

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 2 / 2023



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 13
№ 2 / 2023**

Владикавказ 2023

**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.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, 2023

Фото на обложке – Над Кармадонскими воротами (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., Geophysi-
cal 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, 2023

Cover photo – Above the Karmadon gate (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Черкашин В.И. О месте пород тоханской серии в структуре зоны Передового хребта Северного Кавказа.....	6
ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Данилова Е.А., Белоглазова Н.А. Изучение магнитных аномалий юго-восточной части Русской платформы и их связи с радиально-концентрическими структурами фундамента	17
Маркин М.Ю. Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан)	29
ГЕОФИЗИКА	
Вольфман Ю.М. Динамика изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины в моделях сейсмогенеза	40
Заалишвили В.Б., Музаев И.Д. Один эффективный метод решения начально-краевых задач поперечных колебаний балки с учетом ее внутреннего сопротивления	55
Чернов Ю.К. Об оценках спектров колебаний и спектральных характеристик грунтов для вероятностного анализа сейсмической опасности территорий	67
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Гусев А.И. Типизация эпitherмальных золото-серебряных систем Большого Кавказа	82
Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса.....	95
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Попков В.И., Попков И.В. О сохранении поровых коллекторов в нижней части разреза нефтегазоносных отложений триаса Скифско-Туранской платформы	106
ГЕОЭКОЛОГИЯ	
Яицкая Н.А., Дзаганя Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа.....	118
Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В., Майсурадзе М.В. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом.....	133
ГЕОГРАФИЯ	
Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Геологический и этнокультурный туризм: перспективы сопряженного развития на Северо-Восточном Кавказе.....	149
ГЕОИНФОРМАТИКА	
Погорелов А.В., Липилин Д.А. Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея)	161
ЮБИЛЕИ	
Алборову Ивану Давыдовичу – 80 лет!	180

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Cherkashin V.I.

On the Place of the Tokhanian Series Rocks in the Structure of the Peredovoi Ridge Zone in the North Caucasus 6

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Danilova E.A., Beloglazova N.A.

Study of magnetic anomalies of the southeastern part of the Russian Platform and their connection with the radial-concentric structures of the foundation 17

Markin M.Yu.

Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan) 29

GEOPHYSICS

Volfman Yu.M.

Dynamics of changes in the stress-strain state of the Earth's crust of the Black Sea Basin in models of seismogenesis 40

Zaalishvili V.B., Muzaev I.D.

One effective method for solving initial-boundary problems of transverse vibrations of a beam, taking into account its internal resistance 55

Chernov Y.K.

On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories 67

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS,
MINERAGENCY**Gusev A.I.**

Typization of epithermal gold-silver systems of Greater Caucasus 82

Parada S.G., Hamburg K.Yu

Ore-magmatic Systems of Eastern Donbass 95

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

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 106

GEOECOLOGY

Yaitskaya N.A., Dzaganii L.M., Brigida V.S.

Geoecological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone 118

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 133

GEOGRAPHY

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

Geological and ethnocultural tourism: prospects for interrelated development in the North-Eastern Caucasus 149

GEOINFORMATICS

Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Yarotskaya E.V.

GIS analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network in the Azov-Kuban plain (Eya river basin) 161

JUBILEE

Alborov Ivan Davydovich is 80 years old! 180

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК:551.24

DOI: [10.46698/VNC.2023.27.18.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.27.18.001)

Оригинальная статья

О месте пород тоханской серии в структурной
зоне Передового хребта Северного КавказаВ.Л. Омельченко¹, Г.В. Рябов², В.И. Черкашин³

¹ОАО «Севкавгеология», Россия, 357000, г. Ессентуки, ул. Попова, 49,
e-mail: vlomelchenko.geo@gmail.com;

²Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский
политехнический институт) имени М.И. Платова, Россия, 346428, Ростовская обл.,
г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, e-mail: georg.riabov@yandex.ru;

³Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра
Российской Академии наук, Россия, 367030, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 75, e-mail: dangeo@mail.ru

Статья поступила: 10.04.2023, доработана: 18.05.2023, одобрена к публикации: 26.05.2023

Резюме: Актуальность работы. После выявления на Кавказе в начале 70-х годов XX века тектонических покровов стало понятно, что последовательность ниже(?) и среднепалеозойских пород древнего ядра Большого Кавказа является тектоно-стратиграфической и образует аккреционную колонну. Считалось, что в современном виде она была сформирована в главную фазу герцинского орогенеза и представлена несколькими системами тектонических покровов. В работах кавказских геологов 70–80-х годов (Баранов, Греков и др.) в зоне Передового хребта (ЗПХ) описана такая вертикальная последовательность комплексов пород (сверху вниз): 1) Система покровов сиалического аллохтона; 2) Система верхних покровов; 3) Система средних покровов; 4) Система нижних покровов. В основании этой колонны помещались кристаллические образования Блыбского комплекса, считавшиеся предположительно автохтонными. Позже В.Л. Омельченко было показано, что последние могут рассматриваться как крупный фрагмент самого верхнего, сиалического, аллохтона. В процессе послегерцинских тектонических событий он был оторван от Ацгаринского покрова и пододвинут под систему средних покровов вместе с расположенными структурно ниже образованиями офиолитового комплекса из Марухского покрова. **Цель работы.** Обобщить и проанализировать фондовые и опубликованные данные по тектоно-стратиграфическому строению ЗПХ и определить положение пород тоханской серии в ней. **Методы работы.** Комплексный анализ ранее проведенных полевых работ и опубликованных данных по структуре ЗПХ. **Результаты работы.** По нашему мнению, филлитовидные сланцы Тоханского покрова, занимающие в современной аккреционной колонне нижнее положение, ранее, непосредственно после герцинских процессов, могли располагаться либо гораздо выше, относясь к системе верхних покровов, или, скорее, латерально-удаленно, на значительном расстоянии от известной нам герцинской колонны покровов, как предполагал Е.В. Хаин. Позже, в результате индосинийского тектогенеза ($T_3-J_1^1$), они, как и породы Блыбского комплекса, были пододвинуты под вулканиты девона. Пододвигание сланцев происходило иногда даже совместно с запечатывающими позднее герцинскими молассаами (бассейн р. Чучкур), а в других местах (рр. Уруп, Б. Лаба) – вместе с многочисленными телами верхнепалеозойских инъективных магматитов, не проникающими в перекрывающие покровы. При этом, имело место дополнительное расчешуивание, описанное Ю.В. Карнаухоном – во вновь образованных тектонических пластинах сочетаются филлитовидные сланцы Тоханского покрова (внизу) и вулканиты Кизилкольского (на западе – Лабино-Зараусского) покрова (вверху). Всё это указывает на важную роль послегерцинских (индосинийских) перемещений, выразившихся в двусторонних поддвигах, существенно усложняющих покровную структуру ЗПХ.

Ключевые слова: Северный Кавказ, зона Передового хребта, аккреционная колонна, Ацгаринский, Тоханский, Марухский, Кизилкольский (Лабино-Зараусский) покровы, Блыбский комплекс, поддвижки, герцинская складчатость, индосинийская складчатость.

Для цитирования: Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Черкашин В.И. О месте пород тоханской серии в структуре зоны Передового хребта Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 6-16. DOI: 10.46698/VNC.2023.27.18.001.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

[DOI: 10.46698/VNC.2023.27.18.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.27.18.001)

Original papers

On the place of rocks of the Tokhanian series in the structural zone of the Peredovoi Ridge of the North Caucasus.

V.L. Omelchenko¹, G.V. Ryabov², V.I. Cherkashin³

¹Open Joint Stock Company "Sevkavgeologiya", 49 Popova Str.,
Essentuki 357000, Russia Federation, e-mail: vlomelchenko.geo@gmail.com;

²Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute),
132 Prosveshcheniya Str., Rostov region, Novocherkassk 346428, Russian Federation,
e-mail: georg.riabov@yandex.ru;

³Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
75 Yaragskiy str., Makhachkala 367030, Republic of Dagestan, Russian Federation,
e-mail: dangeo@mail.ru

Received: 10.04.2023, revised: 18.05.2023, accepted: 26.05.2023

Abstract. Relevance. After the discovery of tectonic covers in the Caucasus in the early 1970s, it became clear that the sequence of Lower (?) and Middle Paleozoic rocks of the ancient core of the Greater Caucasus is tectonic-stratigraphic and forms an accretionary column. It was believed that in its modern form it was formed during the main phase of the Hercynian orogeny and is represented by several systems of tectonic sheets. In the works of Caucasian geologists of the 1970s and 1980s (Baranov, Grekov, and others), the following vertical sequence of rock complexes was described in the Peredovoi Ridge (ZPR) zone (from top to bottom): 1) Integument system of sialic allochthon; 2) Top cover system; 3) System of medium covers; 4) The system of the lower covers. At the base of this column were placed crystalline formations of the Blybsky complex, which were considered presumably autochthonous. Later V.L. Omelchenko, it was shown that the latter can be considered as a large fragment of the uppermost, sialic, allochthon. In the process of post-Hercynian tectonic events, it was torn off from the Atsgaranappe and pushed under the system of middle nappes together with the structurally lower formations of the ophiolite complex from the Marukhnappe. **Aim.** To summarize and analyze the stock and published data on the tectonic-stratigraphic structure of the ZPH and determine the position of the rocks of the Tokhan series in it. **Methods.** Comprehensive analysis of previously conducted field work and published data on the structure of the ZPH. **Results.** In our opinion, the phyllite-like shales of the Tokhannappe, which occupy the lower position in the modern accretionary column, earlier, immediately after the Hercynian processes, could have been located either much higher, belonging to the system of the upper covers or, rather, laterally-remotely, at a considerable distance from the known Hercynian columns of covers, as suggested by E.V. Khain. Later, as a result of the Indosiniantectogenesis (T3-J11), they, like the rocks of the Blybsky complex, were pushed under the Devonian volcanic rocks. The underthrusting of shales sometimes even occurred together with sealing Late Hercynian molasses (the Chuchkur river basin), and in other places (the Urup and B. Laba rivers) together with numerous bodies of Upper Paleozoic injective magmatites that did not penetrate into the overburden. At the same time, there was an additional combing described by Yu.V. Karnaukh – in the newly formed tectonic plates, phyllite-like shales of the Tokhan cover (below) and volcanic rocks of the Kizilkol (in the west – Labino-Zarausky) cover (top) are combined. All this points to the important role of post-Hercynian (Indo-Sinian) displacements, expressed in bilateral underthrusts, significantly complicating the cover structure of the ZPH.

Keywords: Northern Caucasus, zone of the Peredovoi Ridge, accretionary column, Atsgarinsky, Tokhansky, Marukhsky, Kizilkolsky (Labino-Zaraussky) nappes, Blybsky complex, underthrusts, Hercynian orogeny, Indosinian orogeny.

For citation: Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. On the Place of the Tokhanian Series Rocks in the Structure of the Peredovoi Ridge Zone in the North Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 6-16. DOI: 10.46698/VNC.2023.27.18.001.

Введение

До середины 70-х годов видимая последовательность стратифицированных образований нижнего(?)-среднего палеозоя и докембрия (?) древнего ядра Большого Кавказа считалась нормальной стратиграфической. Позже работами кавказских геологов [Khain, 1974; Греков и др., 1974; Белов, Омельченко, 1976; Баранов, Греков, 1978, 1980; Belov et al., 1978; Adamia et al., 1977, 1980; Knipper, Khain, 1981] было установлено аккреционное покровно-складчатое строение древнего ядра Большого Кавказа.

Широкое развитие дислокаций, образовавшихся под воздействием сил бокового сжатия при формировании структуры мобильных поясов, убедительно доказано работами как российских, так и зарубежных геологов [Милановский, Хаин, 1961; Гиоргобиани, 2020; Попков В.И., Попков И.В., 2023; Чотчаев и др., 2021; Borderie et al., 2019; Carola et al., 2015; Jourdon et al., 2020].

Основную роль в формировании аккреционной колонны покровов на Северном Кавказе играл герцинский тектогенез с последующими существенными индосинийскими и более молодыми усложнениями [Омельченко и др., 2017].

В работах Г.И. Баранова, И.И. Грекова [1978, 1980 и др.] герцинские покровы объединяются в рамках всего древнего ядра в пять систем, описание которых приводится ниже. Наиболее подробно они изучены в зоне Передового хребта (ЗПХ) – удлиненного геоблока, расположенного между тектоно-формационными зонами Главного хребта (ЗГХ) на юге и Карачаево-Черкесской (КЧЗ) на севере (рис. 1).

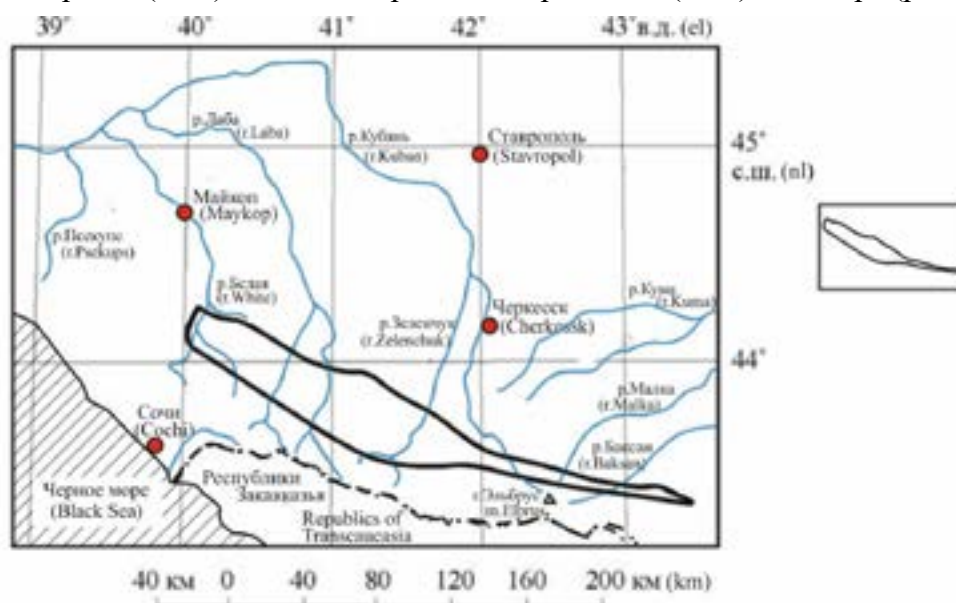


Рис. 1. Положение зоны Передового хребта на территории Северного Кавказа.

□ – контур зоны Передового хребта /

Fig. 1. The position of the zone of the Front Range in the territory of the North Caucasus.

□ – the contour of the Front Range zone

Герцинские покровы, в рамках всего древнего ядра, объединены в пять систем.

1. *Ацгаринский покров* представлен несколькими тектоническими пластинами, слагающимися слюдяными сланцами с гранатом и ставролитом, микрогнейсами, гнейсами, метаэктогитами (?), метаграувакками, амфиболитами-амфиболовыми сланцами, графитистыми филлитами. Возраст пород предположительно допалеозойский (возможно, палеозойский).

2. *Марухский покров* сложен преимущественно породами офиолитовой ассоциации и сопутствующими им образованиями и представлен двумя тектоническими пластинами со сходной литологией – Касаевской (нижней) и Карабекской (верхней). Они рассматривались как шарьированный реликт океанической коры Палеотетиса. Предполагаемый возраст пород – нижний-средний палеозой. Вулканиды офиолитовой триады относятся к толеитовой серии, её гипербазиты являются изменёнными гарцбургитовыми перидотитами.

3. *Кизилкольский покров* образован островодужными девон-нижнетурнейскими толщами известково-щелочных и толеитовых вулканидов, вулканогенно-осадочных отложений и терригенно-карбонатных толщ. В последних работах В.Л. Омельченко он был разделён на два самостоятельных покрова, довольно резко различающиеся по литологии их нижней, вулканогенной, части. Карачаевская серия (восточная часть ЗПХ) с набором последовательно дифференцированных известково-щелочных вулканидов образует собственно Кизилкольский покров; урупская серия, представленная контрастно-дифференцированной формацией (толеитовой – в нижней части и известково-щелочной – в верхней), отнесена к Лабино-Зараусскому покрову, залегающему, как установлено нами, структурно выше.

