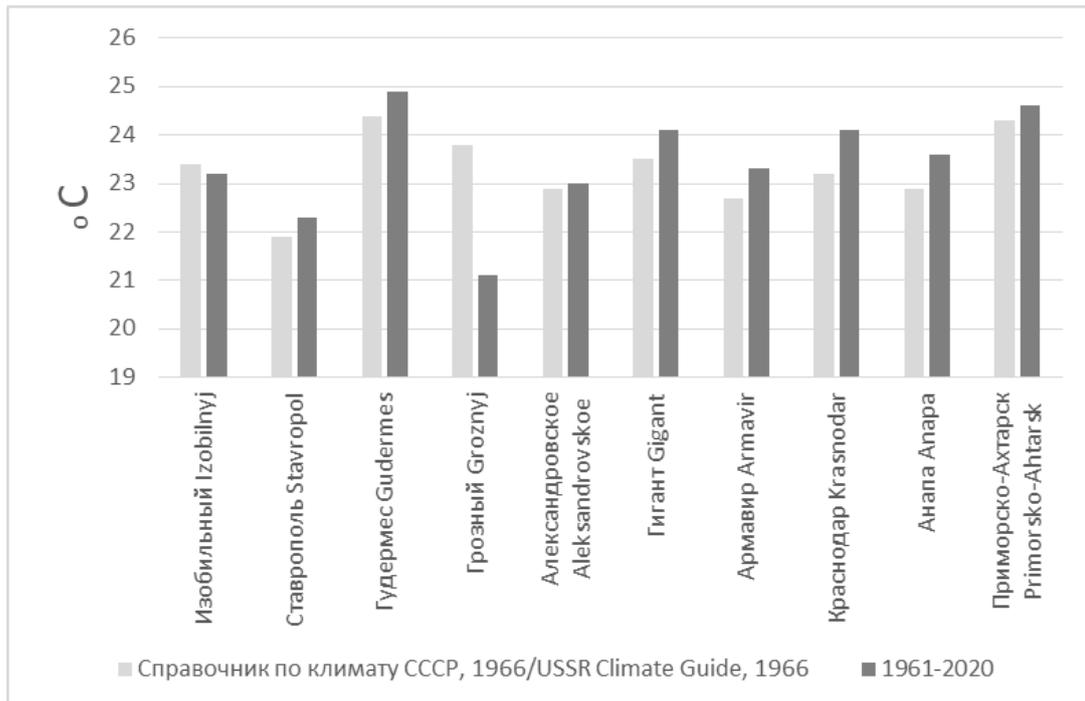


Рис. 2. Динамика суммы активных температур, превышающей 10°C за период с 1961 по 2020 гг. / Fig. 2. Dynamics of the sum of active temperatures exceeding 10°C for the period from 1961 to 2020



*Рис. 3. Средняя температура января за 1961–2020 гг. в сравнении с нормой /  
Fig. 3. Average January temperature for 1961–2020 compared to the norm*



*Рис. 4. Средняя температура июля за 1961–2020 гг. в сравнении с нормой /  
Fig. 4. July average temperature for 1961–2020 compared to the norm*

Период с переходом температуры воздуха через 0°C, 5 и 10°C весной наступает раньше в среднем на 13, 8 и 9 дней соответственно. Осенью переход температуры воздуха через 0°C наступает позже в среднем на 6 дней, через 5 и 10°C – позже на 1 день (табл. 2–4).

Таблица 2/ Table 2

**Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C  
весной и осенью / Dates of sustainable transition of the average daily air temperature  
through 0°C in spring and autumn**

Метеорологическая станция / Weather station	Справочник..., 1966 / Directory..., 1966	1961-2020	Отклонение в днях / Deviation in days	Справочник..., 1966 / Directory..., 1966	1961-2020	Отклонение в днях / Deviation in days
	Весна / spring			Осень / autumn		
Изобильный / Izobilnyj	28.02	15.02	13	14.12	15.12	1
Ставрополь / Stavropol	08.03	15.02	21	06.12	15.12	9
Гудермес / Gudermes	25.02	15.02	10	12.12	15.12	3
Грозный / Groznyj	02.03	22.02	8	04.12	14.12	10
Александровское / Aleksandrovskoe	11.03	01.03	10	28.11	07.12	9
Гигант / Gigant	14.03	01.03	13	26.11	07.12	11
Армавир / Armavir	01.03	15.03	-14	06.12	15.12	9
Краснодар / Krasnodar	22.02	15.01	38	18.12	15.12	-3
Приморско-Ахтарск / Primorsko-Ahtarsk	04.03	17.02	15	11.12	15.12	4
Среднее / Average			13			6

Таблица 3/ Table 3

**Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 5°C  
весной и осенью / Dates of sustainable transition of the average daily air temperature  
through 5°C in spring and autumn**

Метеорологическая станция / Weather station	Справочник..., 1966 / Directory..., 1966	1961-2020	Отклонение в днях / Deviation in days	Справочник..., 1966 / Directory..., 1966	1961-2020	Отклонение в днях / Deviation in days
Изобильный / Izobilnyj	26.03	15.03	11	13.11	14.11	1
Ставрополь / Stavropol	29.03	30.30	-1	07.11	09.11	2
Гудермес / Gudermes	25.03	17.03	8	14.11	17.11	3
Грозный / Groznyj	29.03	19.03	10	11.11	13.11	2
Александровское / Aleksandrovskoe	02.04	21.03	12	05.11	07.11	2
Гигант / Gigant	31.03	22.03	9	03.12	08.11	-25
Армавир / Armavir	24.03	01.03	23	11.11	15.11	4
Краснодар / Krasnodar	19.03	08.03	11	14.11	20.11	6
Анапа / Anapa	14.03	22.03	-8	03.12	15.12	12
Приморско-Ахтарск / Primorsko-Ahtarsk	25.03	17.03	8	13.11	16.11	3
Среднее / Average			8			1

Таблица 4/ Table 4

**Даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 10°C  
весной и осенью / Dates of sustainable transition of the average daily air temperature  
through 10°C in spring and autumn**

Метеорологическая станция / Weather station	Справочник..., 1966 / Directory..., 1966	1961-2020	Отклонение в днях / Deviation in days	Справочник..., 1966 / Directory..., 1966	1961-2020	Отклонение в днях / Deviation in days
Изобильный / Izobilnyj	13.04	07.04	6	20.10	19.10	-1
Ставрополь / Stavropol	22.04	07.04	15	15.10	15.10	0
Гудермес / Gudermes	16.04	02.04	14	24.10	22.10	-2
Грозный / Groznyj	17.04	13.04	4	20.10	21.10	1
Александровское / Aleksandrovskoe	21.04	01.04	20	12.10	15.10	3
Гигант / Gigant	18.04	13.04	5	14.10	17.10	3
Армавир / Armavir	14.04	07.04	7	20.10	22.10	2
Краснодар / Krasnodar	10.04	06.04	4	23.10	28.10	5
Анапа / Anapa	16.04	10.04	6	01.11	03.11	2
Приморско-Ахтарск / Primorsko-Ahtarsk	15.04	08.04	7	23.10	22.10	-1
Среднее / Average			9			1

Осадки распределяются неравномерно, в среднем по территории выпадает 571 мм. За исследуемый период осадки выросли на 72 мм. Существенное увеличение (больше 10%) наблюдается в Изобильном и Приморско-Ахтарске (11%), Гудермесе, Краснодаре и Армавире (12–13%), Александровском (16%), Гиганте (19%) (рис. 5). Данные по остальным метеостанциям показывают, что осадки остались в пределах нормы или ниже нормы (Ставрополь).

Таблица 5/ Table 5

**Отклонение от нормы осадков за период с 1961 по 2020 гг. /  
Deviation from normal precipitation for the period from 1961 to 2020**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год/ year
Изобильный / Izobilnyj	-3	1	8	6	11	10	-9	0	19	12	5	0	61
Ставрополь / Stavropol	-5	0	-1	-7	-7	-7	-25	-7	-9	4	-7	-6	-75
Гудермес / Gudermes	9,5	7,5	3,8	6,1	12,5	11,5	3,8	-1,4	-6,3	-0,3	1,1	8,1	55,8
Грозный / Groznyj	4	4	-2	3	3	4	-3	-4	-2	3	2	5	16
Александровское/ Aleksandrovskoe	6	6	11	8	-1	10	4	15	0	11	2	11	83
Гигант / Gigant	9,9	5,7	7,2	2,6	8,6	-6,3	-0,5	1,8	6,7	2,2	10,1	8,6	167,8
Армавир / Armavir	2,4	0,3	4,9	3,2	21,6	2,9	7,7	4,9	6,1	3,3	4,2	7,1	68,5
Краснодар / Krasnodar	14,2	-3,0	6,8	5,1	8,5	22,4	-0,6	-1,1	8,2	1,3	7,1	9,0	77,9
Анапа / Anapa	40,4	28,0	25,6	10,9	0,6	-2,7	-11,0	6,6	23,1	18,5	26,4	44,8	211,2
Приморско-Ахтарск / Primorsko-Ahtarsk	11,4	5,7	7,2	1,1	6,5	0,2	3,0	-6,2	5,4	1,8	8,4	10,3	54,8
Среднее / Average	9	6	7	4	6	5	-3	1	5	6	6	10	72

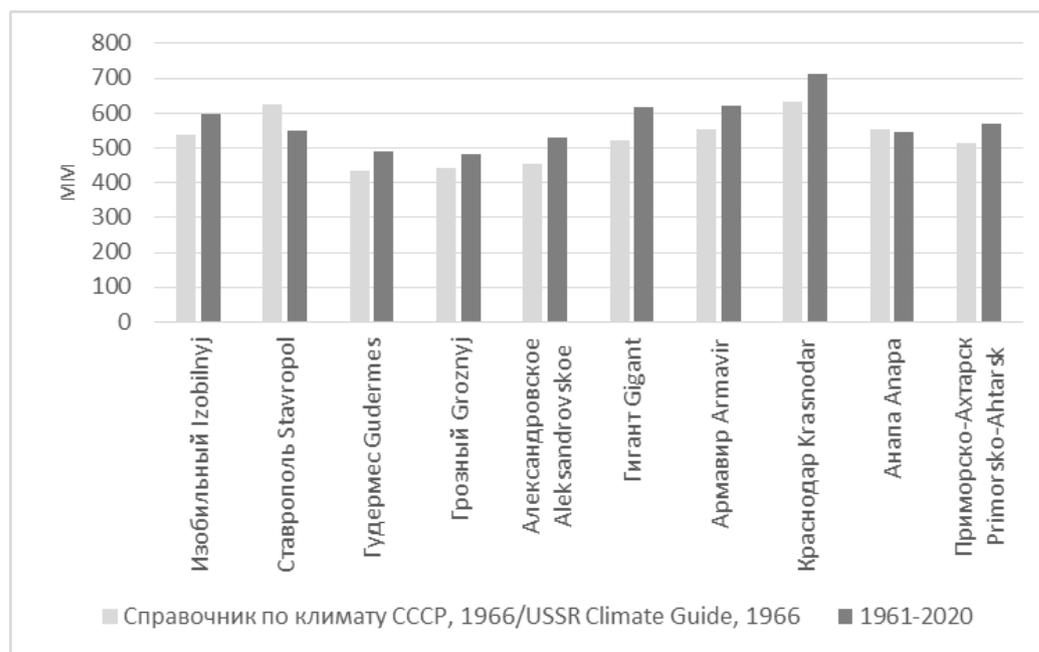


Рис. 5. Осадки за 1961–2020 гг. в сравнении с нормой /

Fig. 5. Precipitation for 1961–2020 compared to the norm

Значения гидротермического коэффициента соответствуют значениям, характерным для степи и лесостепи (от 0,7 до 1,1). Изменение ГТК за рассматриваемый период незначительно. В Ставрополе и Приморско-Ахтарске отклонение имеет отрицательную величину за счет снижения осадков вегетационного периода (табл. 6).

Таблица 6 / Table 6

**Отклонение показателей увлажнения от среднееголетнего значения за период с 1961 по 2020 гг. / Deviation of humidity indicators from the average value for the period from 1961 to 2020**

Метеорологическая станция / Weather station	Гидротермический коэффициент / 1961–2020 Hydrothermal coefficient 1961–2020	Отклонение от нормы / Deviation from the norm	Метеорологическая станция / Weather station	Гидротермический коэффициент / 1961–2020 / Hydrothermal coefficient 1961–2020	Отклонение от нормы / Deviation from the norm
Изобильный / Izobilnyj	1,0	0,10	Гигант / Gigant	0,8	0,06
Ставрополь / Stavropol	1,0	-0,3	Армавир / Armavir	1,1	0,07
Гудермес / Gudermes	0,8	0,05	Краснодар / Krasnodar	1,0	0,06
Грозный / Groznyj	0,9	0,02	Анапа / Anapa	0,7	0,11
Александровское / Aleksandrovsckoe	1,0	0,09	Приморско-Ахтарск / Primorsko-Ahtarsk	0,8	-0,08

## Выводы

В статье приведены результаты исследований по десяти метеорологическим станциям, расположенным в степных ландшафтах Северного Кавказа за период с 1961 по 2020 гг.

Установлено, что годовая температура в среднем увеличилась на 0,98°C, что повлияло на увеличение сумм активных температур, превышающих 5°C и 10°C, до 10 и 16% соответственно. Средние температуры января и июля также выросли. Претерпели изменения периоды с устойчивым переходом температуры воздуха через 0, 5 и 10°C. Годовое количество осадков в среднем выросло на 72 мм. На семи из десяти рассматриваемых метеостанциях годовой прирост осадков составил более 10%. Значение ГТК за период с 1961 по 2020 гг. варьирует в пределах 0,7–1,1, что соответствует таким ландшафтными зонам как степь и лесостепь.

Проведенная оценка позволяет говорить об улучшении условий тепло- и влагообеспечения степных ландшафтов Северного Кавказа в исследуемый период, что уже сейчас позволяет выращивать более теплолюбивые культуры, увеличивать посеvy позднеспелых видов зерновых, расширять посеvy озимых культур. Увеличение продолжительности вегетационного и безморозного периодов создает более благоприятные условия для проведения сельскохозяйственных работ и уменьшения потерь при уборке урожая.

Проведенное исследование может послужить основой для актуализации карт сельскохозяйственного районирования территории Северного Кавказа, а также для культивирования на исследуемой территории более теплолюбивых видов сельскохозяйственных растений.

## Литература

1. Аджиева А.А., Кондратьева Н.В. Изменение климата и гидрометеорологические явления в горных районах Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2009. – Т. 1. № 1. – С. 68–72.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Печатный двор, – 2020. 476 с.
3. Бадахова Г.Х., Кнутас А.В. Ставропольский край: современные климатические условия. Ставрополь: Краевые сети связи, – 2007. 272 с.
4. Залиханов М.Ч. Прогноз изменения климата, высокогорных ландшафтов и оледенения Большого Кавказа на ближайшие десятилетия. // Труды ВГИ. Вып. 62. М.: Гидрометеоиздат, – 1985. – С. 14–33.
5. Заурбеков Ш.Ш., Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В. Современный агроклиматический потенциал Чеченской Республики. // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 3. – С. 100–102.
6. Иванов Н.Н. Ландшафтно-климатические зоны земного шара. // Записки ВГО, новая серия. Т. 1. М.–Л.: Издательство АН СССР, – 1948. 224 с.
7. Кельчевская Л.С. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии. Л.: Гидрометеорологическое издательство, – 1971. 214 с.
8. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Современные климатические тренды полупустынных ландшафтов Северного Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. № 4. – С. 576–589. DOI: 10.2117/1998-4502-2021-13-4-576589.
9. Ларионов Ю.А. Изменение границ агроклиматических подрайонов в связи с изменением климата. // Эколого-географический вестник Юга России. – 2001. – № 2. – С. 104–106.

10. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменения климата на современное оледенение и сток рек северного склона Большого Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2013. – Т. 5. № 2. – С. 70–77.
11. Лурье П.М. Глобальное изменение климата и сток рек юга России. // Эколого-географический вестник Юга России. – 2002. – № 2. – С. 42–45.
12. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Науч. ред. С.М. Семёнов. – М.: Росгидромет, – 2012. 512 с.
13. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, – 2007. 487 с.
14. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 2 / Под ред. В.Ф. Проценко – Л.: Гидрометиздат, – 1966. 492 с.
15. Яицкая Н.А., Дзаганя Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.
16. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29. – pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.
17. Aryal J.P., Sapkota T.B., Khurana R., Khatri-Chhetri A., Rahut D.B., Jat M.L. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. // Environment, Development and Sustainability. – 2020. – Vol. 22. – pp. 5045–5075. DOI: 10.1007/s10668-019-00414-4.
18. Chausson A., Turner B., Seddon D., Chabaneix N., Girardin C.A.J., Kapos V., Key I., Roe D., Smith A., Woroniecki S., Seddon N. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. // Global Change Biology. – 2020. – Vol. 26. Issue 11. – pp. 6134–6155. DOI: 10.1111/gcb.15310.
19. Fawzy S., Osman A.I., Doran J., Rooney D.W. Strategies for mitigation of climate change: a review. // Environmental Chemistry Letters. – 2020. – Vol. 18. – pp. 2069–2094. DOI: 10.1007/s10311-020-01059-w.
20. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and Its mitigation strategies: a review. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13. Issue 3. – pp. – 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.
21. Malhi Y., Franklin J., Seddon N., Solan M., Turner M.G., Field C.B., Knowlton N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. // Philosophical Transactions of the Royal Society B. – 2020. – Vol. 375. Issue 1794. 20190104. DOI: 10.1098/rstb.2019.0104.