4. *Тоханский покров* сложен преимущественно терригенными осадками. В нижней (девонской), большей части, это преобладающие алевропелиты с прослоями граувакковых песчаников, в целом – с гипербазитовым геохимическим профилем. Это – андрюкская свита (на западе ЗПХ) и артыкчатская (на востоке), мощность каждой из них превышает 1000 м. Последняя подстилается эйфельской олистостромовой (полянской) свитой. Верхняя часть покрова образована преимущественно псаммитовыми осадками (слюдистые кварцевые песчаники, иногда красноватые), выделяемыми в тоханскую свиту (турне), здесь не рассматриваемую. Видимое положение андрюкско-артыкчатских отложений вблизи основания тектоно-стратиграфической колонки, и было причиной для отнесения её к системе нижних покровов.

5. *Сиалический параавтохтон (?)* залегает в самом основании аккреционной колонны покровов ЗПХ. В некоторых работах предполагалось даже его автохтонное положение [Баранов, Греков, 1978 и др.]. Он сложен альбит-олигоклазовыми гнейсами, часто гранитизированными, гранат-слюдистыми сланцами, гранатовыми амфиболитами, эклогитами (армовская, балканская свиты). В одной из наших последних работ [Омельченко, 2007] был обоснован аллохтонный характер этих кристаллических пород. Показано, что они могут быть структурно параллелизованы со сходными образованиями Ацгаринского покрова, фрагмент которых оторван и пододвинут под вулканиды Лабино-Зараусского покрова, как это наблюдается сейчас в южном крыле Лабинской синформы. В пододвигании участвовали и подстилающие офиолиты Марухского покрова и, скорее всего, даже породы, залегающие структурно ниже. Но происходило это уже после герцинских тектонических событий.

Как видно, вертикальная последовательность тектонических покровов в описанной выше аккреционной колонне в послегерцинское время могла быть нарушена. В настоящей работе мы попытаемся обосновать то, что в этом процессе участвовали и породы других покровных комплексов и что ранее, на момент завершения герцинской складчатости, эта колонна выглядела иначе.

Материалы и методы исследования

Исходными материалами послужили данные собственных полевых исследований авторов, данные геологических отчетов кавказских геологов и опубликованных работ по структуре ЗПХ Северного Кавказа (рис. 2). Основным методом настоящей работы явился комплексный анализ результатов ранее проведенных работ и опубликованных данных, полевых материалов авторов статьи.

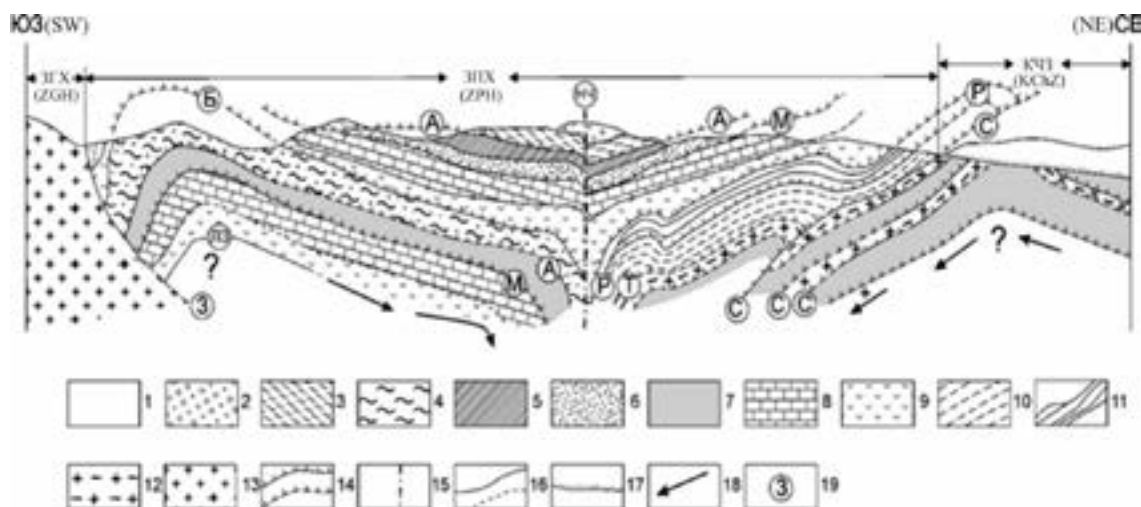


Рис. 2. Обобщённый тектоно-стратиграфический разрез зоны Передового хребта (ЗПХ).

Условные обозначения: 1 – нижнеюрские отложения: в основании – слои, относящиеся к индосинийской молассе, выше – отложения киммерийского цикла; 2 – верхнепалеозойские (здесь пермокарбоновые) грубообломочные герцинские молассовые отложения; 3 – кристаллические сланцы, амфиболиты герцинского Ацгаринского покрова; 4 – кристаллические сланцы, амфиболиты, гранитизированные гнейсы, гнейсы, эклогиты Блыбского выступа (фрагмент Ацгаринского покрова, пододвинутый в индосинийское время под вулканиты среднего палеозоя); 5–6 – Марухский герцинский покров: 5 – офиолитовый комплекс с полным набором магматических пород: гипербазитов, габбро, габбро-пегматитов, базальтов, спилитов, пород редуцированного комплекса параллельных даек; 6 – переслой метатUFFов основного состава, филлитов, прослои кремниев, мраморов, силы гипербазитов (тебердинская свита, часть аманчатской свиты); 7 – офиолиты с неполным набором членов офиолитовой триады: серпентинизированные перидотиты, редко – габброиды – ультраосновные породы Блыбского выступа (Марухский покров в оторванной и пододвинутой части), Беденского массива и Северного разлома; 8–9 – Лабино-Зараусский (прежде – Кизилкольский) покров: 8 – терригенно-карбонатные толщи верхнедевона – нижнего карбона; 9 – вулканиты нижнего-среднего девона (в обоих случаях – в герцинском аллохтоне и в скрытой, пододвинутой с юга, в Блыбском выступе части); 10 – Тоханский тектонический покров – здесь – филлитизированные алевропелиты и граувакковые песчаники среднего-верхнего девона, олистостромы; 11 – тектонически расслоенный индосинийский комплекс – ряд двучленных пластин: нижняя часть – сланцы Тоханского покрова, верхняя – вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы даутской и пцицерской свит Лабино-Зараусского покрова; 12 – гранитоиды б. Моцовой и подстилающие их гранитогнейсы Бескеса в двух тектонических пластинах – верхняя на левобережье Б. Лобы, нижняя – в б. Моцовой; 13 – кристаллические породы Главного хребта; 14 – надвиги и поддвижки; 15 – Срединный разлом зоны Передового хребта; 16 – стратиграфические согласные и интрузивные контакты;

17 – стратиграфические несогласные контакты; 18 – направления движения вещества при пододвигании; 19 – буквы в кружках – условные обозначения разломов, разломных и тектонически расслоенных зон: З – Заканский разлом (Закано-Домбайская разломная зона), НЧ – Никитинско-Черёмуховский разлом (фрагмент Срединного), А – Ацгаринский надвиг, М – Марухский надвиг, Т – Тоханский надвиг, С – зона Северного разлома, Б – Блыбский поддвиг, Р – тектонически расслоенная зона с участием пород Тоханского разлома (внизу пластин) и вулканитов Лабино-Зараусского покрова (вверху пластин). Прочие обозначения: ЗГХ – зона Главного хребта, ЗПХ – зона Передового хребта, КЧЗ – Карачаево-Черкесская зона. Примерное расстояние между краями разреза – 40–45 км /

Fig. 2. Generalized tectono-stratigraphic section of the zone Frontal Ridge (ZPH).

Symbols: 1 – Lower Jurassic deposits: at the base – layers related to the Indosinian molasse, above – deposits of the Cimmerian cycle; 2 – Upper Paleozoic (here Permian-Carboniferous) coarse clastic Hercynian molasse deposits; 3 – crystalline schists, amphibolites of the Hercynian Atsgara cover; 4 – crystal schists, amphibolites, granitized gneisses, gneisses, eclogites of the Blybsky salient (a fragment of the Atsgaranappe, subducted under Middle Paleozoic volcanic rocks in the Indo-Sinian time); 5-6 – Marukh-Hercynian cover: 5 – ophiolite complex with a complete set of igneous rocks: hypermafic, gabbro, gabbro-pegmatites, basalts, spilites, rocks of a reduced complex of parallel dikes; 6 – interbed of basic metatuffs, phyllites, interlayers of cherts, marbles, ultramafic sills (Teberda Formation, part of the Amanchat Formation); 7 – ophiolites with an incomplete set of members of the ophiolite triad: serpentized peridotites, rare gabbroids – ultrabasic rocks of the Blybsky ledge (Marukhsy cover in the detached and subducted part), the Bedensky massif and the Northern fault; 8-9 – Labino-Zarausky (formerly-Kizilkolsky) cover: 8 – terrigenous-carbonate strata of the Upper Devonian – Lower Carboniferous; 9 – Lower-Middle Devonian volcanic rocks (in both cases – in the Hercynian allochthon and in a hidden part, pushed from the south, in the Blybsky ledge); 10 – Tokhansky tectonic cover – here – phyllitized aleuropelites and graywacke sandstones of the Middle-Upper Devonian, olistostromes; 11 – tectonically layered Indosinian complex – a series of two-membered plates: the lower part is shales of the Tokhan cover, the upper part is volcanic and volcanogenic-sedimentary rocks of the Daut and Ptsitser formations of the Labino-Zarausky cover; 12 – granitoids b. Moshchevoi and the Beskes granite gneisses underlying them in two tectonic plates – the upper one on the left bank of the B. Laba, the lower one – in the b. Moshchevy; 13 – crystalline rocks of the Main Range; 14 – thrusts and thrusts; 15 – Middle fault zone of the Front Range; 16 – stratigraphic consonants and intrusive contacts; 17 – stratigraphic unconformable contacts; 18 – directions of movement of matter when moving; 19 – letters in circles – symbols of faults, fault and tectonically stratified zones: Z – Zakansky fault (Zakano-Dombay fault zone), LF – Nikitinsky-Cheryomukhovsky fault (fragment of the Sredinny), A – Atsgarinsky overthrust, M – Marukhsy overthrust, T – Tokhansky thrust, C – zone of the Northern Fault, B – Blybsky underthrust, P – tectonically layered zone with the participation of rocks of the Tokhansky fault (at the bottom of the plates) and volcanic rocks of the Labino-Zarausky cover (at the top of the plates). Other designations: ZGH – zone of the Main Range, ZPH – zone of the Front Range, KChZ – Karachay-Cherkess zone. The approximate distance between the edges of the section is 40-45 km

Результаты работы и их обсуждение

Изучение пород Тоханского покрова происходило обычно при детальном поисково-съёмочных работах на медь в прилегающих девонских вулканитах (С.А. Давыденко, Ю.И. Алексеенко, В.Л. Омельченко и др.). При буровых работах в Уруп-Лабинском рудном районе [Карнаух, 1987] и его повторной детальной геологической съёмке (В.Л. Омельченко, Н.В. Быков, Н.С. Скрипченко, А.С. Тамбиев, В.М. Юбко, Г.В. Рябов и др.) установлено, что там порою трудно отделить собственно подрудные и рудоносные вулканиты даутской свиты (с перекрывающими их надрудными туфогенно-осадочными породами пщицерской свиты) от залегающих структурно нижефиллитовидных сланцев андрюкской свиты. Дело в том, что все эти породы образуют несколько (не менее четырех) сложных по строению тектонических пластин, в каждой из которых в разном объёме присутствуют образования, по меньшей мере двух тектонических покровов. Это установлено бурением, показавшим, что

при перебурке подрудных филлитовандрюкской свиты, находящихся в эрозионных «окнах» среди вулканитов, вновь начинались рудоносные (река Власенчиха) или даже надрудные (басс. Р. Работайки) толщи (данные Кольцовской экспедиции).

Таким образом, обобщённый тектоно-стратиграфический разрез каждой из тектонических пластин представляется следующим (рис. 2). В основании залегают филлитовидные сланцы Тоханского покрова (средний-верхний девон, андрюкская свита), структурно выше, после поверхности надвига расположены рудоносные толщи Лабино-Зараусского покрова, прежде здесь называвшегося Кизилкольским (нижний девон, даутская свита), согласно перекрывающиеся среднедевонскими надрудными туфами. Выше снова располагаются филлитовидные сланцы Тоханского покрова, в их кровле – те же даутские вулканиты и так далее.

Филлитовидные сланцы андрюкской свиты на разных участках и в различных тектонических пластинах содержат своеобразные комплексы интрузивных пород, не проникающих в вышележащие вулканиты. На западе Урупо-Лабинского рудного района, в бассейне р. Б. Андрюк, эти сланцы насыщены многочисленными, большей частью очень сильно изменёнными гидротермально, образованиями. Предположительно (по сохранившимся участкам) они первоначально являлись габброидами, а после аргиллизации и вторичного окварцевания превратились в метасоматиты, близкие по составу к гранодиоритам (В.Ф. Сидоренко). Попутно заметим, что метасоматиты несут редкометалльную минерализацию (ртуть, сурьма, мышьяк), признаков которой в перекрывающих вулканитах нет. При проведении поисковых работ эти магматиты были выделены нами в андрюкский комплекс. Возраст их не установлен, скорее всего, он среднепалеозойский. Находясь вблизи контакта с перекрывающими вулканитами, эти инъективные породы в них не проникают. Точно так же вулканогенные породы кровли незатрагиваются рудно-метасоматическими процессами, филлиты же, наоборот, превращаются в рыхлую массу.

В филлитах Урупского рудного поля откартировано также несколько крупных протяжённых пластовых тел рассланцованных диоритовых порфиритов не вполне ясного генезиса. Эти породы прослежены бурением до верховьев р. Бульварки. На последней Государственной геологической карте м-ба 1:200000 2008 года (И.Н. Семенуха и др.), они обозначены, как гипабиссальные и выделены в средне-верхнедевонский диорит-порфиритовый бахмуткинский комплекс, породы которого также характерны только для Тоханского покрова.

Особо нужно сказать об интрузиях пскентского комплекса, широко развитых среди филлитов в бассейне как р. Б.Лабы, так и р. Урупа, балках Грушёвой и Горелой (притоки р. Б.Лаба). В первом случае известны многочисленные крупные (мощностью в несколько сот метров) субпластовые тела массивных микрогранит-порфиров, также не выходящие за рамки Тоханского покрова. Восточнее, в долине реки Уруп и его левых притоков, в этих же толщах филлитовидных сланцев также известны многочисленные тела аналогичных инъективных пород, отсутствующих в нижнедевонских рудоносных толщах. В этих гранитоидах, датируемых в используемой сейчас легенде, верхним палеозоем, выявлено несколько крупных проявлений радиоактивных элементов. При картировании района Власенчихинского карьера, нами наблюдалось тело микрогранитов пскентского комплекса среди маломощной пачки филлитов, залегающих в кровле рудоносных вулканитов, т.е. в видимом основании следующей (третьей) тектонической пластины (Гудковской по Ю.В. Карнауху). Здесь местоположение их ограничено также рамками сланцев Тоханского покрова. Последние, как и прорывающие магматиты, сильно смяты. Из других инъ-

ективных пород, встречавшихся среди филлитов, следует упомянуть дайки керсантитов (р. Бахмутка). Г.Д. Афанасьевым [1968] в них же описаны дайки минетты, натровой минетты, альбититов, не наблюдавшихся в девонских вулканитах.

Среди пород залегающего структурно выше Лабино-Зараусского покрова (здесь – прежде именовавшегося Кизилкольским) все вышеописанные инъективные породы отсутствуют. Из интрузивных образований, внедрявшихся в вулканиты даутской свиты, можно упомянуть лишь плагиограниты комплекса, названного нами маркопиджским и датированного средним палеозоем (их гальки в изобилии присутствуют в верхнедевонских конгломератах семиродниковской и нахытбашинской свит). Они образуют крупную мощную (до 400 м) залежь, протягивающуюся более чем на тридцать километров от левобережья Малой Лабы до приустьевой части Б. Блыба. В своей нижней части на всём своём протяжении они подвержены окварцеванию, эпидотизации, серицитизации и превращены в так называемые гнейсовидные «пёстрые сланцы». Последние были также встречены в керне скважины, бурившейся партией В.Ф. Сидоренко в районе пос. Рожкао в 1965 году. Восточнее, в пределах Худесского рудного поля на водоразделе балки Кривой и ручья Скалистого вулканиты карачаевской серии густо насыщены ветвящимися телами красноватых фельзитовых гранит-порфиров (кизилкаинский комплекс, верхний палеозой), которые снизу обрезаются Кизилкольским надвигом, отделяя их от филлитовидных сланцев артыкчатской свиты (Тоханский покров). Среди последних сходные магматиты не наблюдались. Это свидетельствует также о том, что и это нарушение является постгерцинским.