## References

1. Adzhieva A.A., Kondrateva N.V. Climate change and hydrometeorological phenomena in the mountainous regions of the Caucasus. Sustainable development of mountain territories. 2009. Vol. 1. No 1. pp. 68–72. 1. (In Russ.)
2. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Spatio-temporal climate change in the south of the European territory of Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of the agro-industrial complex. Nalchik. Pechatnyj dvor. 2020. 476 p. (In Russ.)
3. Badahova G.H., Knutas A.V. Stavropol Territory: current climatic conditions. Stavropol. Kraevye seti svyazi. 2007. 272 p. (In Russ.)
4. Zalihanov M.CH. Forecast of climate change, alpine landscapes and glaciation of the Greater Caucasus for the coming decades. In: Proceedings of the VGI. Issue 62. Moscow. Gidrometeoizdat. 1985. pp. 14–33. (In Russ.)
5. Zaurbekov Sh.Sh., Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V. Modern agro-climatic potential of the Chechen Republic. Meteorology and hydrology. 2020. No 3. pp. 100–102. (In Russ.)

6. Ivanov N.N. Landscape and climatic zones of the globe. VGO Notes, new series. Vol. 1. Moscow–Leningrad. Publishing house of the USSR Academy of Sciences. 1948. 224 p. (In Russ.)
7. Kelchevskaya L.S. Methods for processing observations in agroclimatology. Leningrad. Hydrometeorological Publishing House. 1971. 214 p. (In Russ.)
8. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Modern climatic trends of semi-desert landscapes of the North Caucasus. Sustainable development of mountain territories. 2021. Vol. 13. No 4. pp. 576–589. DOI: 10.2117/1998-4502-2021-13-4-576589. (In Russ.)
9. Larionov Yu.A. Changing the boundaries of agro-climatic sub-areas in connection with climate change. Ecological and geographical bulletin of the South of Russia. 2001. No 2. pp. 104–106. (In Russ.)
10. Lurie P.M., Panov V.D. Influence of climate change on modern glaciation and runoff of the rivers of the northern slope of the Greater Caucasus. Sustainable development of mountain territories. 2013. Vol. 5. No 2. pp. 70–77. (In Russ.)
11. Lurie P.M. Global climate change and river runoff in southern Russia. Ecological and geographical bulletin of the South of Russia. 2002. No 2. pp. 42–45. (In Russ.)
12. Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems. Ed. S.M. Semyonov. Moscow. Rosgidromet. 2012. 512 p. (In Russ.)
13. Panov V.D., Lurie P.M., Larionov Yu.A. Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow. Rostov-on-Don. Donskoy Publishing House. 2007. 487 p. (In Russ.)
14. USSR Climate Handbook. Issue 13. Part 2. Ed. V.F. Protsenko. Leningrad. Gidrometizdat. 1966. 492 p. (In Russ.)
15. Yaitskaya N.A., Dzaganian L.M., Brigida V.S. Geocological hazards in conditions of climate change in the territories of the subtropical zone of the Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)
16. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.
17. Aryal J.P., Sapkota T.B., Khurana R., Khatri-Chhetri A., Rahut D.B., Jat M.L. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment, Development and Sustainability*. 2020. Vol. 22. pp. 5045–5075. DOI: 10.1007/s10668-019-00414-4.
18. Chausson A., Turner B., Seddon D., Chabaneix N., Girardin C.A.J., Kapos V., Key I., Roe D., Smith A., Woroniecki S., Seddon N. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26. Issue 11. pp. 6134–6155. DOI: 10.1111/gcb.15310.
19. Fawzy S., Osman A.I., Doran J., Rooney D.W. Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020. Vol. 18. pp. 2069–2094. DOI: 10.1007/s10311-020-01059-w.
20. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and Its mitigation strategies: a review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 3. pp. 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.
21. Malhi Y., Franklin J., Seddon N., Solan M., Turner M.G., Field C.B., Knowlton N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2020. Vol. 375. Issue 1794. 20190104. DOI: 10.1098/rstb.2019.0104.

УДК 556.114.6

DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018

Оригинальная статья

## Сравнительная характеристика содержания алюминия и мышьяка в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров

Н.В. Реутова , Т.В. Реутова , Ф.Р. Дреева 

Кабардино-Балкарский научный центр РАН,  
Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2,  
e-mail: reutova371@mail.ru

Статья поступила: 06.03.2024, доработана: 31.03.2024, принята к публикации: 01.04.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В регионах Центрального и Западного Кавказа расположены и развиваются большие круглогодичные туристические кластеры основными источниками водоснабжения которых являются бассейны истоков рек Терек и Кубани. Это район четвертичного вулканизма, за счет деятельности которого поверхностные воды могут обогащаться целым рядом токсичных элементов. **Целью** данной работы является сравнительное изучение содержания мышьяка и алюминия в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров и определение возможных источников их поступления. **Материалы и методы.** В районе Эльбрусского вулканического центра (ЭВЦ) расположено 105 пунктов отбора проб. В районе Казбекского вулканического центра расположено 62 створа. Пробы воды отбирали в июле–августе в период интенсивного таяния ледников. Поскольку определяли только растворенную форму элементов, пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Определение содержания алюминия и мышьяка проводили с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии. Водородный показатель определяли с помощью портативного рН-метра. **Результаты работы.** В районе ЭВЦ на ранних этапах развития имел место кислый вулканизм и преобладают кислые вулканиды. Поверхностные воды нейтральные, показатель рН не превышает 8. Вулканиды Казбекского центра являются производными основных мантийных магм и значения  $\text{pH} \geq 8,0$  характерны для 30 водотоков (48,4%). Поверхностные воды Казбекского вулканического центра обеднены алюминием по сравнению с ЭВЦ. Скорее всего, это связано с целым комплексом факторов. В частности, с различиями в особенностях вулканизма – в ЭВЦ в лавы поступало верхнекоровое вещество, а в Казбекском – глубинные мантийные магмы. В районе Казбекского вулканического центра, по-видимому, происходит иммобилизация алюминия на геохимическом барьере из-за более широко распространенных карбонатных осадочных пород. Концентрации мышьяка в поверхностных водах в районе ЭВЦ (особенно в Южном Приэльбрусье) значительно выше, чем в Казбекском. Это связано с наличием геохимических аномалий.

**Ключевые слова:** геохимические аномалии, поверхностные воды, токсичные элементы, Центральный и Западный Кавказ.

**Для цитирования:** Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Сравнительная характеристика содержания алюминия и мышьяка в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018

DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018

Original paper

# Comparative characteristics of aluminum and arsenic content in the surface waters of the Elbrus and Kazbek volcanic centers

N.V. Reutova<sup>ID</sup>, T.V. Reutova<sup>ID</sup>, F.R. Dreeva<sup>ID</sup>

Kabardino-Balkar Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
2 Balkarova Str., Nalchik 360000, Russian Federation,  
e-mail: reutova371@mail.ru

Received: 06.03.2024, revised: 31.03.2024, accepted: 01.04.2024

**Abstract: Relevance.** Large year-round tourist clusters are located and developing in the regions of the Central and Western Caucasus. The main sources of water supply there are the basins of the sources of the Terek and Kuban rivers. This is an area of Quaternary volcanism, due to the activity of which surface waters can be enriched with a number of toxic elements. **Aim** of this work is a comparative study of the arsenic and aluminum content in the surface waters of the Elbrus and Kazbek volcanic centers and the identification of possible sources of their intake. **Materials and methods.** There are 105 sampling points in the area of the Elbrus Volcanic Center (EVC). 62 sampling points are located in the area of the Kazbek volcanic center. Water samples were taken in July and August during the period of intense melting of glaciers. The dissolved form of the elements was determined. That is why the samples were filtered through membrane filters with a pore size of 0.45 microns. The determination of aluminum and arsenic content was carried out using atomic absorption spectroscopy. The hydrogen index was determined using a portable pH meter. **Results.** Acid volcanism took place in the EVC area in the early stages of development and acid volcanites predominate. The surface waters are neutral, the pH does not exceed 8. The volcanites of the Kazbek center are derivatives of the main mantle magmas and pH values  $\geq 8.0$  are typical for 30 watercourses (48.4%). The surface waters of the Kazbek volcanic center are depleted of aluminum compared to the EVC. Most likely, this is due to a range of factors, in particular, with differences in the features of volcanism – upper crust matter entered the lavas in the EVC, and deep mantle magmas in the Kazbek. In the area of the Kazbek volcanic center, aluminum appears to be immobilized at the geochemical barrier due to more widespread carbonate sedimentary rocks. Arsenic concentrations in the EVC (especially in the Southern Elbrus region) are significantly higher than in Kazbek. This is due to the presence of geochemical anomalies.

**Keywords:** geochemical anomalies, surface waters, toxic elements, Central and Western Caucasus.

**For citation:** Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Comparative characteristics of aluminum and arsenic content in the surface waters of the Elbrus and Kazbek volcanic centers. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 231-243. DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018

## Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется развитию внутреннего туризма в Российской Федерации. Одними из наиболее привлекательных являются знаменитые туристические комплексы, расположенные на территории Кабардино-Балкарской Республики, Карачаево-Черкесской Республики и Республики Северная Осетия-Алания. Только Приэльбрусье в 2022 году посетили 1,2 млн туристов. На данных территориях планируется развитие больших туристических кластеров,

основными источниками водоснабжения которых являются бассейны истоков рек Терека и Кубани. Эти реки являются главным источником питьевой воды для населения Центрального и Восточного Кавказа, и от их качества зависит здоровье населения. Горные реки традиционно считаются образцово чистыми. Но следует иметь в виду, что это район четвертичного вулканизма, за счет деятельности которого поверхностные воды могут обогащаться целым рядом токсичных элементов. Также на этих территориях располагается большое количество источников, широко используемых как в бальнеологических целях, так и для питьевого водоснабжения. Поэтому изучение химического состава поверхностных вод данного региона – весьма актуальная проблема.

Целью данной работы является сравнительное изучение содержания мышьяка и алюминия в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров и определение возможных источников их поступления.

Химический состав поверхностных вод Эльбрусского вулканического центра в последнее время изучался достаточно интенсивно [Ermakov et al., 2020; Reutova et al., 2018, 2023]. Поверхностные воды Казбекского вулканического центра остаются крайне малоизученными [Гурбанов и др., 2016; Оказова, Катаева, 2015]. В данной работе впервые проведено исследование содержания алюминия и мышьяка, являющихся наиболее токсичными элементами, в поверхностных водах Казбекского вулканического центра.

## Материалы и методы

### *Описание места исследования.*

Эльбрусский и Казбекский вулканические центры были активны в четвертичном периоде и это единственные подобные центры в Европейской части России.

Эльбрус – молодой четвертичный вулкан, сформировавшийся в результате неоднократных извержений различного типа. Вулканический конус располагается на метаморфических породах и гранитоидах палеозойского возраста [Короновский и др., 2015]. Наиболее древними являются породы, обнажающиеся в обрывах ледникового цирка Уллукам в западной части Эльбруса (ранний плейстоцен). Их возраст, измеренный различными методами, составляет 620–667 тыс. лет. Предполагается, что это часть Палео-Эльбруса, сохранившаяся только на западе вулканического массива [Короновский и др., 2015; Короновский, Мышенкова, 2016].

Наиболее молодой комплекс вулканических пород – позднеплейстоценовый и голоценовый – связан с формированием Восточного конуса. Восточная вершина Эльбруса была создана голоценовыми извержениями [Короновский и др., 2011; 2015; Короновский, Мышенкова, 2016].

В восточной и южной частях Приэльбрусья расположены два разновозрастных пространственно-совмещенных вулканических центра – Тырныаузский, возникший в плиоценовое время на территории восточной и южной частей Приэльбрусья и четвертичный Эльбрусский. Время проявления магматической активности Тырныаузского центра – средний–поздний плиоцен (от ~ 3,0 до ~ 1,8 млн лет назад) [Чернышев и др., 2014].

Начало магматической активности самого Эльбрусского неовулканического центра приходится на эоплейстоценовое время (950–900 тыс. лет назад). Следующие три фазы его активности (225–170, 110–70 и менее 30 тыс. лет назад) связаны исключительно с извержениями стратовулкана Эльбрус [Чернышев и др., 2014].

Казбекский неовулканический центр (КВЦ) расположен в центральной части Большого Кавказа на границе России и Грузии в зоне Бокового (Хохского) хребта (истоки р. Терек и ее притоков). Фундаментом вулканических построек выступают осадочные горные породы юрского возраста, широко распространенные на территории высокогорья РСО-Алания. КВЦ включает в себя непосредственно вулкан Казбек, а также ряд экструзий и лавовых конусов. По данным В.А. Лебедева с соавторами [Лебедев, Вашакидзе, 2014] развитие новейшего вулканизма в пределах Казбекского центра происходило на протяжении последних 400–450 тыс. лет в течение четырех отдельных фаз. В I фазе, в конце раннего неоплейстоцена (395–435 тыс. лет назад), на месте современного конуса Казбека, вероятно, проявлял активность его вулкан-предшественник – Палео Казбек. Порода, относящиеся к этому периоду, с возрастом  $\approx 400$  тыс. лет являются самыми основными по своему составу среди всех эффузивов Казбекского центра. Извержения Палео Казбека возобновились  $\approx 250$  тыс. лет назад во II фазе активности Казбекского центра. В результате этих интенсивных извержений Палео Казбека произошло опустошение приповерхностной магматической камеры и образование кальдеры обрушения. Возобновление магматической активности в пределах Казбекского центра (III фаза) произошло примерно 120 тыс. лет назад. В результате сформировалась современная постройка Казбека, и была связана с повторным поступлением в очаг под вулканом новой порции глубинных основных магм, их смешением с находившимся там остаточным дацитовым расплавом. Заключительная, IV, фаза активности Казбекского центра связана с деятельностью нескольких вулканов-сателлитов. Их возраст составляет менее 50 тыс. лет. Предполагается, что возобновление магматической деятельности в IV фазе так же было связано с повторным поступлением глубинных расплавов в приповерхностный очаг [Лебедев, Вашакидзе, 2014].

В пределах Казбекской области выделяются три неовулканических центра, на территории которых локализованы четвертичные вулканы – Казбекский, Кельский и Джауский (Джавский). Эти центры различаются по типу и времени проявления активности и преобладающему составу продуктов извержений. Для Казбекского центра характерно образование крупных стратовулканов (Казбек и Кабарджин) с многочисленными побочными аппаратами; среди вулканитов доминируют андезиты [Лебедев, Вашакидзе, 2014]. Первые извержения здесь происходили около 450 тыс. лет назад, а последние – в середине голоцена. Четвертичный вулканизм на Кельском нагорье относится к ареальному типу и связан с образованием большого количества небольших кислых экструзий и лавовых конусов; состав эффузивов, главным образом, отвечает дацитам. Кельский центр был активен примерно 250–200 тыс. лет назад до голоцена [Лебедев, Вашакидзе, 2014].

*Пункты отбора проб.* В районе Эльбрусского вулканического центра (ЭВЦ) расположено 105 пунктов отбора проб. Из них: 37 створов в верховьях бассейна р. Кубань до 55-го км ее течения (Западное Приэльбрусье); 21 створ в верховьях бассейна р. Малка до 16-го км ее течения (Северное Приэльбрусье); 10 створов в бассейнах рек Ирик и Кыртык (Восточное Приэльбрусье, район Тырнаузского вулканического центра) и 37 створов в верховьях бассейна р. Баксан до 35-го км ее течения (Южное Приэльбрусье, район четвертичного вулканизма).

В районе Казбекского вулканического центра расположено 62 створа, 42 из которых находятся на территории самого Казбекского неовулканического центра и 20 на территории, примыкающей к Кельскому нагорью.

*Отбор проб и определение химического состава.* Пробы воды отбирали в июле–августе в период интенсивного таяния ледников. Пробы отбирали в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020. Все пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Консервацию проб осуществляли азотной кислотой (ОСЧ) из расчета 0,5% в соответствии с ГОСТ Р 57162-2016. Транспортировку и хранение проб осуществляли при температуре 2°C–5°C. Определение содержания алюминия и мышьяка проводили с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) в соответствии с ГОСТ Р 51309-99 и методикой «Количественный химический анализ вод» фирмы производителя прибора.