ВЫВОДЫ

Как видно из того, что было показано выше, стратифицированные породы Тоханского покрова довольно интенсивно насыщены телами своеобразных инъективных пород различного состава. В залегающем структурно выше Лабино-Зараусском (Кизилкольском) покрове такие породы, несмотря на более детальную степень изученности, не встречались. Там отмечается своя специфика состава инъективных образований. Среди этих секущих дайковых, субсогласных и пластообразных тел залегают не только среднепалеозойские (девон-раннетурнейские), но и верхнепалеозойские магматиты.

Отсутствие таких пород среди девонских вулканитов может свидетельствовать, что плоскость надвига, разделяющая здесь оба покровных комплекса, является послеверхнепалеозойской, т.е., скорее всего индосинийской. До этого времени тоханские филлитовидные сланцы, могли залегать в одной из пластин серии верхних (а не нижних, как сейчас!) покровов. Предпочтителен, однако, вариант структуры (с поправками), предложенный Е.В. Хайным [1984]. Он выделял из ЗПХ область развития пород Тоханского покрова, вообще представляя её как самостоятельную, латерально-равнозначную ей, структурно-формационную зону, которую именовал Андрюкско-Тоханской (АТЗ). Но, по нашему мнению, ЗПХ в среднем палеозое, как единая структура просто не существовала, а осадки АТЗ формировались вдалеке от пород других покровных комплексов из перечисленных выше систем покровов. Возможно также, что филлитовидные сланцы и граувакки андрюкской-артыкчатской свит относились к другой аккреционной герцинской колонне, в состав которой можно также включить расположенные структурно ниже бескесские граниты и гнейсы, а также пластовую залежь беденских серпентинитов, подстилающую их.

Эта последовательность, по-видимому, имела место здесь и в верхнем палеозое, когда произошло инъецирование их верхнепалеозойскими интрузиями, а позже запечатывание пермью (кинырчадская и гималдыкская свиты в бассейне р. Чучкур).

В индосинийскую эпоху при двустороннем сжатии зоны Передового хребта филлиты Тоханского покрова (совместно с разновозрастными, в том числе и верхнепалеозойскими инъективными магматитами, а также красноцветными молассами) были пододвинуты под девонские вулканиты. Вместе с филлитовидными сланцами, по-видимому, пододвигались также структурно подстилающие их в герцинской аккреционной колонне граниты и гнейсы бескесского комплекса (возможный аналог пород Ацгаринского покрова) в его нынешнем, тектонически сдвоенном виде в лабинском пересечении. Пододвигались также и серпентиниты Беденского массива (предполагаемый структурный аналог ультраосновных пород офиолитов герцинского Марухского покрова).

Подобная же ситуация с пододвиганием пород более высоких покровных комплексов под расположенные ниже, описана нами ранее [Омельченко, 2007], когда был обоснован аллохтонный характер пород блыбского (уруштенского) комплекса.

Послегерцинскими движениями можно объяснить и наличие нескольких тектонических пластин с одновременным присутствием в них пород Марухского покрова (в нижней части) и кристаллических сланцев с гнейсами, относящихся к Ацгаринскому покрову. Это было описано и отрисовано нами на детальной геологической карте при съёмке левобережья р. Кыфар-Агур, а также на её водоразделе с р. Кыфар ещё в 1974 году. Этот участок заслуживает отдельного описания с соответствующими иллюстрациями.

В заключение следует сказать, что такая дополнительная расчленённость аккреционной колонны герцинских покровов, как это было отмечено ранее Ю.В. Карнаухом [1987], должна учитываться при поисковых работах, поскольку «подрудные» и «надрудные породы» здесь могут меняться местами. На наш взгляд, с точки зрения перспектив на колчеданное оруденение, прежде всего заслуживает внимания участок р. Работайки, где ниже филлитов Тоханского покрова бурением установлено наличие туфов типа тех, которые залегают в кровле Урупского колчеданного месторождения. Интересен также слабоизученный район р. Бульварки.

Литература

1. Афанасьев Г.Д., Абдуллаев Р.Н., Азизбеков Ш.А. и др. Закономерности развития магматизма складчатых областей. – М.: Наука, 1968. – 386 с.
2. Баранов Г.И., Греков И.И. Доверхнепалеозойская структура Северного Кавказа. // Тезисы докладов тектонического совещания «Тектоника Средиземноморского пояса». – М.: Наука, 1978. – С. 11-12.
3. Баранов Г.И., Греков И.И. Доверхнепалеозойская структура Северного Кавказа. // В сб. «Тектоника Средиземноморского пояса». – М.: Наука, 1980. – С. 162–171.
4. Белов А.А., Омельченко В.Л. Офиолиты в структуре Марухского покрова и некоторые вопросы стратиграфии и магматизма палеозоя Передового хребта Северного Кавказа. // Геотектоника. – 1976. – №2. – С. 44–56.
5. Гиоргобиани Т.В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №1. – С. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063
6. Греков И.И., Кропачев С.М., Момот С.П., Корень Т.Н. Марухский покров в палеозое Северного Кавказа. // Сов. геология. – 1974. – №2. – С. 77–84.

7. Карнаух Ю.В. Покровная модель Урупского рудного поля. // Геология рудных месторождений. – 1987. – №4. – С. 95–98.
8. Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. – М.: Изд-во МГУ, 1963. – 357 с.
9. Омельченко В.Л. О месте пород Блыбского комплекса в домезозойской структуре зоны Передового хребта (Северный Кавказ). // Геотектоника. – 2007. – №4. – С. 60–70.
10. Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Исаев В.С. Тектоника и история развития зоны Передового хребта. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №1. – С. 40–56.
11. Попков В.И., Попков И.В. Складчато-надвиговые дислокации в триасовых отложениях Скифско-Туранской платформы. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – №1. – С. 34–46. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003
12. Хаин Е.В. Офиолиты и герцинская покровная структура Передового хребта Северного Кавказа. // Труды ГИН. Вып. 382. – М.: Наука, 1984. – 96с.
13. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
14. Adamia Sh.A., Buadze V.I., Chavishvili I.D. The Greater Caucasus in the Phanerozoic: A geodynamic model. // In: Metallogeny and plate tectonics in WE Mediterranean. Faculty of Mining and Geology, Belgrad, with IGCR Project 3. Belgrad. – 1977.– pp. 215-229.
15. Adamia Sh.A., Adamalyan V., Belov A.A. et al. Pre-Variscan and Variscan complexes of the Caucasus and pre-Caucasus (Northern part of the geotraverse G): IGCR Project 5. // Newsletter. – 1980. – No.2. – pp. 10-41.
16. Belov A.A., Somin M.L., Adamia Sh.A. Precambrian and Paleozoic of the Caucasus (Brief Synthesis). // Jahrb. Bundes. Geol. B.-A., Wien. – 1978. – Bd. 121, H. 1. – pp. 155-175.
17. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporitesfloored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. // Journal of Structural Geology. – 2019. – Vol. 123. – pp. 1–17.
18. Carola E., Muñoz J.A., Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. // Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.). –2015. – pp. 56–73. DOI: 10.1007/s00531-015-1177-z. EDN: VGCXXT.
19. Khain V.E. Structure and main stages in the tectonomagmatic development of the Caucasus: An attempt at geodynamic interpretation. // Amer. J. Sci.– 1974.– Vol. 274. No.6.
20. Knipper A.L., Khain E.V. Structural position of ophiolites of the Caucasus. – In: «Ophioliti» special issue. Tethyanophiolites. // Eastern area Ed. G. Rocsi. – 1981. – Vol. 2. – pp. 297-314.
21. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. // Tectonics. – 2020. – Vol. 39. – pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903 EDN: XEUTPL

References

1. Afanasiev G.D., Abdullaev R.N., Azizbekov Sh.A. et al. Patterns of development of magmatism in folded areas. Moscow. Nauka, 1968. 386 p. (In Russ.)
2. Baranov G.I., Grekov I.I. Pre-Upper Paleozoic structure of the North Caucasus. In: Proc. Tectonics of the Mediterranean Belt. Moscow. Nauka, 1978. pp. 11–12. (In Russ.)
3. Baranov G.I., Grekov I.I. Pre-Upper Paleozoic structure of the North Caucasus. In Proc. Tectonics of the Mediterranean Belt. Moscow. Nauka, 1980. pp. 162–171. (In Russ.)

4. Belov A.A., Omelchenko V.L. Ophiolites in the structure of the Marukh cover and some issues of stratigraphy and magmatism of the Paleozoic of the Peredovoi Ridge of the North Caucasus. *Geotectonics*. 1976. No.2. pp. 44–56. (In Russ.)
5. Giorgobiani T.V. Stages, Mechanism and Geodynamics of Formation of the Folded System of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No.1. pp. 35–42. (in Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063
6. Grekov I.I., Kropachev S.M., Momot S.P., Koren T.N. Marukh cover in the Paleozoic of the North Caucasus. *Soviet geology*. 1974. No. 2. pp. 77–84. (In Russ.)
7. Karnaukh Yu.V. Cover model of the Urup ore field. *Geology of ore deposits*. 1987. No. 4. pp. 95–98. (In Russ.)
8. Milanovsky E.E., Khain V.E. *Geological Structure of Caucasus*. Moscow. MSU, 1963. 357 p. (In Russ.)
9. Omelchenko V.L. On the place of the Blybsky Complex Rocks in the Pre-Mesozoic structure of the Peredovoi Ridge Zone (Northern Caucasus). *Geotectonics*. 2007. No. 4. pp. 60–70. (In Russ.)
10. Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Isaev V.S. Tectonics and geologic history of Front Range zone of the Greater Caucasus. *Geology and geophysics Russian South*. 2017. No. 1. pp. 40–56. (In Russ.). DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9478.
11. Popkov V.I., Popkov I.V. Fold-thrust dislocations in Triassic sediments The Scythian-Turanian platform. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No.1. pp. 34–46. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003.
12. Khain E.V. Ophiolites and Hercynian coverstructure of the Front Range of the North Caucasus. *Proceedings of GIN*. Issue. 382. Moscow. Nauka, 1984. 96 p. (In Russ.)
13. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geoeological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
14. Adamia Sh.A., Buadze V.I., Chavishvili I.D. The Greater Caucasus in the Phanerozoic: A geodynamic model. In: *Metallogeny and plate tectonics in WE Mediterranean*. Faculty of Mining and Geology, Belgrad, with IGCR Project 3. Belgrad. 1977. pp. 215–229.
15. Adamia Sh.A., Adamalyan V., Belov A.A. et al. Pre-Variscan and Variscan complexes of the Caucasus and pre-Caucasus (Northern part of the geotraverse G): IGCR Project 5. *Newsletter*. 1980. No.2. pp. 10–41.
16. Belov A.A., Somin M.L., Adamia Sh.A. Precambrian and Paleozoic of the Caucasus (Brief Synthesis). *Jahrb. Bundes. Geol. B.-A., Wien*. 1978. Bd. 121, H. 1. pp. 155–175.
17. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporitesfloored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 123. pp. 1–17.
18. Carola E., Muñoz J.A., Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*. 2015. pp. 56–73. DOI: 10.1007/s00531-015-1177-z. EDN: VGCXXT.
19. Khain V.E. Structure and main stages in the tectonomagmatic development of the Caucasbs: An attempt at geodynamic interpretation. *Amer. J. Sci.* 1974. Vol. 274. No.6.
20. Knipper A.L., Khain E.V. Structural position of ophiolites of the Caucasus. In: «Ofioliti» special issue. Tethyan ophiolites. Eastern area Ed. G. Rocsi. 1981. Vol. 2. pp. 297–314.
21. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903 EDN: XEUTPL

УДК 551.243.6 (470.56)

[DOI: 10.46698/VNC.2023.95.17.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.95.17.002)

Оригинальная статья

Изучение магнитных аномалий юго-восточной части Русской платформы и их связи с радиально-концентрическими структурами фундамента

Е.А. Данилова^{id}, Н.А. Белоглазова^{id}

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100,
e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru

Статья поступила: 05.04.2023, доработана: 15.05.2023, одобрена к публикации: 25.05.2023

Резюме: Актуальность работы. Многие магнитные аномалии юго-восточной части Русской платформы имеют дугообразное строение и совпадают с контурами перспективных в плане нефтегазоносности радиально-концентрических структур в фундаменте. Залежи нефти и газа в равной степени приурочены к магнитным экстремумам разных знаков. Конфигурация некоторых месторождений углеводородов повторяет форму аномалий магнитного поля. К максимальным значениям аномального магнитного поля приурочены центры Оренбургской и Средневожской радиально-концентрических структур. **Целью работы** являлось изучение природы магнитных аномалий юго-восточной части Русской платформы и их связи с радиально-концентрическими структурами. **Методы работы.** Проведен анализ геолого-геофизической информации юго-запада Оренбургской области, включающий данные сейсморазведки, гравиразведки, мониторинга современных геотектонических процессов, газогеохимических, дистанционных, геоморфологических исследований, результаты бурения скважин. Выполнены магнитометрические измерения в параметрической скважине, пробуренной на склоне магнитной аномалии в пределах Свердловской радиально-концентрической структуры, с помощью комплексного скважинного магнитометра-инклинометра МИ-3803М (Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Россия). **Результаты работы.** Анализ геолого-геофизической информации и данных бурения в юго-западной части Оренбургской области показал, что магнитные аномалии связаны с глубинным строением фундамента. Совпадение неотектонических нарушений Оренбургской радиально-концентрической структуры и контуров магнитных аномалий указывает на их глубинное происхождение. Современные сейсмические события часто приурочены к зонам резкой смены значений магнитных аномалий. Магнитные аномалии не иллюстрируют строение поверхности фундамента, при этом на временных сейсмических разрезах высокоамплитудным глубинным разломам соответствует смена значений аномалий магнитного поля. Результаты бурения и магнитометрических исследований параметрической скважины, вскрывшей фундамент в Предуральском краевом прогибе на склоне локальной магнитной аномалии, показывают, что скважина находится в нефтегазоперспективной зоне глубинного разлома и, возможно, цветковой структуры. По результатам магнитометрических исследований ниже забоя скважины находится мощный магнитный объект, который вызывает повышение уровня вертикальной составляющей магнитного поля. Сделан вывод о том, что резкую смену значений магнитных аномалий и их конфигурацию можно отнести к новым критериям выявления залежей углеводородов. По карте магнитных аномалий выделена новая перспективная Самарская радиально-концентрическая структура, рекомендованная к дальнейшему изучению.

Ключевые слова: радиально-концентрическая структура, магнитные аномалии, геолого-геофизические исследования, магнитометрические исследования, глубинные разломы, цветковая структура, месторождения нефти и газа.

Благодарности: Исследования выполнены в рамках темы № 1021052504590-8-1.5.4 государственного задания ИГ УрО РАН.

Для цитирования: Данилова Е.А., Белоглазова Н.А. Изучение магнитных аномалий юго-восточной части Русской платформы и их связи с радиально-концентрическими структурами фундамента. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 17-28. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.17.002.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

[DOI: 10.46698/VNC.2023.95.17.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.95.17.002)

Original paper

Study of magnetic anomalies of the southeastern part of the Russian Platform and their connection with the radial-concentric structures of the foundation

E.A. Danilova^{ID}, N.A. Beloglazova^{ID}

Bulashevich Institute of Geophysics, the Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
100 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russia Federation,
e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru

Received: 05.04.2023, revised: 15.05.2023, accepted: 25.05.2023

Abstract: Relevance. Many magnetic anomalies of the southeastern part of the Russian Platform have an arc-shaped structure and coincide with the contours of radially concentric structures in the foundation that are promising in terms of oil and gas potential. Oil and gas deposits are equally confined to magnetic extremes of different signs. The configuration of some hydrocarbon deposits repeats the shape of magnetic field anomalies. The maximum values of the anomalous magnetic field are associated with the centers of the Orenburg and Middle Volga radial-concentric structures. **The aim** of the work was to study the nature of magnetic anomalies in the southeastern part of the Russian Platform and their connection with radial-concentric structures. **Methods.** The analysis of geological and geophysical information of the south-west of the Orenburg region, including data from seismic exploration, gravity exploration, monitoring of modern geotectonic processes, gas-geochemical, remote, geomorphological studies, well drilling results, was carried out. Magnetometric measurements were performed in a parametric well drilled on the slope of a magnetic anomaly within the Sverdlovsk radial-concentric structure using a complex borehole magnetometer-inclinometer MI-3803M (Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia). **Results.** Analysis of geological and geophysical information and drilling data in the southwestern part of the Orenburg region showed that magnetic anomalies are associated with the deep structure of the foundation. The coincidence of neotectonic disturbances of the Orenburg radial-concentric structure and the contours of magnetic anomalies indicates their deep origin. Modern seismic events are often associated with zones of sharp change in the values of magnetic anomalies. Magnetic anomalies do not illustrate the structure of the foundation surface, while on temporary seismic sections, high-amplitude deep faults correspond to a change in the values of magnetic field anomalies. The results of drilling and magnetometric studies of a parametric well that uncovered the foundation in the Pre-Ural regional deflection on the slope of a local magnetic anomaly show that the well is located in the oil and gas prospective zone of a deep fault and, possibly, a flower structure. According to the results of magnetometric studies, a powerful magnetic object is located below the bottom of the well, which causes an increase in the level of the vertical component of the magnetic field. It is concluded that a sharp change in the values of magnetic anomalies and their configuration can be attributed to new criteria for identifying hydrocarbon deposits. According to the map of magnetic anomalies, a new promising Samara radial-concentric structure has been identified, recommended for further study.