В пробах измеряли водородный показатель с помощью портативного рН-метра в день отбора в экспедиционных условиях, при маршрутных исследованиях в течение 24 часов.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Excel 2016.

Карты-схемы построены с использованием программного обеспечения QGIS (версия 3.28.12).

## Результаты и обсуждение

Водородный показатель оказывает значительное влияние на растворимость и миграцию элементов. Даже небольшие изменения значений рН могут изменять растворимость, скорость и формы миграции алюминия и мышьяка в значительной степени.

*Эльбрусский вулканический центр.* В западном Приэльбрусье (верховья бассейна р. Кубань, 37 створов) значения рН варьируют в широких пределах, минимальные составляют 5,95 и максимальные – 8,42. Но, самые низкие значения 5,95-6,2 характерны для источников глубинного происхождения и родников (всего шесть пунктов отбора). Максимальные значения 8-8,3 отмечены только в трех створах – р. Енукол и два ручья в бассейне р. Уллухурзук. В остальных 28 створах значения рН варьируют в основном в пределах 6,8-7,5, причем увеличиваются вниз по течению рек. Так с 8-го по 55 км течения р. Кубань минимальные значения рН изменяются с 6,65 до 7,1. Такая же закономерность наблюдается и для притоков. Чем выше расположены притоки, тем ниже значения рН.

В северном Приэльбрусье (верховья р. Малка, 21 створ) минимальные значения 5,2-6,2 также характерны для источников и родников (5 пунктов отбора проб). В остальных пунктах в основном значения рН варьируют в пределах 6,4-7,5.

В восточном Приэльбрусье (10 створов) значения рН в основном изменяются в пределах 7,3-7,7. В южном Приэльбрусье минимальные значения 6,2, максимальные 8,2. Наиболее низкие значения характерны для гляциальных потоков, стекающих с южных склонов Эльбруса и, в основном, варьируют в пределах 6,2-6,4. Высокие значения 8,0-8,2 отмечены только для одного водотока (пос. Байдаево). В бассейне р. Терскол водородный показатель колеблется в пределах 6,5-7,7. Вниз по течению р. Баксан он возрастает с 6,6 (3,2-й км) до 7,1 (35-й км). Таким образом, в Эльбрусском вулканическом центре поверхностные воды слабокислые и нейтральные, показатель рН  $\geq 8$  только в четырех створах (3,8%).

По данным А.В. Парфенова с соавторами в формировании лав Эльбрусского вулканического центра значительное участие принимало верхнекорое вещество. Под Эльбрусом произошло частичное плавление верхней коры и смешивание ее с

мантийными расплавами. Кроме того, в районе Эльбрусского вулканического центра на ранних этапах развития (3,0–1,5 млн лет назад) имел место кислый вулканизм и преобладают кислые вулканиды [Лебедев, Вашакидзе, 2014; Чернышов и др., 2014].

*Казбекский вулканический центр.* В обследованной части бассейна р. Терек значения рН изменялись от 6,7 до 8,2. Самые низкие значения отмечены только для одного ручья и одного родника в бассейне р. Геналдон. В бассейне р. Геналдон этот показатель в основном колебался в пределах 7,7-7,9; в бассейне р. Ардон – 7,5-8,3. Всего в поверхностных водах Казбекского вулканического центра значения  $\text{pH} \geq 8,0$  характерны для 14 из 42 пунктов; 7,7-7,9 – для 16 пунктов;  $\text{pH} < 7$  отмечены только в трех пунктах (р. Цейдон, родник и ручей в бассейне р. Геналдон).

*Кельское нагорье.* В бассейне р. Большая Лиахви значения  $\text{pH} < 7$  отмечены только в двух самых верхних пунктах – родник и ручей в пос. Едыс; 7,0 в р. Глидон (левый приток на 8,5 км), 7,4 в р. Каласанидон (тоже пос. Едыс). В остальных 16 створах рН варьирует в пределах 8,0-8,4.

Таким образом, в обследованных районах Казбекского вулканического центра значения  $\text{pH} < 7$  отмечены только в 5 пунктах из 62 и это родники и ручьи;  $\text{pH} \geq 8,0$  характерны для 30 водотоков (48,4%); 7,7-7,9 – для 22 пунктов (35,5%).

По данным А.В. Парфенова с соавторами Казбекский неовулканический центр расположен на пересечении двух крупнейших региональных тектонических нарушений – Главного Кавказского взброса и Казбек-Цхинвальского разлома. В результате, на этом участке литосфера проницаема для глубинных магм. В отличие от Эльбрусского вулканического центра в Казбекском имела место только ограниченная ассимиляция корового вещества. Значительную роль в происхождении казбекских вулканидов играли процессы смешения магм. В начале II, III и IV фаз в магматический очаг под Казбекским центром поступали новые порции глубинных мантийных магм базальтового состава, которые смешивались там с остаточными расплавами дацитового состава. Вулканиды Казбекского центра являются производными основных мантийных магм [Лебедев, Вашакидзе, 2014; Парфенов и др., 2019], в Эльбрусском вулканическом центре преобладают умеренно-кислые образования, а на более ранних этапах магматизма доминировали кислые [Лебедев, Вашакидзе, 2014].

*Алюминий.* Это один из самых распространенных в природе элементов, занимает третье место после кислорода и кремния. Несмотря на такое широкое распространение, алюминий оказался одним из наиболее токсичных элементов. Он оказывает негативное влияние на почки, центральную нервную систему, кости, легкие. Существует положительная корреляция между содержанием алюминия в питьевой воде и болезнью Альцгеймера. Отмечено, что риск возникновения деменции с возрастом выше у лиц, проживающих в регионах, где концентрации алюминия в питьевой воде превышали  $0,05 \text{ мг/дм}^3$ . Даже при низких уровнях поступления алюминий накапливается в организме человека и больше из него не выводится даже при смене места жительства. Биодоступность алюминия, поступающего с питьевой водой, выше, чем при поступлении из других источников. В России ПДК для питьевой воды  $0,2 \text{ мг/дм}^3$  (СанПиН 1.2.3685-21). Кларк алюминия в речной воде составляет  $50 \text{ мкг/дм}^3$  [Гордеев, 1983].

На рисунке 1 приведены карты распределения алюминия и мышьяка в поверхностных водах Эльбрусского вулканического центра. При построении карт (рис. 1, 2)

был использован принцип сравнения концентраций со среднемировым уровнем их содержания, кларками речной воды [Гордеев, 1983]. Установлены следующие градации кларков концентраций: пониженный уровень содержания при значении концентрации менее половины кларка; фоновый – от 0,5 до 2 кларков; слабо повышенный составляет 2-5 кларков; повышенный соответствует 5-10 кларкам; высокий от 10 до 50 кларков и экстремальный более 50 кларков.

В Эльбрусском вулканическом центре концентрации алюминия выше кларкового содержания отмечались в 73 створах из 105 (87,6%). В верховьях бассейна р. Кубань (Западное Приэльбрусье) в 19 створах (51,3%) концентрации алюминия превышали кларковые значения. Это бассейн р. Уллухурзук – самые верховья бассейна р. Кубань. В западной части Приэльбрусья расположены пять изолированных разновозрастных вулканических центров (рис. 1А). Предполагается, что все эти пять изолированных выходов вулканитов отвечают самостоятельным центрам извержений, не связанных с Эльбрусом [Короновский, Мышенкова, 2016]. Наиболее обогащен алюминием бассейн р. Уллухурзук. Максимальные превышения более чем в 10 раз выявлены в районе р. Битиктебе, являющейся правым притоком р. Уллухурзук. Бассейн именно этой реки расположен в непосредственной близости от одного из пяти центров извержения флюидолитов, который находится в верховьях долины Битиктебе и располагается на ее правом склоне (рис. 1А). Максимальные концентрации алюминия 1756 и 1500 мкг/дм<sup>3</sup> выявлены в двух родниках (рН=6,2 и 7,7 соответственно). Также высокие концентрации этого элемента 860 и 681 мкг/дм<sup>3</sup> характерны для трех ручьев, впадающих в р. Битиктебе и Уллухурзук (рН 7,2 и 8,1 соответственно). Все это приводит к повышению концентраций алюминия в самой р. Битиктебе (926,8 мкг/дм<sup>3</sup>, рН=7,9) и р. Уллухурзук (496,7 мкг/дм<sup>3</sup>, рН 7,0-7,9).

Верховья р. Малка (Северное Приэльбрусье) это также район четвертичного вулканизма (рис. 1А). В 19 пунктах из 21 (90,4%) концентрации этого элемента превышали кларковые значения, а в 9 пунктах и ПДК для питьевой воды концентрации 200 мкг/дм<sup>3</sup>. Содержание алюминия в них варьировало в пределах 209,5-316,0 мкг/дм<sup>3</sup>. Все створы с высоким содержанием алюминия приурочены к самым верховьям бассейна реки Малка – поляне Эммануэля и Джилы-Су. Значения рН колебались в пределах 6,9-7,5.

Концентрации алюминия в поверхностных водах бассейна р. Баксан в 35 створах (74,4%) превышали кларковые значения. Наиболее высокие концентрации более 500 мкг/дм<sup>3</sup> характерны для истока р. Баксан и р. Гарабаши (2 пункта). Обогащен алюминием бассейн р. Терскол с ее притоками (9 пунктов), а также сама р. Баксан. Значения рН для всех указанных створов варьируют в пределах 6,3–7,5. Все перечисленные реки стекают непосредственно со склонов Эльбруса. Четко прослеживается снижение концентраций вниз по течению самой р. Баксан, а также в ее притоках и родниках по мере удаления от истоков.

В гляциальных потоках ледника Гарабаши концентрации алюминия варьируют в пределах 50-80 мкг/дм<sup>3</sup>, а в самой р. Гарабаши составляют уже 531 мкг/дм<sup>3</sup>. Это свидетельствует о том, что основным источником поступления алюминия в поверхностные воды этого региона являются горные породы, а не атмосферные выпадения.

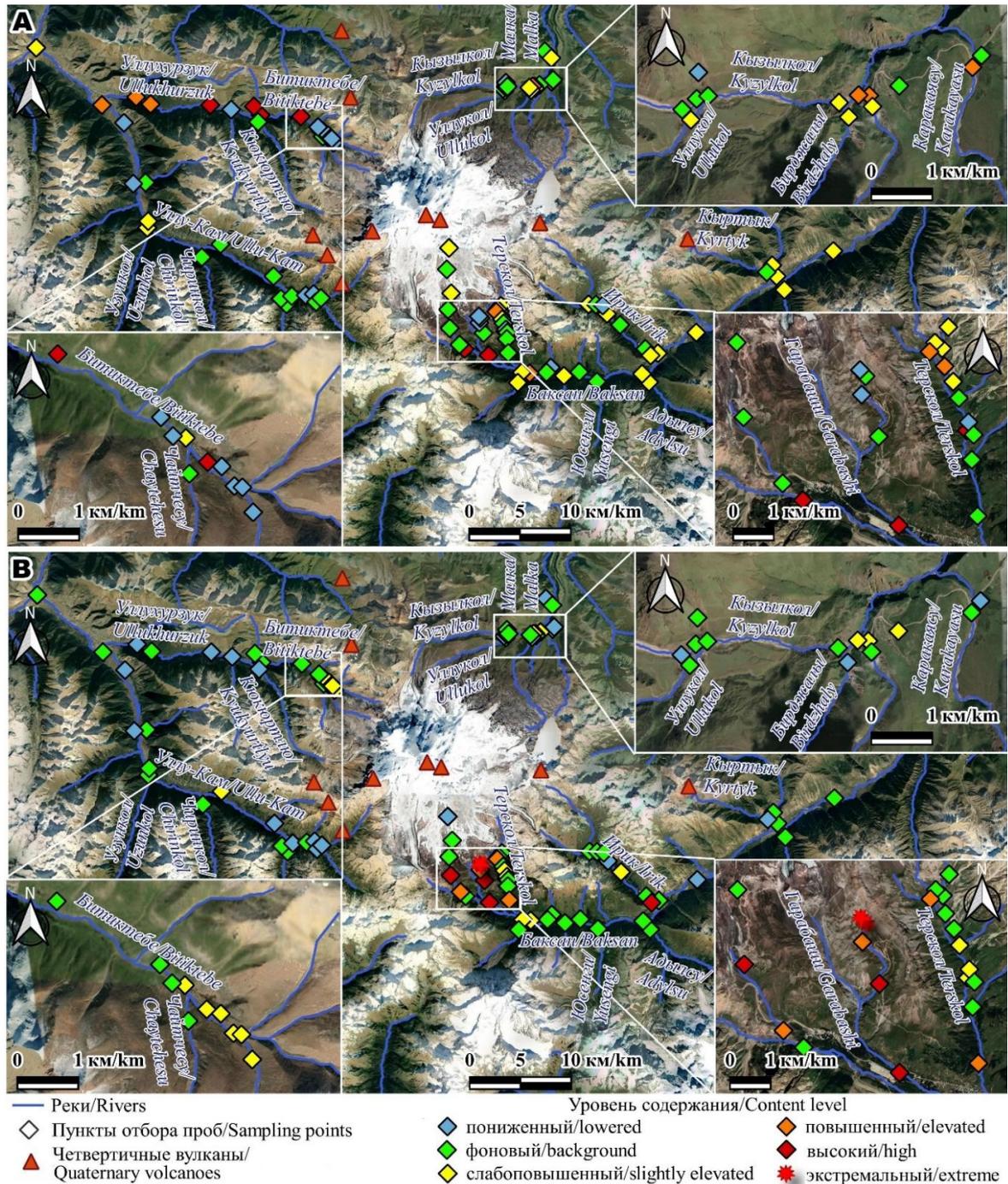


Рис. 1. Уровни содержания алюминия (А) и мышьяка (В) в поверхностных водах Эльбурского вулканического центра /

Fig. 1. Levels of aluminum (A) and arsenic (B) in the surface waters of the Elbrus Volcanic Center

В бассейне р. Терек (Казбекский вулканический центр, рис. 2А) в 17 пунктах из 42 (40,4%) концентрации алюминия превышали кларковые значения. Наибольшие концентрации отмечены в двух левых притоках р. Льядон, расположенных в пос. Ецна ( $247,7 \text{ мкг/дм}^3$ ,  $\text{pH}=8,1$ ) и пос. Сахсат ( $420,2 \text{ мкг/дм}^3$ ,  $\text{pH}=8,0$ ). Несколько большие концентрации отмечены в водах ледниковых рек Терек и Ардон. Также сравнительно более высокие концентрации алюминия отмечены в родниках бассейна р. Геналдон.

В бассейне р. Большая Лиахви (Кельское нагорье, рис. 2А) в 8 пунктах из 20 (40,0%) содержание алюминия в поверхностных водах превышало кларковые значения. Наибольшая концентрация отмечалась в р. Каласанидон, где она составила 392,2 мкг/дм<sup>3</sup> (рН=7,4).

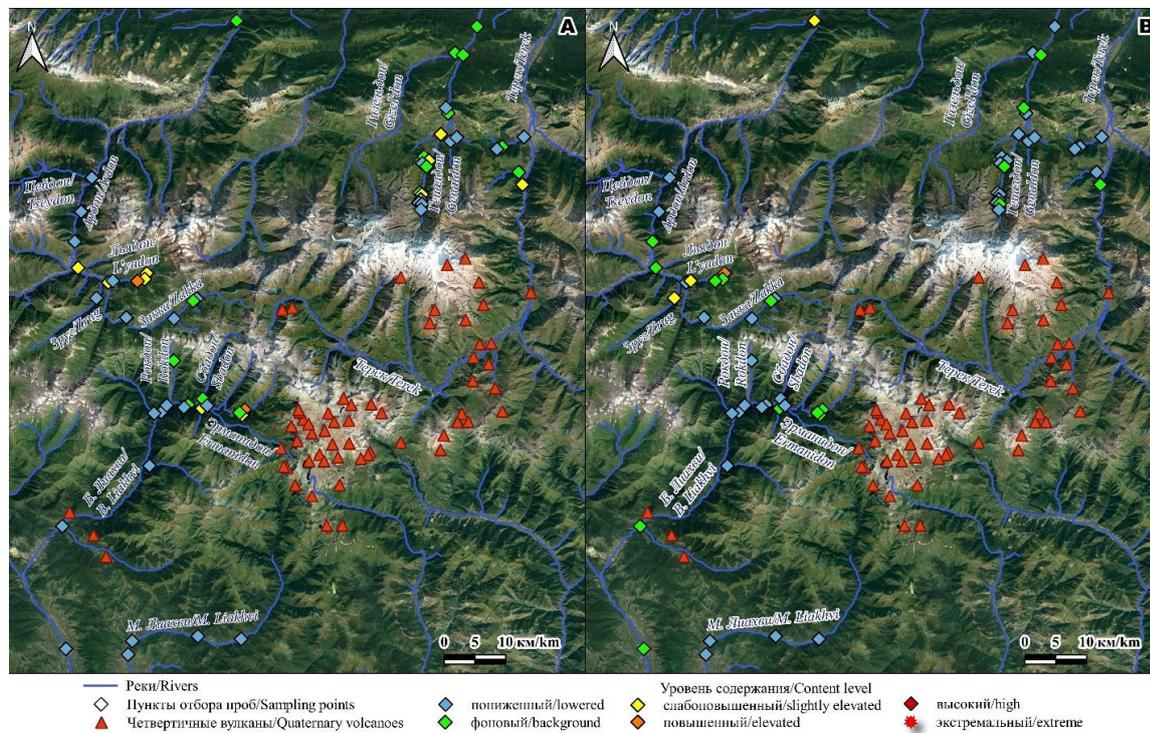


Рис. 2. Уровни содержания алюминия (А) и мышьяка (В) в поверхностных водах Казбекского вулканического центра /