Keywords: radial-concentric structure, magnetic anomalies, geological and geophysical studies, magnetometric studies, deep faults, flower structure, oil and gas deposits.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of topic No. 1021052504590-8-1.5.4 of the state assignment of the Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Danilova E.A., Beloglazova N.A. Study of magnetic anomalies of the southeastern part of the Russian Platform and their connection with the radial-concentric structures of the foundation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 17-28. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.17.002.

Введение

В фундаменте юго-восточной части Русской платформы по сейсмоструктурным и геоморфологическим данным [Данилова, 2022; Дружинин, 2021] было выделено восемь радиально-концентрических структур (РКС) (рис. 1).

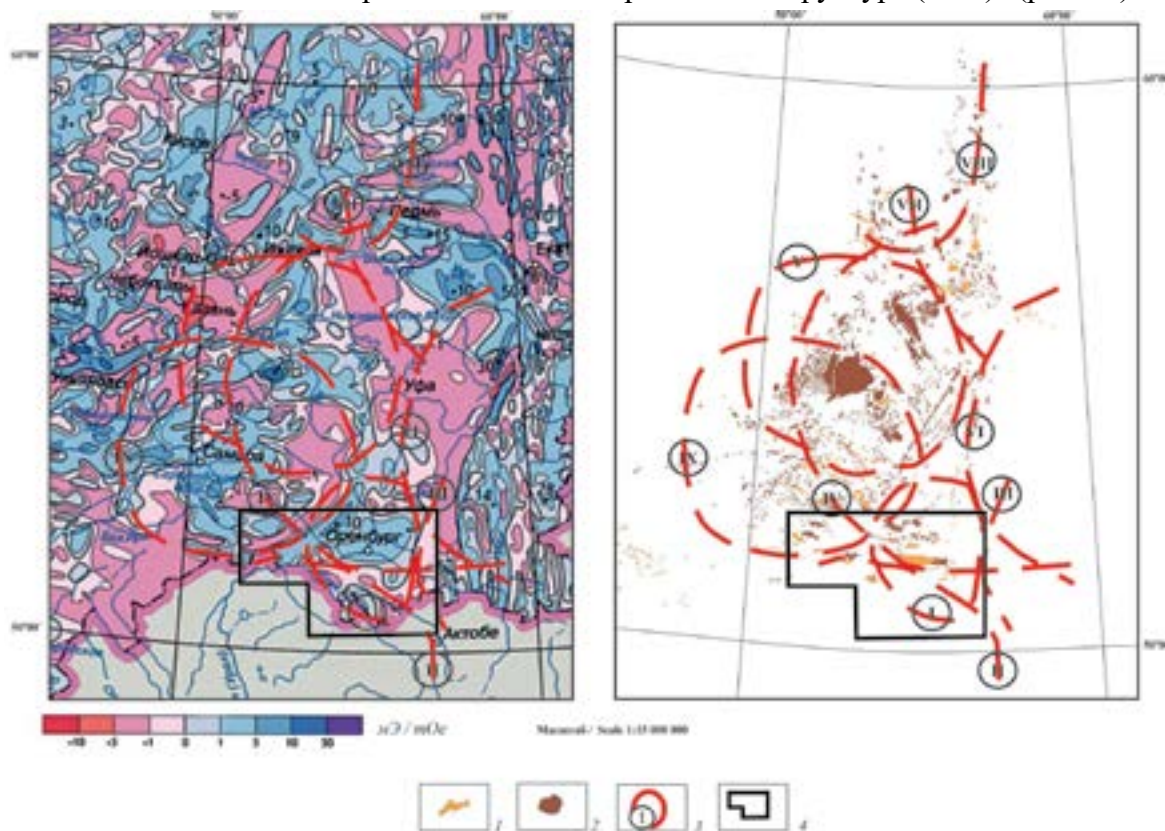


Рис. 1. Сопоставление карты локальных аномалий магнитного поля, контуров радиально-концентрических структур [Данилова, 2022] и месторождений углеводородов

1-2 – месторождения: 1 – газоконденсатные, 2 – нефтяные; 3 – радиально-концентрические структуры: I – Оренбургская, II – Прикаспийская, III – Предуральская, IV – Оренбургско-Ромашкинская, V – Средневожская, VI – Башкирская, VII – Свердловская, VIII – Пермская, IX – Самарская; 4 – площадь магнитометрической съемки на юго-западе Оренбургской области (рис. 2) /

Fig. 1. Comparison of the map of local magnetic field anomalies, contours of radial-concentric structures [Danilova, 2022] and hydrocarbon deposits

1-2 – deposits: 1 – gas condensate, 2 – oil; 3 – radial-concentric structures: I – Orenburg, II – Caspian, III – Pre-Ural, IV – Orenburg-Romashkin, V – Middle Volga, VI – Bashkir, VII – Sverdlovsk, VIII – Perm, IX – Samara; 4 – the area of magnetometric survey in the southwest of the Orenburg region (see Fig. 2)

Предположено, что они генетически связаны с современными геодинамическими процессами в земной коре. Структуры являются центрами аккумуляции угле-

водородов, внутри которых в осадочном чехле закономерно распределены залежи нефти и газа: вдоль радиальных и концентрических разломов, а также в зонах их пересечения [Данилова, 2022]. По этим зонам происходит миграция углеводородов [Mann et al., 2003; McKirdy, 2006; Naumann, Sakariassen, 2019; Saadallah, 2019; Трофимов, 2014; Филиппова и др., 2007; Чотчаев и др., 2021; Хулелидзе и др., 2016; Велиев 2021]. К образованию месторождений нефти и газа или перераспределению сформировавшихся залежей углеводородов в пределах РКС привели неотектонические сдвиговые деформации [Grillot, 1984; Nao et al., 2001].

Магнитное поле юго-запада Оренбуржья показывает неоднородности пород кристаллического фундамента (рис. 2) и говорит о его погружении в южном направлении. Глубинные разломы фундамента во многом повторяют простираение основных аномалий магнитного поля. Если рассматривать приуроченность залежей нефти и газа к локальным аномалиям, то можно заметить, что они в равной степени приурочены к магнитным экстремумам разных знаков. Конфигурация некоторых месторождений углеводородов повторяет форму аномалий магнитного поля.

В северо-западной части площади (рис. 2) выделяются ещё более интенсивные магнитные аномалии, имеющие отчётливое радиально-концентрическое строение, относящиеся к девятой концентрической структуре – Самарской РКС, расположенной севернее Оренбургской.

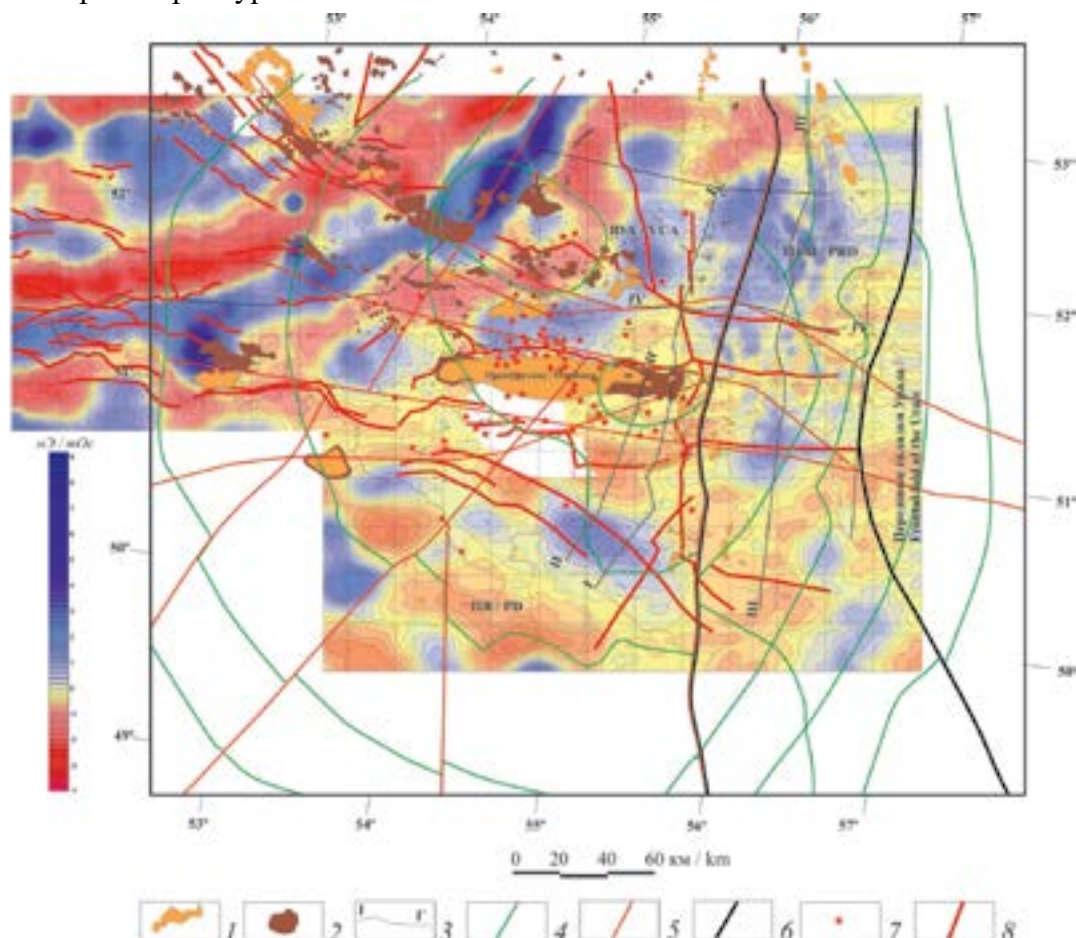


Рис. 2. Сопоставление карты локальных аномалий магнитного поля, контуров Оренбургской радиально-концентрической структуры, глубинных разломов фундамента и месторождений углеводородов, по [Данилова, 2023] с дополнениями

ВУА – Волго-Уральская антеклиза, ПВ – Прикаспийская впадина, ПКП – Предуральский краевой прогиб. 1-2 – месторождения: 1 – газоконденсатные, 2 – нефтяные; 3 – профили: I-I' (Пятаева Л.А., Региональная с/п 5/2007-08), II-II' (Альберт А.К., с/п 25/1999-02), III-III' (Кондрашова Н.В., Региональная с/п 5/2006-07), IV-IV' (Кондрашова Н.В., Региональная с/п 5/2006-07); 4 – концентрические разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры; 5 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа; 6 – границы Предуральского краевого прогиба; 7 – сейсмические события, по [Нестеренко и др., 2015]; 8 – глубинные разломы фундамента, по [Нестеренко и др., 2015] /

Fig. 1. Comparison of the map of local magnetic field anomalies, contours of the Orenburg radial-concentric structure, deep foundation faults and hydrocarbon deposits, according to [Danilova, 2023] with additions

VUA – Volga-Ural anteclise, PD -Peri-Caspian depression, PRD – Pre-Ural regional deflection. 1-2 – deposits: 1 – gas condensate, 2 – oil; 3 – profiles: I-I' (Pyataeva L.A., Regional s/p 5/2007-08), II-II' (Albert A.K., s/p 25/1999-02), III-III' (Kondrashova N.V., Regional s/p 5/2006-07), IV-IV' (Kondrashova N.V., Regional s/p 5/2006-07); 4 – concentric faults Orenburg radial-concentric structure; 5 – the main radial faults of the Orenburg radial-concentric structure, which are associated with seismic events and oil and gas fields; 6 – the boundaries of the Pre-Ural regional deflection; 7 – seismic events, according to [Nesterenko et al., 2015]; 8 – deep foundation faults, according to [Nesterenko et al., 2015]

По карте аномального магнитного поля масштаба 1:15 000 000 (рис. 1) можно заметить, что многие магнитные аномалии Русской платформы имеют дугообразное строение, при этом контуры некоторых РКС с ними совпадают. К максимальным значениям аномального магнитного поля приурочены центры Оренбургской и Средневожской РКС. Так, в середине Средневожской РКС фиксируется экстремальное положительное значение магнитного поля до 20 мЭ (рис. 2). В пределах этой же магнитной аномалии располагается крупное Ромашкинское нефтяное месторождение. В середине Оренбургской РКС, к которой приурочено уникальное Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение [Данилова, 2022] (рис. 1), фиксируется экстремальное значение магнитного поля до 6мЭ (рис. 2).

Методы исследований

Для изучения природы магнитных аномалий и их связи с РКС был проведен анализ геолого-геофизической информации юго-запада Оренбургской области, включающий данные сейсморазведки, гравиразведки, мониторинга современных геотектонических процессов, газогеохимических, дистанционных, геоморфологических исследований, результаты бурения скважин. А также выполнены магнитометрические измерения в параметрической скважине, пробуренной на склоне магнитной аномалии в пределах Свердловской РКС. Исследования проводились в интервале глубин 3030,7–5207,6 м открытого ствола. Для измерений использовался комплексный скважинный магнитометр-инклинометр МИ-3803М (Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Россия), позволяющий проводить одновременные измерения магнитной восприимчивости (K), горизонтальной и вертикальной составляющих геомагнитного поля (Z , H), магнитного азимута (Az), зенитного (An) и апсидального (Anx) углов скважины [Астраханцев, Белоглазова, 2012].

Результаты работы и их обсуждение

Результаты анализа геолого-геофизической информации и данных бурения. Аномалии магнитного поля могут возникать вследствие разной намагниченности не только пород фундамента, но и терригенных образований осадочного чехла [Лю-

гачев, 1979]. При сопоставлении карт рельефа, геологии и магнитных аномалий южной части Оренбургской области прямой связи развития неоген-четвертичных отложений с аномалиями магнитного поля не обнаруживается. Изучение геологических данных по разрезам скважин, строительство которых приурочено к тем или иным магнитным аномалиям, также не показывает повышенной намагниченности терригенных отложений этого района, мощность которых меняется в широком диапазоне. Газогеохимические аномалии на карте магнитных аномалий не имеют существенных закономерностей размещения.

Широкое распространение в пределах юго-восточной части Русской платформы имеют соляные купола и гряды кунгурского возраста, которым соответствуют отрицательные значения силы тяжести. Неотектонические нарушения Оренбургской РКС, дешифрируемые по космическим снимкам, и глубинные разломы фундамента, ограничивают группы соляных структур со схожими элементами простираения и подчеркивают блоковое строение территории [Данилова, 2023]. В межкупольных областях и мульдах широко развиты мощные толщи терригенных отложений. Над куполами, которые зачастую прорывают надсолевые отложения и выходят на поверхность, они распространены значительно меньше. Если бы терригенные породы юго-запада Оренбургской области имели повышенную намагниченность, тогда бы наблюдалось совпадение гравитационных и магнитных аномалий, чего мы не наблюдаем.

Резкая смена значений магнитных аномалий может свидетельствовать о вертикальных смещениях тектонических блоков [Логачев, 1979]. В зонах нарушений происходит дробление пород, образование тектонических брекчий. Ферромагнитные минералы, входящие в состав пород фундамента, частично разрушаются или обретают хаотическую ориентировку.

Большая часть сейсмических событий, произошедших в 2009–2014 годах [Нестеренко и др., 2015] на юго-западе Оренбургской области, приурочена к зонам резкой смены значений аномалий магнитного поля (рис. 2). Отмечается сгруппированность новейших сейсмических событий и приуроченность их к зонам глубинных разломов [Нестеренко и др., 2015; Vuijze et al., 2017; Dost et al., 2020; Керимов, 2022].