Fig. 2. Levels of aluminum (A) and arsenic (B) in the surface waters of the Kazbek Volcanic Center

Таким образом, поверхностные воды Казбекского вулканического центра обесчелены алюминием по сравнению с ЭВЦ (рис. 1А, 2А). Всего в 25 пунктах из 62 (40,3%) они не более чем в два раза превышали кларковые значения. Скорее всего, это связано с целым комплексом факторов. В частности, с различиями в особенностях вулканизма – в ЭВЦ в лавы поступало верхнекоровое вещество, а в Казбекском – глубинные мантийные магмы. В ЭВЦ преобладают умеренно-кислые образования, а на более ранних этапах магматизма доминировали кислые. В Казбекском – основные базальты. Растворимость соединений алюминия уменьшается с увеличением рН. В ЭВЦ воды нейтральные, а в верховьях, где отмечены самые высокие концентрации алюминия, слабокислые, в Казбекском – слабощелочные. Миграционная активность алюминия заметно увеличивается даже при изменении рН в небольших пределах, и уже при достижении значений рН=6,6 содержание алюминия в речных водах превышает ПДКрыб.хоз. (Савенко, Савенко, 2018б). В районе Казбекского вулканического центра, по-видимому, происходит иммобилизация алюминия на геохимическом барьере из-за более широко распространенных карбонатных осадочных пород (Савенко, Савенко, 2018а).

**Мышьяк.** Является одним из самых токсичных элементов для всех групп живых организмов. По данным ВОЗ он вызывает как канцерогенные, так и неканцерогенные заболевания. Концентрации мышьяка в питьевой воде  $\geq 50$  мкг/дм<sup>3</sup> являются

причиной возникновения рака легких, печени, почек, мочевого пузыря и кожи. Наличие мышьяка в питьевой воде в концентрациях  $\geq 5$  мкг/дм<sup>3</sup> приводит к снижению IQ у детей и наличию мышьяковой нейропатии у взрослых. ПДК для питьевой воды составляет 10 мкг/дм<sup>3</sup>, кларк для речной воды 2 мкг/дм<sup>3</sup>.

В ЭВЦ концентрации мышьяка, превышающие кларковые значения, отмечены в 51 створе (48,6%). Содержание мышьяка в поверхностных водах верховий р. Кубань в 14 створах из 37 превышало кларковые значения (рис. 1В). Причем пять из этих створов родники. Еще три водотока с повышенным содержанием мышьяка – р. Битиктебе, ее исток и поток с перевала Пали-Баши – берут свое начало со склонов Эльбруса. В верховьях бассейна р. Малка содержание мышьяка более чем в половине створов было ниже кларковых значений (рис. 1В). Более высокие концентрации характерны для ряда источников, расположенных в самых верховьях реки, и для небольших рек, расположенных в том же районе.

В верховьях бассейна р. Баксан в 32 створах (86,5%) концентрации мышьяка выше кларковых значений, что указывает на обогащение поверхностных вод этого региона мышьяком (рис. 1В). Очень высокие концентрации до 8 ПДК для питьевой воды характерны для р. Гарабаши и водопада Девичьи косы (южные склоны Эльбруса), являющихся популярными рекреационными объектами. Чрезвычайно высокие концентрации мышьяка до 23 ПДК обнаружены в истоках водопада Девичьи косы, имеющих подземное происхождение. В водопаде Азау и водопаде Терскол концентрации мышьяка достигают 15,31 и 31,52 мкг/дм<sup>3</sup> соответственно. Также высокие концентрации мышьяка характерны для родника (14,01 мкг/дм<sup>3</sup>), расположенного в бассейне р. Терскол. Все это приводит к повышенному содержанию мышьяка в водах верховий р. Баксан. В талых водах языка ледника Гарабаши средняя концентрация мышьяка невысокая, не превышает 2 мкг/дм<sup>3</sup>. Эти концентрации значительно ниже тех, которые характерны для водотоков, стекающих с южных склонов Эльбруса. Следовательно, обогащение этих вод связано не с атмосферными выпадениями.

В Казбекском вулканическом центре в верховьях бассейна р. Терек концентрации мышьяка оказались очень низкими, в основном не превышали 1 мкг/дм<sup>3</sup>, что значительно ниже кларковых значений (рис. 2В). Только в водах р. Ардон (6,60 мкг/дм<sup>3</sup> и 6,37 мкг/дм<sup>3</sup>) и двух ее притоков (р. Льядон – 8,23 и 10,00 мкг/дм<sup>3</sup>) концентрации этого элемента значительно выше, что может быть связано с наличием множественных месторождений и проявлений металлических руд различных рангов.

Концентрации мышьяка в районе Кельского нагорья крайне низкие и варьируют в пределах 0,2-1,99 мкг/дм<sup>3</sup>, что в 1,1-10 раз ниже кларковых значений (рис. 2В). Только в источнике Багиат они составляют 4 ПДК для питьевой воды.

Таким образом, концентрации мышьяка в водах ЭВЦ (особенно в Южном Приэльбрусье) значительно выше, чем в Казбекском (рис. 1В, 2В). Это связано с наличием геохимических аномалий, а именно рудопоявление Азау мышьяковое, расположенное в двух километрах выше пос. Терскол. Оно представлено тремя рудными зонами: Северной, Центральной и Восточной. По данным Объяснительной записки к Государственной геологической карте содержание мышьяка в этих зонах достигает 9,52-10%. Основные рудные минералы – реальгар и аурипигмент, образующиеся при вулканических извержениях. Для жителей, получающих питьевую воду из скважин, расположенных у южного подножия Эльбруса, канцерогенный риск для взрослых составил  $4,51 \times 10^{-4}$ , который неприемлем для населения в целом.

Неканцерогенный риск составил 1,00 – риск предельно допустимый, вызывающий беспокойство [Reutova et al., 2023]. В Казбекском вулканическом центре подобных аномалий нет. Влияние наличия геохимических аномалий на компоненты ландшафтов отмечали и другие авторы [Парада, 2018].

### Выводы

1. Поверхностные воды Эльбрусского вулканического центра являются более кислыми по сравнению с водами Казбекского вулканического центра, что связано с особенностями формирования горных пород. Вулканиды Казбекского центра являются производными основных мантийных магм, а в Эльбрусском вулканическом центре преобладают умеренно-кислые образования, на более ранних этапах магматизма доминировали кислые.

2. В ЭВЦ содержание алюминия в поверхностных водах выше, чем в Казбекском, что, по-видимому, связано с особенностями вулканизма в этих областях. В районе Казбекского вулканического центра, по-видимому, происходит иммобилизация алюминия на геохимическом барьере из-за более широко распространенных здесь карбонатных осадочных пород.

3. Обогащение поверхностных вод ЭВЦ мышьяком связано с наличием геохимических аномалий, образовавшихся в результате вулканической деятельности. Концентрации мышьяка в питьевой воде могут угрожать здоровью населения, но не туристов, кратковременно пребывающих в данном районе Южного Приэльбрусья. В Казбекском вулканическом центре таких аномалий нет и концентрации мышьяка в поверхностных водах в основном ниже кларковых значений для речных вод.