Исследование глубинного строения Оренбургской РКС по сейсмическим данным показало, что она представляет собой крупную цветковую структуру, в строении которой участвуют разнонаправленные глубинные нарушения, падающие под углами 60–85° и ограничивающие в фундаменте зоны горстов или взбросов [Данилова, 2023]. Судя по разрезам временных сейсмических профилей, ее пересекающих (рис. 2), магнитные аномалии практически не иллюстрируют строение поверхности фундамента. В пределах максимальных аномалий магнитного поля могут наблюдаться как общее его опускание, так и поднятие. Но смена значений аномалий на разрезах зачастую фиксируется высокоамплитудными глубинными разломами.

Результаты магнитометрических исследований. Магнитометрические исследования были выполнены в параметрической скважине, пробуренной в Предуральском краевом прогибе в пределах Свердловской РКС, на склоне положительной магнитной аномалии. Глубина скважины – 5207 м. Породы рифей-вендского возраста вскрыты на отметке 4930 м. На глубине 5145–5170 м встречена слабомагнитная интрузивная порода зеленовато-серого цвета среднезернистая, состоящая из плагиоклаза, амфиболов и, возможно, тонко рассеянного магнетита. Выше по разрезу наблюдается чередование серых, темно-серых до черного песчаников, аргиллитов, алевролитов, известняков и мергелей с мелкими включениями и стяжениями пирита. Осадочный чехол представлен карбонатными и терригенными

породами среднего и верхнего девона, карбона и нижней перми, трещиноватыми, неравномерно битуминозными. Развита пиритизация, доломитизация. Распространены стиллолитовые швы.

Магнитометрические исследования проведены в интервале глубин 3030,7–5207,6 м. Практически весь измеренный интервал сложен породами турнейско-рифейского возраста, представленными переслаиванием мкарбонатов и терригенных пород, характеризующихся слабыми магнитными свойствами. Фоновые значения магнитной восприимчивости по всему измеренному интервалу находятся в пределах $100 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, при этом наблюдаются локальные аномалии интенсивностью до $2000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, вызванные магнитной вкрапленностью или металлической стружкой, оставшейся после бурения скважины.

В интервале глубин 5150–5190 м наблюдается аномалия пересечения. По кривой Z в этом интервале наблюдается асимметричная аномалия интенсивностью до минус 2000 нТл. По кривой магнитной восприимчивости отмечаются две аномалии в интервалах глубин 5150–5167 и 5177–5190 м интенсивностью до 800 и $1600 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, соответственно. Предварительный анализ кривых в этом интервале позволяет предположить, что аномалия вызвана боковым подсечением двух крыльев одного пласта, судя по геологическому описанию, состоящего из интрузивных пород (плагиоклаза и амфиболита) и рассеянного магнетита. Так как значения магнитной восприимчивости в промежутке между подсечениями близки к фоновым, а по кривой Z при этом не наблюдается переходов от отрицательных значений к положительным, которые должны быть при выходе из пласта (рис. 3), то можно предположить, что в интервале между подсечениями (5167–5177 м) аномалиеобразующий объект находится вблизи скважины.

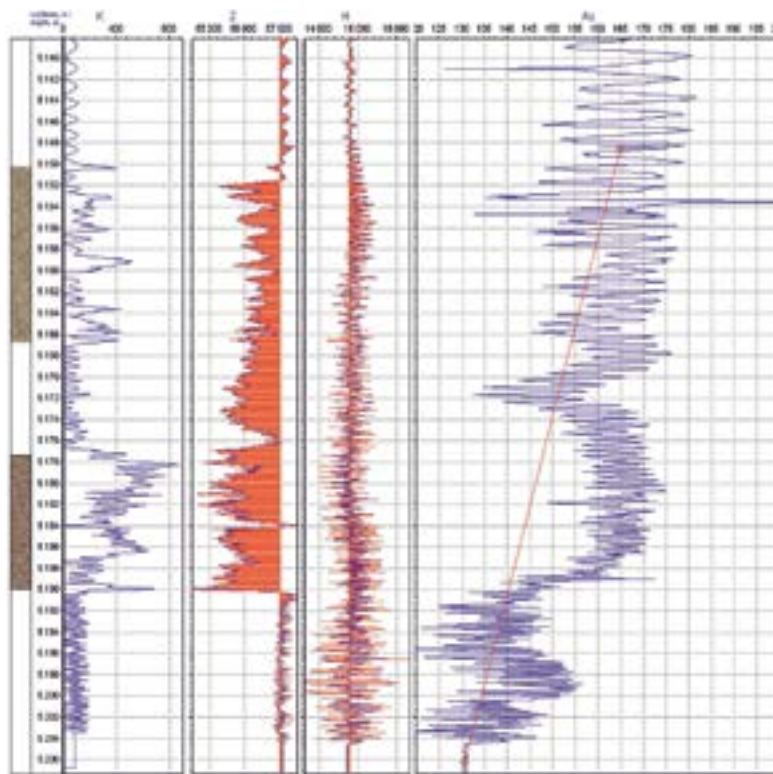


Рис. 3. Результаты расчленения амфиболитовой интрузии в параметрической скважине по результатам скважинной магнитометрии: K – магнитная восприимчивость (10^{-5} ед. СИ), Z – вертикальная составляющая геомагнитного поля (нТл), H – горизонтальная составляющая (нТл), Az – магнитный азимут скважины (угловые градусы) /

Fig. 3. Results of amphibolite intrusion dissection in a parametric well based on the results of borehole magnetometry. K – magnetic susceptibility (10^{-5} SI), Z – vertical component of the geomagnetic field (nT), H – horizontal geomagnetic field component (nT), Az – magnetic azimuth of the well (angular degrees)

Аномалия по кривой Z является асимметричной, в верхней части отсутствует положительная ветвь аномалии. Из этого следует, что тело наклонное и пересечено в нижней краевой части (рис. 4). По скачкам магнитного поля были рассчитаны элементы залегания пласта – угол и азимут падения. Средний азимут падения составляет $100\text{--}120^\circ$ на юго-восток, угол падения колеблется от 55 до 85° .

Следует отметить одну особенность поведения составляющих геомагнитного поля: абсолютные значения горизонтальной составляющей на всем измеренном интервале составляют $15400\text{--}15500$ нТл, что соответствует нормальным значениям H для этих широт, при этом абсолютные значения вертикальной составляющей постепенно увеличиваются с глубиной и на забое скважины превышают нормальные значения на 3400 нТл.

Из всего этого можно предположить, что ниже забоя скважины находится мощный магнитный объект, который вызывает повышение уровня вертикальной составляющей магнитного поля.

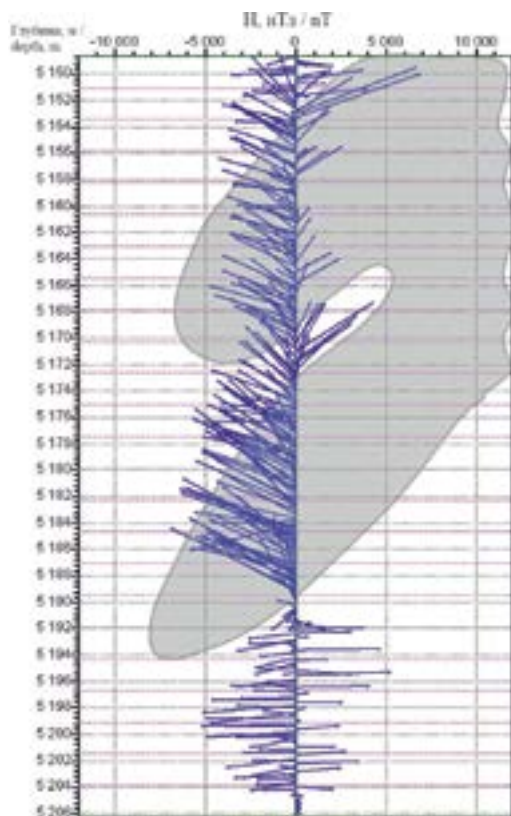


Рис. 4. Картина векторов и примерное положение магнитного пласта в околоскважинном пространстве в плоскости 120° /

Fig. 4. The picture of vectors and the approximate position of the magnetic layer in the near-well space in the plane 120°

Фундамент юго-восточной части Русской платформы имеет радиально-концентрическое строение. В некоторой степени это подтверждают карты магнитных аномалий. РКС представляют собой интерес с точки зрения поисков нефти и газа, так как могут являться центрами аккумуляции углеводородов. По картам магнитных аномалий можно выделять новые перспективные кольцевые структуры, а резкая смена значений магнитных аномалий и их конфигурация могут стать одними из критериев выявления новых залежей углеводородов.

В юго-западной части Русской платформы по карте магнитных аномалий выделяется новая перспективная Самарская РКС (рис. 1), фрагмент которой четко фиксируется в северо-западной части Оренбургской структуры (рис. 2). Рекомендуем ее к дальнейшему изучению.

Так как параметрическая скважина, в которой нами проводились магнитометрические исследования, находится в зоне смены значений аномалий магнитного поля, то можно предположить, что она пробурена в перспективной на обнаружение месторождения нефти и газа зоне глубинного разлома. С помощью методов сейс-

моакустической эмиссии и электромагнитного излучения на глубине 2225–2600 м обнаружены интервалы газовыделения из открытого ствола скважины. Примечательно, что аномалиеобразующий объект по магнитометрии, находящийся вблизи скважины в интервале 5167–5177 м имеет угол падения, сходный с углами падения разломов цветковых структур (60–85°).

Выводы

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. В центрах Оренбургской и Средневожской РКС встречены максимальные значения магнитных аномалий.
2. Месторождения нефти и газа в юго-западной части Оренбургской области часто приурочены к магнитным экстремумам. Конфигурация некоторых месторождений углеводородов повторяет форму магнитных аномалий.
3. Анализ геолого-геофизической информации юго-запада Оренбургской области показал, что магнитные аномалии связаны с глубинным строением фундамента. Совпадение неотектонических нарушений Оренбургской РКС и контуров магнитных аномалий указывает на их глубинное происхождение.
4. Современные сейсмические события часто приурочены к зонам резкой смены значений магнитных аномалий.
5. Магнитные аномалии не иллюстрируют строение поверхности фундамента, при этом на временных сейсмических разрезах высокоамплитудным глубинным разломам соответствует смена значений аномалий магнитного поля.
6. Результаты бурения и магнитометрических исследований параметрической скважины, вскрывшей фундамент в Предуральском краевом прогибе на склоне локальной магнитной аномалии, показывают, что скважина находится в нефтегазоперспективной зоне глубинного разлома и, возможно, цветковой структуры.
7. По результатам магнитометрических исследований ниже забоя скважины находится мощный магнитный объект, который вызывает повышение уровня вертикальной составляющей магнитного поля.
8. По карте магнитных аномалий выделена новая перспективная Самарская РКС, рекомендованная к дальнейшему изучению.
9. К новым критериям выявления залежей углеводородов можно отнести резкую смену значений магнитных аномалий и их конфигурацию.

Литература

1. Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А. Комплексная магнитометрическая аппаратура для исследований сверхглубоких и разведочных скважин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – 119 с.
2. Велиев Г.О. Роль геодинамического напряжения в формировании нефтегазовых структур в Каспийском море (на примере месторождений Шахдениз, Умид, Бабек, Булла-Дениз). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 36–50. DOI: 10.46698/VNC.2021.68.77.003.
3. Данилова Е.А. Радиально-концентрические структуры в фундаменте древней платформы и условия возникновения очагов генерации углеводородов: реконструкция по сеймотектоническим данным. // Геотектоника. – 2022. – №3. – С. 36–49. DOI: 10.31857/S0016853X22030043.
4. Данилова Е.А. Глубинное строение Оренбургской радиально-концентрической структуры: экспериментальное моделирование при флюидодинамических нагрузках и

сравнительный анализ образцов песчаников из пород нефтяных месторождений Западной Сибири. // Геотектоника. – 2023. – №2. – С. 25–38.

5. Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. Строение и нефтегазоносность додевонского мегакомплекса юго-восточной окраины Восточно-Европейской платформы (Часть 2. Схема тектонического районирования фундамента консолидированной коры и нефтегазоносность). // Уральский геофизический вестник. – 2021. – №1(43). – С. 12–19.

6. Керимов И.А. Моделирование гравитационного поля систем разломов и зон трещиноватости. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 59–71. DOI: 10.46698/VNC.2022.44.93.005

7. Логачев А. А., Захаров В. П. Магниторазведка. 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1979. – 351 с.

8. Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М., Соколов А.Г. Геодинамические процессы в разрабатываемых месторождениях углеводородов (на примере Южного Предуралья). / Под ред. П.В. Панкратьева – Екатеринбург: УрО РАН, 2015. – 186 с.

9. Трофимов В.А. Глубинные региональные сейсморазведочные исследования МОГТ нефтегазоносных территорий. – М.: ГЕОС, 2014. – 202 с.

10. Филиппова И.Б., Минц М.В., Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусков А.А. Объемная модель глубинного строения и история формирования Волго-Уральского кратона: Свидетельства плюмовой природы уникального гранулитогнейсового комплекса. // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики: Материалы XLI Тектонического совещ. Т. 2. – М.: 2007. – С. 379–383.

11. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51

12. Чотчаев Х.О., Бурдыева 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. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

13. Buijze L., Van den Bogert, P.A.J., Wassing B.B.T., Orlic B. & Ten Veen J.H. Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-induced seismic events in Rotliegend gas reservoir. // Netherlands J. Geosci. – 2017. – Vol. 46. No.5. – pp. 131–148.

14. Grillot J.C. Tectonics of Late and Post-hercynian Ages in the Western of the Iberian Plate (Portugal). // Comptesrendus de l'académie des sciences. – 1984. – Vol. 299. – pp. 665–670.

15. Dost B., Van Stiphout, A., Kühn D., Kortekaas M., Ruigrok E., and Heimann S. Probabilistic moment tensor inversion for hydrocarbon-induced seismicity in the groningen gas field, the Netherlands. Part 2: Application. // Seismol. Soc. Am. Bull. – 2020. – Vol. 110. No.5. – pp. 2112–2123. DOI: 10.1785/0120200076.

16. Hao H.J., Lin H.M., and Yang M.X. The Mesozoic in Chaoshan depression: A new domain of petroleum exploration. // China Offshore Oil and Gas. – 2001. – Vol. 15. No.3. – pp. 157–163. (in Chinese with English abstr.).

17. Mann P., Gahagan L., and Gordon M.B. Tectonic setting the world's giant oil and gas fields, in M.T. Halbouty, ed., Giant oil and gas fields of the Decade 1990-1999. // Memoirs of AAPG. – 2003. – Vol. 78. – pp. 15–105.

18. McKirdy D.M. Hydrocarbon generation and migration. – In: The Petroleum Geology of South Australia. – Vol. 2: Eromanga Basin. / Ed.by T.B. Cotton, M.F. Scardigno, J.E. Hibburt. // Dprtm. Primary Industr. Res., Adelaide, South Australia. – 2006. – 2nd edn. Vol. 2. Ch.10. – pp.2–9.

19. Naumann S., Sakariassen R. Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents sea. // GEOExPro, june. – 2019. – pp. 20–24.

20. Saadallah A. A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects. // GEOExPro, june. – 2019. – pp. 14–18.

References

1. Astrakhantsev Yu.G., Beloglazova N.A. Complex magnetometric equipment for studying superdeep and exploratory wells. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012. 119 p. (In Russ.)
2. Veliev G.O. The role of geodynamic stress in the formation of oil and gas structures in the Caspian Sea (on the example of the Shah Deniz, Umid, Babek, Bulla Deniz fields). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp 36 – 50. (In Russ.). DOI: 10.46698/VNC.2021.68.77.003
3. Danilova E.A. Radial-concentric structures in the basement of an ancient platform and conditions for the occurrence of hydrocarbon generation centers: reconstruction from seismotectonic data. *Geotectonics*. 2022. No. 3. pp. 36–49. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016853X22030043.
4. Danilova E.A. Orenburg radial-concentric structure at great depth: experimental modeling under fluid dynamic loads and comparative analysis of sandstone samples from oil fields in Western Siberia. *Geotectonics*. 2023. No. 2. pp. 25–38. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016853X23020029
5. Druzhinin V.S., Nachapkin N.I., Osipov V.Yu. Structure and oil and gas potential of the pre-Devonian megakomplex south-eastern margin of the east European Platform (part 2. scheme of tectonic zoning of the consolidated crust foundation and oil and gas potential). *Ural Geophysical Bulletin*. 2021. No. 1. Issue 43. pp. 12–19. (In Russ.) DOI: 10.25698/UGV.2021.1.2.12
6. Kerimov I.A. Modeling the gravitational field fault systems and fracture zones. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol 12.No. 4. pp. 59–71. (in Russ.). DOI: 10.46698/VNC.2022.44.93.005
7. Logachev A.A., Zakharov V.P. *Magnetic Exploration*. 5th ed., revised edition. Leningrad. Nedra, 1979. 351 p. (In Russ.)
8. Nesterenko M.Yu., Nesterenko Yu.M., Sokolov A.G. Geodynamic processes in developed hydrocarbon fields (on the example of the Southern Cis-Urals). Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2015. 186 p. (In Russ.)
9. Trofimov V.A. Deep regional seismic surveys of CDPM of oil and gas bearing territories. Moscow. GEOS, 2014. 202 p. (In Russ.)
10. Filippova I.B., Mints M.V., Babayants P.S., Blokh Yu.I., Trusov A.A. Volumetric model of the deep structure and the history of the formation of the Volga-Ural craton: Evidence of the plume nature of a unique granulite-gneiss complex. General and regional problems of tectonics and geodynamics. In: *Proceedings of the XLI Tectonic council*. Vol. 2. Moscow. 2007. pp. 379–383. (In Russ.)
11. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)
12. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
13. Buijze L., Van den Bogert, P.A.J., Wassing B.B.T., Orlic B. & Ten Veen J.H. Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-induced seismic events in Rotliegend gas reservoir. *Netherlands J. Geosci.* 2017. Vol. 46. No.5. pp. 131–148.
14. Grillo J.C. Tectonics of Late and Post-hercynian Ages in the Western of the Iberian Plate (Portugal). *Comptesrendus de l'académie des sciences*. 1984. Vol. 299. pp. 665–670.
15. Dost B., Van Stiphout, A., Kühn D., Kortekaas M., Ruigrok E., Heimann S. Probabilistic moment tensor inversion for hydrocarbon-induced seismicity in the groningen gas field, the Netherlands. Part 2: Application. *Seismol. Soc. Am. Bull.* 2020. Vol. 110. No.5. pp. 2112–2123. DOI: 10.1785/0120200076.
16. Hao H.J., Lin H.M., and Yang M.X. The Mesozoic in Chaoshan depression: A new domain

of petroleum exploration. *China Offshore Oil and Gas*. 2001. Vol. 15. No.3. pp. 157–163. (in Chinese with English abstr.)

17. Mann P., Gahagan L., and Gordon M.B. Tectonic setting the world's giant oil and gas fields, in M.T. Halbouty, ed., *Giant oil and gas fields of the Decade 1990-1999*. *Memoirs of AAPG*. 2003. Vol. 78. pp. 15–105.

18. McKirdy D.M. Hydrocarbon generation and migration. In: *The Petroleum Geology of South Australia*. Vol. 2: Eromanga Basin. Ed.by T.B. Cotton, M.F. Scardigno, J.E. Hibburt. Dprtm. Primary Industr. Res., Adelaide, South Australia. 2006. 2nd edn. Vol. 2. Ch.10. pp.2–9.

19. Naumann S., Sakariassen R. Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents sea. *GEOExPro*, June. 2019. pp. 20-24.

20. Saadallah A. A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects. *GEOExPro*, June. 2019. pp. 14–18.

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.835.24+ 551.243.8

[DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.93.88.003)

Оригинальная статья

Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан)

М.Ю. Маркин 

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

Статья поступила: 13.04.2023, доработана: 12.05.2023, одобрена к публикации: 23.05.2023

Резюме: Актуальность темы определяется необходимостью выявления геодинамически активных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценки их текущей активности, что является важнейшей задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений. Проявившиеся в последнее время серии разрушительных землетрясений в Турции и Сирии демонстрируют все более возрастающую активность литосферы, связанную с активизацией тектонических разломов. Одним из таких потенциально опасных районов проявления землетрясений является город Усть-Каменогорск (Республика Казахстан), расположенный в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС). **Цель работы:** оценить объемную активность радона и установить местоположения сейсмически опасных тектонических разломов ИЗС в пределах современных границ города Усть-Каменогорск, на основе эманационной съемки. **Методы работы.** Измерение плотности потока радона с поверхности грунта и измерение объемной активности радона (Rn^{222}) в пробах почвенного воздуха по профилям с применением измерительного комплекса «Альфарад плюс», предназначенного для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов. Количественной характеристикой величины аномалии при обработке полученной информации служил абсолютный параметр максимального значения объемной активности почвенного радона (Q_{max}) и относительный показатель коэффициента радоновой активности $K=Q_{max}/Q_{min}$. **Результаты работы.** Рассчитано среднее фоновое содержание радона в пределах участка исследований, которое составляет 619,4 Бк/м³. В простых случаях участок аномальных значений параметра Q имеет в поперечном сечении один максимум с постепенным или ступенчатым снижением концентрации почвенного радона к периферии. В большинстве случаев аномалия радона является сложной, прерывистой, что связано с неоднородным строением разломной зоны. По результатам эманационной съемки установлено, что в большинстве случаев вдоль разрывных нарушений фиксируются аномальные значения объемной активности Rn^{222} , что позволяет уточнить положение разломов на местности. Существенные неоднородности в распределении объемной активности Rn^{222} отмечаются вкрест простирания разломных зон и связаны с изменчивостью их проницаемости. Максимальные значения аномалий объемной активности Rn^{222} приурочены к наиболее активным в геодинамическом отношении участкам разломных зон. Существование в разломной зоне участков с низкой проницаемостью обусловлено наличием тонкодисперсного заполнителя или небольших блоков, почти не нарушенных открытыми разрывами.

Ключевые слова: Иртышская зона смятия, город Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, разломы, эманационная съемка, объемная активность радона.

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. Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 29-39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

[DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.93.88.003)

Original papers

Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan)

M.Y. Markin 

Ltd «GeoStroySystem», 41/1 Sayaly microdistrict, Alatau district, Almaty 050000,
Republic of Kazakhstan, e-mail: markin_maxim@inbox.ru

Received: 13.04.2023, revised: 12.05.2023, accepted: 23.05.2023

Abstract: The relevance of the topic is determined by the need to identify geodynamically active faults hidden under thick layers of sedimentary rocks and assess their current activity, which is the most important task in seismic hazard zoning and the basis for earthquake prediction. The recent series of devastating earthquakes in Turkey and Syria demonstrate an ever-increasing activity of the lithosphere associated with the activation of tectonic faults. One of such potentially dangerous areas of earthquake manifestation is the city of Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan), located within the Irtysh shear zone (IZS). **The aim of the work:** to estimate the volumetric activity of radon and to establish the location of seismically dangerous tectonic faults of the ISS within the modern boundaries of the city of Ust-Kamenogorsk, based on emanation survey. **Methods.** Measurement of radon flux density from the ground surface and measurement of radon volumetric activity (Rn222) in soil air samples along profiles using the Alfarad Plus measuring complex, designed to monitor radon, thoron and their daughter products. The absolute parameter of the maximum value of the volumetric activity of soil radon (Qmax) and the relative indicator of the coefficient of radon activity $K=Q_{max}/Q_{min}$ served as a quantitative characteristic of the anomaly in the processing of the information received. **Results.** The average background content of radon within the study area was calculated, which is 619.4 Bq/m³. In simple cases, the section of anomalous values of the Q parameter has one maximum in cross section with a gradual or stepwise decrease in the concentration of soil radon towards the periphery. In most cases, the radon anomaly is complex, discontinuous, which is associated with the inhomogeneous structure of the fault zone. Based on the results of the emanation survey, it was found that in most cases, anomalous values of the volumetric activity of Rn222 are recorded along the faults, which made it possible to specify the position of the faults on the ground. Significant inhomogeneities in the distribution of Rn222 volumetric activity are noted across the strike of fault zones and are associated with the variability of their permeability. The maximum values of Rn222 volumetric activity anomalies are associated with the geodynamically most active parts of the fault zones. The existence of areas with low permeability in the fault zone is due to the presence of finely dispersed aggregate or small blocks that are almost not disturbed by open fractures.

Keywords: Irtysh shear zone, Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan, faults, emanation survey, radon volumetric activity.

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

For citation: Markin M.Yu. Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 29-39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003.

Введение

Проявившиеся в последнее время серии разрушительных землетрясений в Турции и Сирии демонстрируют все более возрастающую активность литосферы, связанную 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; Chowdhury et al., 2022 и др.]. Одним из таких потенциально опасных районов проявления землетрясений является город Усть-Каменогорск (Республика Казахстан), расположенный в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС).

ИЗС – это крупнейшая структура в западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса, изучению которой посвящено множество работ [Sengör, Natal'in, 1996; Берзин, Кунгурцев 1996; Сенников и др., 2003; Добрецов, 2003; Vladimirov et al., 2008, Buslov, 2011; и др.]. По данным этих исследователей ИЗС представляет собой достаточно широкую (1,5–20,0 км) зону глубинного разлома, протягивающуюся по территории России, Восточного Казахстана (г. Рубцовск, г. Усть-Каменогорск) в Китай (г. Фуюн) и далее в Монголию более чем на 1000 км. Внутреннее строение ИЗС определяется системой разнородных блоков и пластин, отличающихся степенью вовлечения в деформационные процессы и уровнем метаморфизма, и разделенных отдельными сместителями разломов. Исходя из комплекса геологических данных ИЗС сложена тектонизированными породами Калба-Нарымской структурно-формационной зоны (D_2 - C_1) (рис. 1). Геологические характеристики ее строения, проявлений магматизма и результаты геофизических исследований приведены в работах [Марьин, 1981; Кузевный, 1981; Лопатников, 1982; Ермолов, 2013 и др.].

Целью исследований является установление местоположения сейсмически опасных тектонических разломов ИЗС в пределах современных границ г. Усть-Каменогорск, на основе определения объемной активности радона в подпочвенном воздухе по результатам эманационной съемки.

Материал и методы исследования

Для изучения подходов к оценке сейсмической опасности территории городской агломерации Усть-Каменогорска проведен комплекс работ, включающий эманационную съемку территории, которая представляет собой одного из эффективных методов выявления активных тектонических разломов. Именно по тектоническим разломам осуществляется обмен атмосферными и эндогенными газами, в том числе за счет нисходящих потоков кислорода и восходящих потоков радона [Seminsky et al., 2014]. Аномалии повышенной объемной активности радона (ОАР) в разломных зонах напрямую связаны с их геодинамической активностью [Utkin et al., 2006; Ambrosino et al., 2020; Firdaus et al., 2020; Бирюлин и др., 2021]. Чем активнее разлом, тем интенсивнее эманации радиоактивного газа [Матишов и др., 2010; Маркин и др., 2016; Хулелидзе и др., 2016; Чотчаев и др., 2021; Заалишвили и др., 2022].

Исследования проводились с июня по сентябрь 2022 г. Было отработано 46 профилей, общей протяженностью 20,3 км. Профили эманационной съемки располагались вкрест простирания разломных зон в тех местах, где главные особенности их строения отчетливо определялись по данным полевых геологических наблюдений (рис. 1). Профили пересекали разно ориентированные части разломов с расстоя-

ниями между пунктами опробования от 15 до 100 м, соответствующими краям и центральной части разломов.

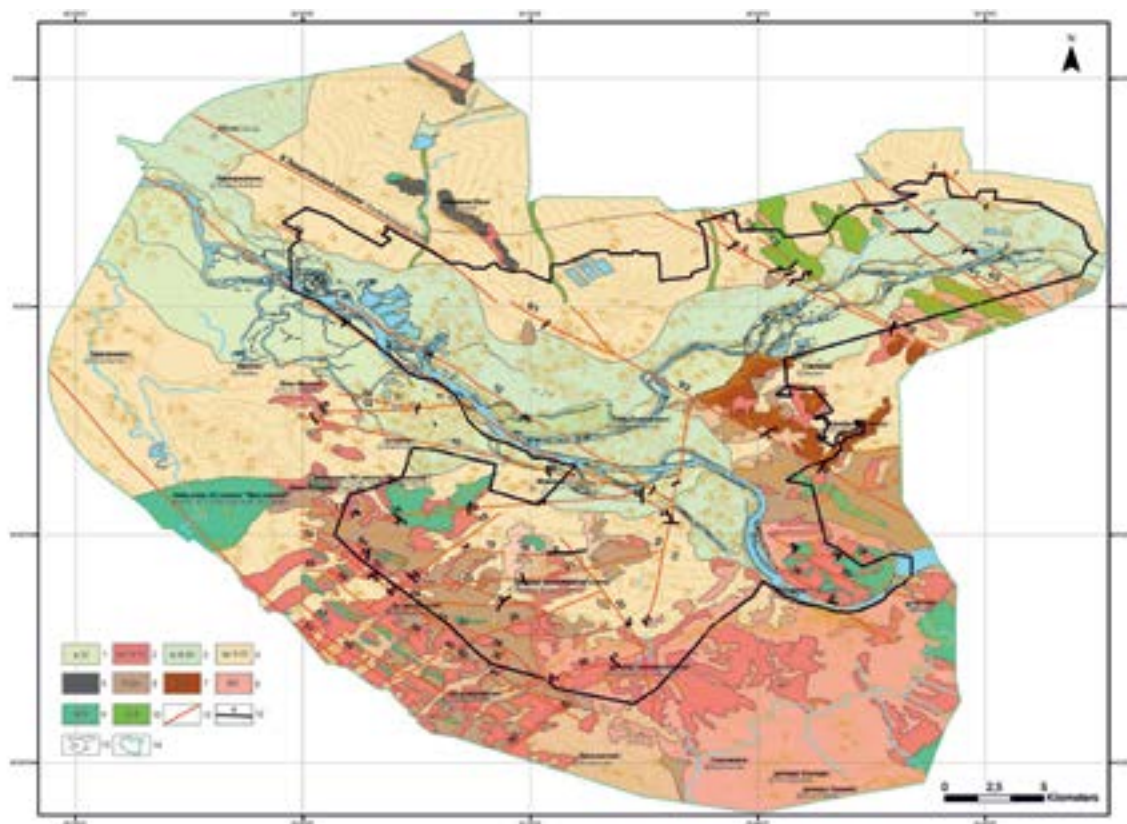


Рис 1. Геологическая карта участка исследований с отображением профилей эманационной съемки:

- 1 – аллювиальные отложения пойм и русел рек; 2 – элювиально-делювиальные отложения; 3 – аллювиальные отложения первой надпойменной террасы; 4 – рорская серия (делювиально-пролювиальные отложения); 5 – такырская свита (алевролиты, песчаники, пелиты); 6 – кыставкурчумская и лосишенская свиты (алевролиты, песчаники, линзы известняков, сланцы); 7 – орловская и березовская свиты (песчаники, алевролиты, гравелиты, туффиты, туффопесчаники); 8 – нерасчлененные интрузии кислого состава (биотитовые гнейсо-гранодиориты, биотитовые граниты, кварцевые порфириды); 9 – нерасчлененные интрузии основного состава (диабазы, габбро-диабазы, дацитовые порфириды, габбро-диориты); 10 – джайды-карагайская свита (сланцы, амфиболиты); 11 – разрывное нарушение; 12 – профили эманационной съемки и их номера; 13 – кадастровая граница г. Усть-Каменогорск; 14 – перспективная граница г. Усть-Каменогорск /

Fig 1. Geological map of the study area showing emanation survey profiles:

- 1 – alluvial deposits of floodplains and riverbeds; 2 – eluvial-deluvial deposits; 3 – alluvial deposits of the first floodplain terrace; 4 – Ror series (deluvial-proluvial deposits); 5 – Takyр Formation (siltstones, sandstones, pelites); 6 – Kystavkurchumskaya and Losishenskaya suites (siltstones, sandstones, limestone lenses, shales); 7 – Orlovskaya and Berezovskaya suites (sandstones, siltstones, gravelstones, tuffites, tuff sandstones); 8 – undivided intrusions of acidic composition (biotite gneiss-granodiorites, biotite granites, quartz porphyrites); 9 – undivided mafic intrusions (diabases, gabbro-diorites, dacitic porphyrites, gabbro-diorites); 10 – Dzhaid-Karagai Formation (shales, amphibolites); 11 – fault; 12 – emanation survey profiles and their numbers; 13 – cadastral boundary of Ust-Kamenogorsk; 14 – prospective border of Ust-Kamenogorsk

Для измерения плотности потока радона с поверхности грунта и измерения объемной активности радона (Rn^{222}) в пробах почвенного воздуха был выбран из-

мерительный комплекс для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс».