### Литература

1. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М: Наука, – 1983. 160 с.
2. Гурбанов А.Г., Винокуров С.Ф., Газеев В.М., Лексин А.Б., Лолаев А.Б., Дзэбоев С.О., Оганесян А.Х., Цуканова Л.Е., Гурбанова О.А. Содержание макро- и микроэлементов в поверхностных водотоках в районе деятельности Садонского свинцово-цинкового комбината (Республика Северная Осетия-Алания, РФ). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2016. – Т. 16. № 2. – С. 42–54.
3. Короновский Н.В., Демина Л.И., Мышенкова М.С. Флюидолиты северного Приэльбрусья. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2011. – № 1. – С. 8–14.
4. Короновский Н.В., Мышенкова М.С., Брянцева Г.В. Вулкан Эльбрус, Северный Кавказ. // Жизнь Земли. – 2015. – Т. 37. – С. 12–20.
5. Короновский Н.В., Мышенкова М.С. Строение западного склона вулкана Эльбрус и Приэльбрусья. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 2. – С. 60–73.
6. Лебедев В.А., Вашакидзе Г.Т. Четвертичные вулканы Большого Кавказа и их каталогизация на основе геохронологических, вулканологических и изотопно-геохимических данных. // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 2. – С. 29–45. DOI: 10.7868/S0203030614020047.
7. Оказова З.П., Катаева М.В. Изменение удельного комбинаторного индекса загрязненности воды реки Терек Республики Северная Осетия-Алания. // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 12. – С. 150–154.
8. Парада С.Г. Закономерности размещения цветных и благородных металлов в пределах Малкинского ультрабазитового массива (Кабардино-Балкарская Республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 1. – С. 69–78.
9. Парфенов А.В., Лебедев В.А., Чернышев И.В., Вашакидзе Г.Т., Якушев А.И., Гольцман Ю.В., Чугаев А.В., Олейникова Т.И., Канунникова Е.М., Габарашвили К.А. Петроло-

го-геохимические характеристики лав, источники и эволюция магматических расплавов Казбекского неовулканического центра (Большой Кавказ). // *Петрология*. – 2019. – Т. 27. № 6. – С. 658–689. DOI: 10.31857/S0869-5903276658-689.

10. Савенко А.В., Савенко В.С. Иммобилизация алюминия на карбонатном геохимическом барьере. // *Научные технологии*. – 2018а – Т. 19. № 1. – С. 44–47.

11. Савенко А.В., Савенко В.С. Кислотная мобилизация алюминия из минералов и горных пород. // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. – 2018б. – № 5. – С. 79–83.

12. Чернышев И.В., Бубнов С.Н., Лебедев В.А., Гольцман Ю.В., Байрова Э.Д., Якушев А.И. Два этапа эксплозивного вулканизма Приэльбрусья: геохронология, петрохимические и изотопно-геохимические характеристики вулканитов и их роль в неоген-четвертичной истории Большого Кавказа. // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. – 2014. – Т. 22. № 1. – С. 100–130.

13. Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Degtyarev A.P., Danilova V.N., Gulyaeva U.A., Dogadkin D.N. Formation of Biogeochemical Anomalies in the Baksan River Basin. // *Geochemistry International*. – 2020. – Vol. 58. – No. 10. – pp. 1097–1109. DOI: 10.1134/S0016702920100067.

14. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M., Kerimov A.A. Features of aluminum concentrations in rivers of the mountain zone of the Central Caucasus. // *Russian Journal of General Chemistry* – 2018. – Vol. 88. No. 13. – pp. 2884–2892. DOI: 10.1134/S1070363218130091.

15. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Arsenic in Surface Waters in the Central Part of the North Caucasus and Correspondent Health Risk Assessment. // *Geography, Environment, Sustainability* – 2023. – Vol. 4. No. 16. – pp. 52–62. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-2748.

## References

1. Gordeev V.V. River flow into the ocean and the features of its geochemistry. Moscow. Nauka. 1983. 60 p. (In Russ.)

2. Gurbanov A.G., Vinokurov S.F., Gazeev V.M., Laksin A.B., Lolaev A.B., Dzeboev S.O., Oganessian A.H., Tsukanova L.E., Gurbanova O.A. The content of macro- and microelements in surface watercourses in the area of activity of the Sadon lead-zinc industrial complex (Republic of North Ossetia-Alania, Russian Federation). *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2016. Vol. 16. No. 2. pp. 42–54. (In Russ.)

3. Koronovsky N.V., Demina L.I., Myshenkova M.S. Fluidolites of the northern Elbrus region. *Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology*. 2011. No. 1. pp. 8–14. (In Russ.)

4. Koronovsky N.V., Myshenkova M.S., Bryantseva G.V. Volcano Elbrus, North Caucasus. *Zhizn Zemli (Life of the Earth)*. 2015. Vol. 37. pp. 12–20. (In Russ.)

5. Koronovsky N.V., Myshenkova M.S. Geological feature of the western slope of the Elbrus volcano and Prielbrusye. *Geology and geophysics of Russian South*. 2016. No. 2. pp. 60–73. (In Russ.)

6. Lebedev V.A., Vashakidze G.T. Quaternary volcanoes of the Greater Caucasus and their cataloging based on geochronological, volcanological and isotope-geochemical data. *Volcanology and Seismology*. 2014. No. 2. pp. 29–45. DOI: 10.7868/S0203030614020047 (In Russ.)

7. Okazova Z.P., Kataeva M.V. Change in the specific combinatorial index of water pollution of the Terek River of the Republic of North Ossetia-Alania. *Advances in current natural sciences*. 2015. No. 12. pp. 150–154. (In Russ.)

8. Parada S.G. Density regularities of the colored and noble metals in the borders of the Malkin ultrabasic massive (Kabardino-Balkarian Republic). *Geology and geophysics of Russian South*. 2018. No. 1. pp. 69–78. (In Russ.)

9. Parfenov A.V., Lebedev V.A., Chernyshev I.V., Vashakidze G.T., Yakushev A.I., Goltsman Yu.V., Chugaev A.V., Oleinikova T.I., Kanunnikova E.M., Gabarashvili K.A. Petrological-

geochemical characteristics of lavas, sources and evolution of magmatic melts of the Kazbek neovolcanic center (Greater Caucasus). *Petrology*. 2019. Vol. 27. No. 6. pp. 658–689. DOI: 10.31857/S0869-5903276658-689 (In Russ.)

10. Savenko A.V., Savenko V.S. Immobilization of aluminum at the carbonate geochemical barrier. *High-tech technologies*. 2018. Vol. 19. No. 1. pp. 44–47. (In Russ.)

11. Savenko A.V., Savenko V.S. Acid mobilization of aluminum from minerals and rocks. *Moscow University Geology Bulletin*. 2018. No. 5. pp. 79–83. (In Russ.)

12. Chernyshev I.V., Bubnov S.N., Lebedev V.A., Goltsman Yu.V., Bairova E.D., Yakushev A.I. Two stages of explosive volcanism of the Elbrus region: geochronology, petrochemical and isotope-geochemical characteristics of volcanites and their role in the Neogene-Quaternary history of the Greater Caucasus. *Stratigraphy. Geological correlation*. 2014. Vol. 14. No. 1. pp. 100–130. (In Russ.)

13. Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Degtyarev A.P., Danilova V.N., Gulyaeva U.A., Dogadkin D.N. Formation of Biogeochemical Anomalies in the Baksan River Basin. *Geochemistry International*. 2020. Vol. 58. No. 10. pp. 1097–1109. DOI: 10.1134/S0016702920100067.

14. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M., Kerimov A.A. Features of aluminum concentrations in rivers of the mountain zone of the Central Caucasus. *Russian Journal of General Chemistry*. 2018. Vol. 88. No. 13. pp. 2884–2892. DOI: 10.1134/S1070363218130091.

15. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Arsenic In Surface Waters In The Central Part Of The North Caucasus And Correspondent Health Risk Assessment. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. Vol. 4. No. 16. pp. 52–62. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-2748.

## 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 помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$  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 Russian South» publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1 General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4 Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6 Hydrogeology; 1.6.9 Geophysics; 1.6.10 Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11 Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields; 1.6.12 Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20 Geoinformatics, cartography; 1.6.21 Geoecology; 2.8.6 Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8 Geotechnology, mining machines and related scientific directions.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes:

– articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

#### Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <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 Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),
- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

## The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$ , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements ( $\text{H}_2\text{O}$ ) and measurement units ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ ) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and  $\nu$ , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for

the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova Str., Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal « Geology and Geophysics of Russian South». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76 40 56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА  
ЮГА РОССИИ  
(№ 2. 2024 г. Том 14)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 21.06.2024 г. Дата фактического выхода 29.06.2024 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 29,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 52.

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