Измерение ОАР в почвенном воздухе основано на отборе пробы почвенного воздуха из шпура в пробоотборник, определении ОАР в пробоотборнике путем перемешивания пробы между объемами пробоотборника и измерительной камеры и последующем измерении ОАР в измерительной камере блока измерения ОАР.

При отборе средняя температура окружающей среды составляла 29°, средняя относительная влажность воздуха 21%, атмосферное давление 735 мм рт. ст., что удовлетворяло условиям работы с измерительным комплексом. Отбор проб производился в ранее подготовленном шпуре, глубиной от 50 до 70 см и диаметром до 5 см, куда помещалась приемная камера, соединенная при помощи штуцеров с автономной воздуходувкой и присыпалась землей. Шпур герметично закрывался на 30 мин., поскольку именно за это время в любом грунте района исследований концентрации радона в данном объеме и в подпочвенном воздухе выравниваются. По истечении срока выдержки накопительной камеры в почве, ее извлекают. Далее проводились измерения ОАР в измерительной камере. Измерения осуществлялись с 8:30 до 17:00 часов в сухую погоду. Замер дублировался, если происходило резкое изменение давления, температуры или влажности воздуха, значения которых фиксировались одновременно с величиной объемной активности радона (Q). После каждого определения прибор очищался посредством прокачки рабочей камеры атмосферным воздухом.

Количественной характеристикой величины аномалии при обработке полученной информации служил абсолютный параметр максимального значения объемной активности почвенного радона ($Q_{\max}$) и относительный показатель коэффициента радоновой активности (K). $Q_{\max}$ отражает интенсивность аномалии, которая наиболее важна для оценки радоновой опасности населенных территорий.

Для количественного сопоставления разломов по радоновой активности использовался относительный показатель: $K = Q_{\max}/Q_{\min}$, где $Q_{\max}$ – максимальное значение параметра Q в пределах профиля (интенсивность аномалии), а $Q_{\min}$ – минимальное значение параметра Q в породах за границей зоны разлома. Расчет фоновых значений производился по формуле: $A_{\phi} = \sum A/N$, где A_{ϕ} – фоновое значение, A – измеренное значение, N – количество измерений.

Результаты работы и их обсуждение

По результатам геологических наблюдений установлено, что среди разрывных нарушений преобладают разломы согласные с простиранием ИЗС и, в меньшей степени, расположенные вкрест простираения ИЗС. Углы падения обеих систем крутые (рис. 2).

Сместители большинства разломов выполнены милонитами, достигающими нескольких метров по мощности, а также брекчиями трения и расщепления. В зоне поверхностного выветривания (от 6 до 15 м), зоны сместителей расширены и заполнены рыхлым материалом, преимущественно глинистым, с примесью щебня и дресвы.

Преобладающими являются продольные относительно ИЗС и региональной расщепленности пород разломы. Они нередко меняют направление, разветвляются на более мелкие трещины, часть из которых выклинивается по простираению. Физическое состояние пород в зонах разломов зависит не только от степени дробления и расщепления, но и от вторичной цементации кварцем, кальцитом и турмалином.

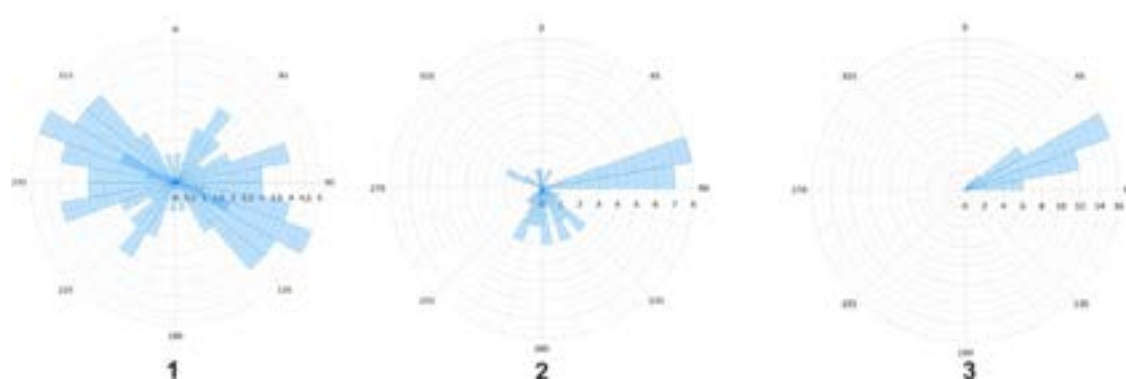


Рис. 2. Розы-диаграммы основных пространственных характеристик сместителей разрывных нарушений: 1 – азимутов простирания; 2 – азимутов падения; 3 – углов падения /

Fig. 2. Rose-diagrams of the main spatial characteristics of fault displacement faults: 1 – strike azimuths; 2 – dip azimuths; 3 – angles of incidence

Результаты, полученные при обработке полевой информации, по каждому из профилей представлены в таблице 1.

Степень радоновой активности разлома отражает показатель К, который представляет собой отношение интенсивности приразломной эманационной аномалии ($Q_{\max}$) к минимальной величине объемной активности радона за ее пределами.

Таблица 1 / Table 1

Количественные параметры, полученные по данным эманационных исследований в пределах современных границ г. Усть-Каменогорск /
Quantitative parameters obtained from the data of emanation studies within the modern boundaries of the city of Ust-Kamenogorsk

Номер профиля / Profile number	Протяженность профиля, м / Profile length, m	Номер разрывного нарушения / Fault number	$Q_{\max}$	$Q_{\min}$	Q_{cp}	К
1	258,1	1	520	89	291,30	5,84
2	303,3	2	507	102	259,14	4,97
3	1480,6	3,4	1940	120	605,63	16,17
4	221,7	3	1025	309	696,00	3,32
5	192	3	1290	229	638,75	5,63
6	635,3	7/3, 5	1309	120	616,58	10,91
7	439	6, 5	1025	160	546,77	6,41
8	1045,9	7/3, 5	1799	200	713,57	9,00
9	1031	7/2, 5	1366	188	656,82	7,27
10	353,1	9	1705	202	731,75	8,44
11	614	9	2053	110	657,94	18,66
12	619	9	2677	190	1231,95	14,09
13	441	26	845	179	448,33	4,72
14	400	26	804	90	323,58	8,93

15	310	10	498	149	247,14	3,34
16	166,5	20	597	152	286,40	3,93
17	1051	20	704	94	265,82	7,49
18	729	24, 23/1	930	213	495,56	4,37
19	542	21	656	40	223,72	16,40
20	370	13	1478	238	810,73	6,21
21	252	12	2482	239	866,44	10,38
22	378	14	1158	347	629,40	3,34
23	132	бн	250	100	162,80	2,50
24	419	14	1639	140	634,61	11,71
25	485	15	629	150	346,44	4,19
26	118	12	902	344	554,86	2,62
27	538	бн	1903	95	632,33	20,03
28	251	17	390	90	203,50	4,33
29	443	33	1150	110	665,64	10,45
30	305	18, 22	2689	439	1233,75	6,13
31	461	15	950	413	693,18	2,30
32	558	16	1790	382	888,54	4,69
33	212	16	736	144	419,00	5,11
34	562	16	1002	249	551,33	4,02
35	248	16	1236	105	570,13	11,77
36	272	18	2077	401	872,82	5,18
37	466	18	903	311	520,07	2,90
38	307	34	819	105	427,14	7,80
39	384	36	311	80	177,44	3,89
40	332	35	1048	104	459,80	10,08
41	442	11	2890	430	1164,11	6,72
42	670	13	850	191	522,79	4,45
43	316	13	1732	455	978,50	3,81
44	452	10	2904	401	1009,78	7,24
45	298	10	1738	438	939,71	3,97
46	369	5, 7/3	923	489	715,88	1,89

Этот параметр меньше, чем $Q_{\max}$ зависит от метеоусловий, мощности перекрывающих осадков и радиоактивности пород, он отражает контрастность радоновой аномалии у разлома.

Рассчитанное среднее фоновое содержание радона в пределах участка исследований составляет 619,4 Бк/м³. В наиболее простых случаях участок аномальных значений параметра Q имеет в поперечном сечении один максимум с постепенным или ступенчатым снижением концентрации почвенного радона к периферии (рис. 3).

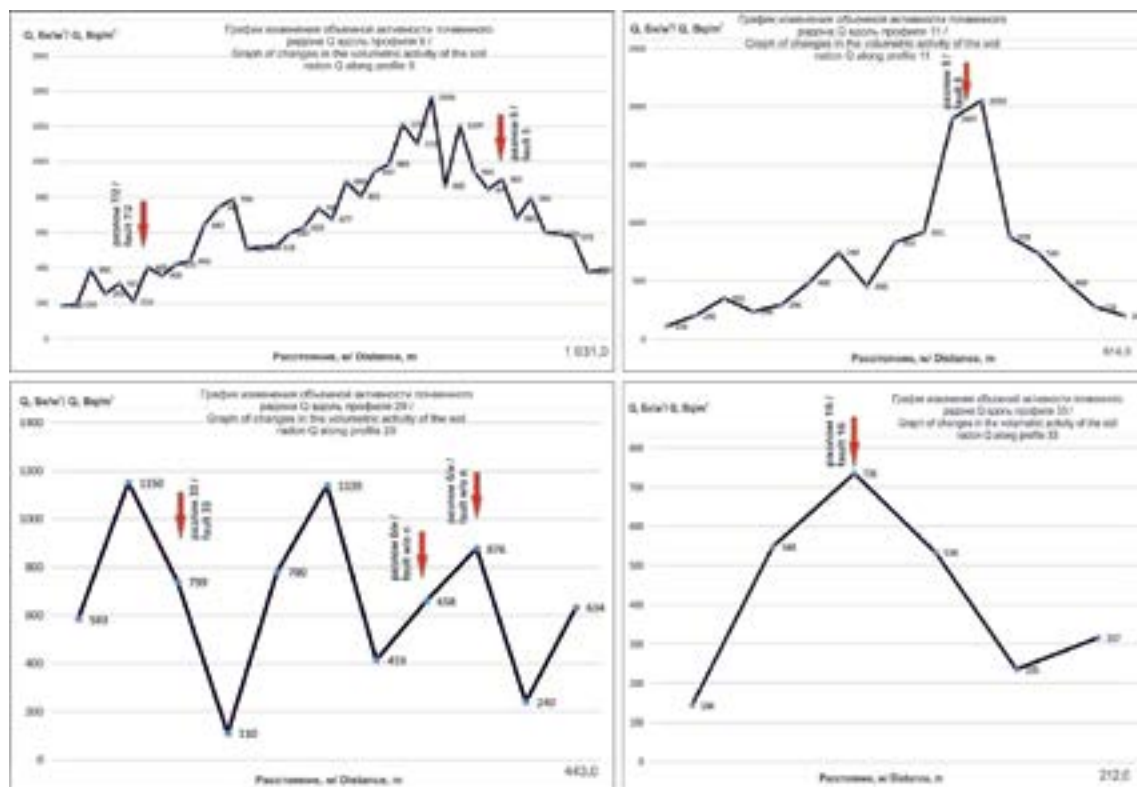


Рис. 3. Типичные графики распределения ОАР /

Fig. 3. Typical graphs of the distribution of RVA

Однако в большинстве изученных ситуаций распределений аномалий радона является более сложным, как правило, прерывистой, что связано с неоднородным строением разломной зоны. Существование в разломной зоне участков с низкой проницаемостью обусловлено наличием тонкодисперсного заполнителя или небольших блоков, почти не нарушенных открытыми разрывами.

Наиболее крупные из разрывов на территории г. Усть-Каменогорска проявляются в виде локальных экстремальных значений Q , – максимумов при заполнении зоны сместителя проницаемой разломной брекчией и минимумов, если тектониты подвергались интенсивному выветриванию или представлены глиной трения.

Выводы

1. Впервые в пределах региональной Иртышской зоны смятия проведены работы с целью уточнения положения разрывных нарушений с помощью геологических маршрутов и профильной эманационной съемки с измерением объемной активности Rn^{222} .

2. По результатам эманационной съемки установлено, что в большинстве случаев вдоль разрывных нарушений фиксируются аномальные значения объемной активности Rn^{222} , что позволяет уточнить положение разломов на местности.

3. Существенные неоднородности в распределении объемной активности Rn^{222} отмечаются вкрест простирания разломных зон и связаны с изменчивостью их проницаемости.

4. Максимальные значения аномалий объемной активности Rn^{222} приурочены к наиболее активным в геодинамическом отношении участкам разломных зон.

Литература

1. Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области. // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. №1. – С. 63–81.
2. Бирюлин С.В., Козлова И.А., Юрков А.К. Связь между аномалиями объемной активности радона и процессом подготовки землетрясений (на примере Южных Курил). // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – №4(64). – С. 62–70. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-4-62-70
3. Добрецов Н.Л. Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан). // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44(1-2). – С. 5–27.
4. Ермолов П.В. Актуальные проблемы изотопной геологии и металлогении Казахстана. – Караганда: Издательско-полиграфический центр Казахстанско-Российского университета, 2013. – 206 с.
5. Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объемной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003
6. Кузубный В.С., Ермолаев П.В., Полянский Н.В., Лопатников В.В., Марьин А.М. Магматические формации и комплексы Зайсанской складчатой области и проблема их корреляции. // Проблемы магматической геологии Зайсанской складчатой области. – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1981. – Т. 40. – С. 4–39.
7. Лопатников В.В., Пономарева А.П., Степанов А.С. Магматизм и рудоносность Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана. – М.: Наука, 1982. – 250 с.
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. Марьин А.М. Доорогенные магматические и ультраметагенные комплексы Иртышской сдвиговой зоны смятия. // Проблемы магматической геологии Зайсанской складчатой области. – 1981. – Т. 40. – С. 52–72.
10. Матишов Г.Г., Парада С.Г., Давыденко Д.Б. Выбор рудоперспективных площадей по результатам дистанционной флюидоиндексации как фактор рационального недропользования в условиях горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2010. – №3(5). – С. 5–62.
11. Сенников Н.В., Ивата К., Ермиков В.Д., Обут О.Т., Хлебникова Т.В. Океанические обстановки седиментации и фаунистические сообщества в палеозое южного обрамления Западно-Сибирской плиты. // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. №1-2. – С. 156–171.
12. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
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.2020.87.26.005
14. 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. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
15. Ambrosino F., Sabbarese C., Roca V., Giudicepietro F., Chiodini G. Analysis of 7-years Radon time series at Campi Flegrei area (Naples, Italy) using artificial neural network method. // Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – Vol. 163. – Article 109239. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109239

16. 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. – Vol. 52. No.1. – pp. 52–71. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.12.005
17. Chowdhury S., Deb A., Barman C., Nurujjaman M., & Bora D. K. Simultaneous monitoring of soil Rn-222 in the Eastern Himalayas and the geothermal region of eastern India: an earthquake precursor. // *Natural Hazards*. – 2022. DOI: 10.1007/s11069-022-05235-9
18. 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
19. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2020. – Vol. 15(3). – pp. 1787-1798
20. Sengör 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.
21. Seminsky K.Z., Bobrov A.A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zones: spatial characteristics. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50. No.6. – pp. 795–813. DOI: 10.1134/S1069351314060081
22. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., Mamyrov E., Kan M.V., Krivashchev S.V. Radon monitoring in the northern Tien Shan with application to the process of tectonic earthquake nucleation. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2006. – Vol. 42. No.9. – pp. 775–784. DOI: 10.1134/S1069351306090072
23. Vladimirov A.G., Kruk N.N., Khromykh S.V., Polyansky O.P., Vladimirov V.G., Travin A.V., Babin G.A., Kuibida M.L., Vladimirov V.D., Chervov V.V. Permian magmatism and lithospheric deformation in the Altai caused by crustal and mantle thermal processes. // *Russian Geology and Geophysics*. – 2008. – Vol. 49. No.7. – pp. 468–479. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.06.006

References

1. Berzin N.A., Kungurtsev L.V. Geodynamic interpretation of the geological complexes of the Altai-Sayan region. *Geology and geophysics*. 1996. Vol. 37. No. 1. pp. 63–81. (In Russ.)
2. Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. Relationship between anomalies of radon volumetric activity and the process of earthquake preparation (on the example of the South Kuriles). *Proceedings of the Ural State Mining University*. 2021. No. 4. Issue 64. pp. 62–70. (In Russ.) DOI:10.21440/23072091202146270.
3. Dobretsov N.L. Evolution of structures of the Urals, Kazakhstan, Tien Shan, and Altai-Sayan region within the Ural-Mongolian fold belt (Paleo-Asian Ocean). *Geology and geophysics*. 2003. Vol. 44. pp. 5–27. (In Russ.)
4. Ermolov P.V. Actual problems of isotope geology and metallogeny in Kazakhstan. Karaganda. Kazakh-Russian University, 2013. 206 p. (In Russ.)
5. Zaalishvili V.B., Biryulin S.V., Kozlova I.A., Melkov D.A., Yurkov A.K. Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 35–50. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.
6. Kuzebny V.S., Ermolaev P.V., Polyansky N.V., Lopatnikov V.V., Maryin A.M. Igneous formations and complexes of the Zaisan folded area and the problem of their correlation. *Problems of igneous geology of the Zaisan folded area*. Alma-Ata, Science of the Kazakh SSR, 1981. Vol. 40. pp. 4–39. (In Russ.)
7. Lopatnikov V.V., Ponomareva A.P., Stepanov A.S. Magmatism and ore content of the Kalba-Naryn zone of East Kazakhstan. Moscow. Nauka, 1982. 250 p. (In Russ.)
8. Markin M.Yu., Parada S.G., Shishkalov I.Yu. The composition and structure of Malki-nultrabasite array according to the results of re-interpretation of aeromagnetic data (Kabardino-

Balkar Republic). *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2016. No. 3. pp. 98–110. (In Russ.)

9. Maryin A.M. Preorogenic igneous and ultrametagenic complexes of the Irtysh strike-slip shear zone. *Problems of igneous geology of the Zaisan folded area*. 1981. Vol. 40. pp. 52–72. (In Russ.)

10. Matishov G.G., Parada S.G., Davydenko D.B. Selection of ore-prospective areas based on the results of remote fluid indexation as a factor of rational subsoil use in mountainous areas. *Sustainable development of mountain territories*. 2010. No. 3. Vol. 5. pp. 5–62. (In Russ.)

11. Sennikov N.V., Ivata K., Ermikov V.D., Obut O.T., Khlebnikova T.V. Oceanic sedimentation settings and fauna associations in the Paleozoic on the southern framing of the West Siberian Plate. *Geology and geophysics*. 2003. Vol. 44. No. 1-2. pp. 156–171. (In Russ.)

12. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (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. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

15. Ambrosino F., Sabbarese C., Roca V., Giudicepietro F., Chiodini G. Analysis of 7-years Radon time series at CampiFlegrei area (Naples, Italy) using artificial neural network method. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Vol. 163. Article 109239. DOI: 10.1016/j.apradi-so.2020.109239

16. 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. Vol. 52. No. 1. pp. 52–71. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.12.005

17. Chowdhury S., Deb A., Barman C., Nurujjaman M., Bora D.K. Simultaneous monitoring of soil Rn-222 in the Eastern Himalayas and the geothermal region of eastern India: an earthquake precursor. *Natural Hazards*. 2022. DOI: 10.1007/s11069-022-05235-9

18. 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

19. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2020. Vol. 15. No. 3. pp. 1787-1798

20. Sengör 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.

21. Seminsky K.Z., Bobrov A.A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zones: spatial characteristics. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. No. 6. pp. 795–813. DOI: 10.1134/S1069351314060081

22. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., Mamyrov E., Kan M.V., Krivashchev S.V. Radon monitoring in the northern Tien Shan with application to the process of tectonic earthquake nucleation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006. Vol. 42. No. 9. pp. 775–784. DOI: 10.1134/S1069351306090072

23. Vladimirov A.G., Kruk N.N., Khromykh S.V., Polyansky O.P., Vladimirov V.G., Travin A.V., Babin G.A., Kuibida M.L., Vladimirov V.D., Chervov V.V. Permian magmatism and lithospheric deformation in the Altai caused by crustal and mantle thermal processes. *Russian Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49. No. 7. pp. 468–479. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.06.006

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.348.435

DOI: [10.46698/VNC.2023.83.75.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.83.75.004)

Оригинальная статья

Динамика изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины в моделях сейсмогенеза

Ю.М. Вольфман 

Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Россия, 295007, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4, e-mail: seism.volf@gmail.com

Статья поступила: 28.04.2023, доработана: 26.05.2023, одобрена к публикации: 05.06.2023

Резюме: Актуальность работы. Изменения геодинамических обстановок и, соответственно, напряженно-деформированного состояния земной коры влияют на характер сейсмической активности региона. Прямыми критериями, позволяющими оценить пространственно-временные изменения в земной коре и установить общие закономерности формирования регионального сейсмогенеза, являются фокальные механизмы землетрясений. **Цель исследований.** Изучить деформационные режимы и кинематические обстановки регионального сейсмогенеза, исследовать влияние трансформаций и инверсий полей напряжений на пространственные и структурно-кинематические характеристики сейсмогенных разрывов. **Методы исследования.** Применен метод построения стереографических моделей сейсмогенеза по фокальным механизмам землетрясений, разработанный и апробированный автором при исследовании сейсмически активных регионов. **Результаты работы.** Приведены результаты тектонофизического анализа кинематических обстановок и деформационных режимов сейсмогенеза в пределах Черноморской впадины. В качестве критериев напряженно-деформированного состояния коры использовались типы деформационных режимов разрывообразования в очаге и кинематические обстановки сейсмогенеза. В совокупности они отражают характер напряженного состояния среды (сжатие или растяжение) и направление сжимающих или растягивающих усилий. Обосновано влияние на процессы сейсмогенеза первичных и вторичных, трансформированных полей напряжений. Построены стереографические квазимодели сейсмогенеза, которые аппроксимируют значения параметров фокальных механизмов, сформировавшихся в идентичных кинематических обстановках. Установлены основные особенности локальных трансформаций полей напряжений. Приведены специфические соотношения между параметрами квазимodelей сейсмогенеза первичного поля и значениями одноименных параметров фокальных механизмов землетрясений, сформированных в идентичной кинематической обстановке, но в условиях трансформированных систем напряжений. Во всех случаях трансформации происходят путем вращения тензора напряжений вокруг направления действия одной из главных осей с изменением положения двух других осей. Выполнен анализ изменения во времени кинематических обстановок в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон Крымско-Черноморского региона. Исследованы кратковременные инверсионные изменения кинематических обстановок сейсмогенеза двух типов. В первом случае сжатие сменяется растяжением в том же направлении (и наоборот). Во втором случае одна из осей главных напряжений, которая определяет тип кинематической обстановки (например, сжатия), меняет свое направление на перпендикулярное к ее первоначальному положению. Установлены пространственно-кинематические параметры сейсмических разрывов, а также общие закономерности их образования в условиях воздействия инверсионных полей напряжений.

Ключевые слова: сейсмогенез, поля напряжений, оси главных напряжений, фокальные механизмы, кинематические обстановки, трансформации полей напряжений, инверсии полей напряжений.

Для цитирования: Вольфман Ю.М. Динамика изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины в моделях сейсмогенеза. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 40-54. DOI: [10.46698/VNC.2023.83.75.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.83.75.004).

GEOFYSICS

[DOI: 10.46698/VNC.2023.83.75.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.83.75.004)

Original papers

Dynamics of changes in the stress-strain state of the Earth's crust of the Black Sea Basin in models of seismogenesis

Yu. M. Volfman 

Institute of Seismology and Geodynamics, V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
4 Academician V.I. Vernadsky Avenue, Simferopol 295007, Russian Federation,
e-mail: seism.volf@gmail.com

Received: 28.04.2023, revised: 26.05.2023, accepted: 05.06.2023

Abstract: Relevance. Changes in geodynamic conditions and, accordingly, the stress-strain state of the Earth's crust affect the nature of seismic activity in the region. The focal mechanisms of earthquakes are the direct criteria that allow us to assess the spatio-temporal changes in the Earth's crust and to establish general patterns of the formation of regional seismogenesis. **Aim.** To study the deformation regimes and kinematic conditions of regional seismogenesis, to investigate the influence of transformations and inversions of stress fields on the spatial and structural-kinematic characteristics of seismogenic ruptures. **Methods.** The method of constructing stereographic models of seismogenesis based on the focal mechanisms of earthquakes, developed and tested by the author in the study of seismically active regions, is applied. **Results.** The results of the tectonophysical analysis of kinematic settings and deformation regimes of seismogenesis within the Black Sea basin are presented. The types of deformation modes of rupture formation in the hearth and kinematic conditions of seismogenesis were used as criteria for the stress-strain state of the crust. Collectively, they reflect the nature of the stressed state of the medium (compression or stretching) and the direction of compressive or tensile forces. The influence on the processes of seismogenesis of primary and secondary, transformed of the stress fields. Stereographic quasi-models of seismogenesis are constructed, which approximate the values of the parameters of focal mechanisms formed in identical kinematic settings. The main features of local transformations of stress fields are established. The specific relations between the parameters of the quasimodels of primary field seismogenesis and the values of the parameters of the same name of the focal mechanisms of earthquakes formed in an identical kinematic environment, but under conditions of transformed stress systems are given. In all cases, transformations occur by rotating the stress tensor around the direction of action of one of the main axes with a change in the position of the other two axes. The analysis of changes in time of kinematic conditions in earthquake foci of the South-Coast and Tuapse-Anapa seismogenic zones of the Crimean-Black Sea region is carried out. Short-term inversion changes of kinematic conditions of seismogenesis of two types are investigated. In the first case, compression is replaced by stretching in the same direction (and vice versa). In the second case, one of the axes of the main stresses, which determines the type of kinematic situation (for example, compression), changes its direction to perpendicular to its original position. The spatial and kinematic parameters of seismic discontinuities, as well as the general patterns of their formation under the influence of inversion stress fields, have been established.

Keywords: seismogenesis, stress fields, axes of main stresses, focal mechanisms, kinematic settings, stress field transformations, inversions of stress fields.

For citation: Volfman Yu.M. Dynamics of changes in the stress-strain state of the Earth's crust of the Black Sea Basin in models of seismogenesis. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(2): 40-54. DOI: 10.46698/VNC.2023.83.75.004.

Введение

Анализ изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины выполнен с использованием данных о фокальных механизмах землетрясений, которые позволяют отслеживать кратковременные вариации сейсмогенерирующих полей напряжений региона. В процессе анализа задействовано 52 опубликованных решения механизмов очагов [Пустовитенко 2002, 2022; Пустовитенко, Эреджепов, 2020, 2021а, б; Габсатарова и др., 2013а, б и др.], полученных на основе теории дислокации в рамках модели двойного диполя по методике [Введенская, 1969] с использованием знаков первых вступлений сейсмических волн на станции регистрации.

Критерии оценки напряженно-деформированного состояния коры региона

В качестве основных критериев, характеризующих в момент землетрясения особенности напряженно-деформированного состояния коры, использовались: а) типы *деформационных режимов* разрывообразования в очаге, определяемые по соотношению углов наклона осей главных напряжений [Гущенко и др., 1991]; б) *кинематические обстановки* сейсмогенеза, отражающие характер напряженного состояния среды (сжатие или растяжение) и направление сжимающих или растягивающих усилий. При этом очаги, имеющие близкие значения параметров (ориентировок главных осей, векторов смещений, элементов залегания нодальных плоскостей) и характеризующиеся сходными кинематическими обстановками и деформационными режимами, объединялись в парагенезисы сейсмогенных разрывов и смещений, отражение которых на стереограмме рассматривается в качестве *стереографической модели сейсмогенеза*. Этот способ апробирован на тех сегментах Средиземноморского пояса, для которых имеются статистически представительные данные по фокальным механизмам землетрясений – Загрос, Вранча и других [Volfman et al., 2017]. Поскольку региональный каталог решений механизмов очагов для Черноморской впадины не столь представительен, результаты унификации тензоров напряжений в однотипных очагах для разных кинематических обстановок можно обозначить как «квазимодели».

Большинство землетрясений исследуемой выборки является коровыми с гипоцентрами на глубинах до 40 км; и только два из них могут рассматриваться как нижнекоровые или верхнемантийные. Особенности их пространственной локализации отражают приуроченность однотипных фокальных механизмов к разным геоструктурам региона (рис. 1).

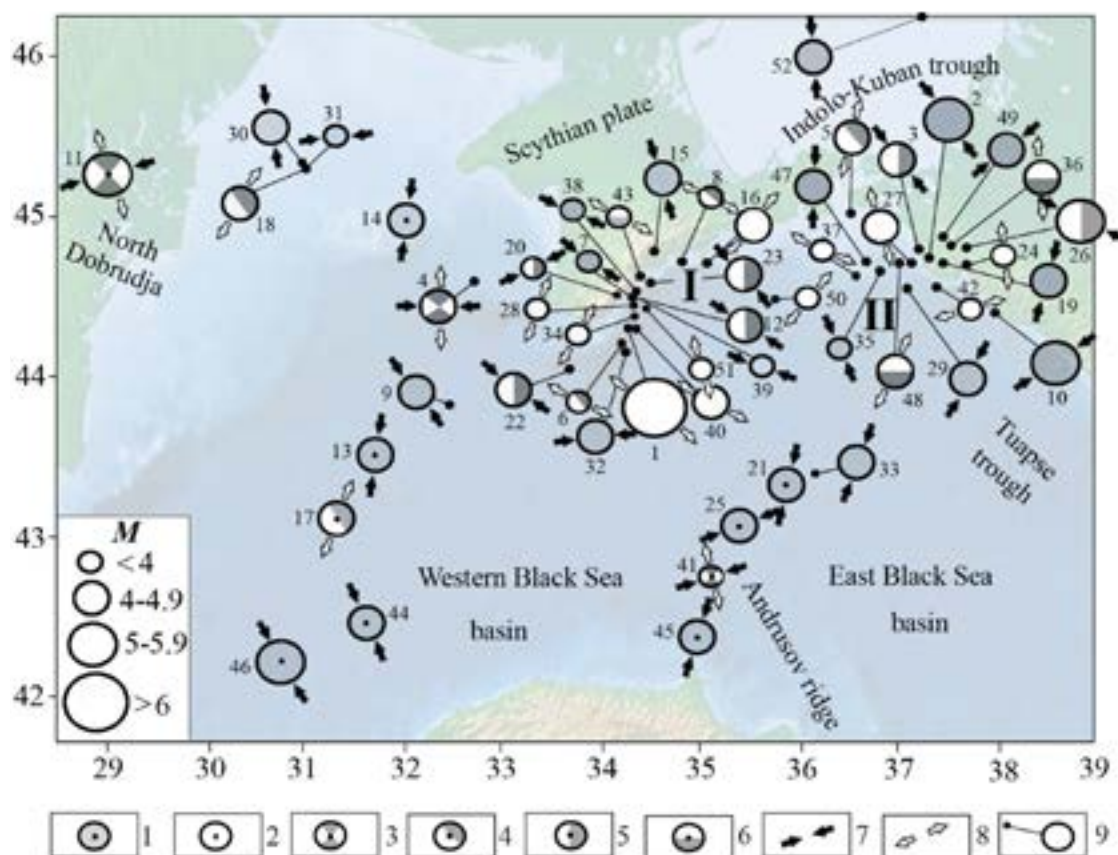


Рис. 1. Схема размещения землетрясений региона, для которых получены решения механизмов очагов. Условные обозначения: 1–6 – тип деформационного режима в очаге (1 – взбросовый, 2 – сбросовый, 3 – сдвиговый, 4 – сдвига-сбросовый, 5 – взбросо-сдвиговый, 6 – сбросо-сдвиговый); 7–8 – направление действия напряжений, обусловивших обстановки сжатия (7) и растяжения (8); 9 – очаги, снесенные от их местоположения; размер пуансонов пропорционален magnitude землетрясения (врезка). Арабские цифры – номера очагов в региональном каталоге фокальных механизмов [Вольфман и др., 2022]; римские цифры – области максимальной концентрации очагов: I – Южнобережная, II – Туапсинско-Анапская /

Fig. 1. Distribution scheme of earthquakes in the region, for which the solutions of focal mechanisms were obtained. Legend: 1–6–type of deformation regime in the source (1 – thrust fault, 2 – slip fault, 3 – shift fault, 4 – shift–slip fault, 5 – thrust–shift fault, 6 – slip–shift fault); 7–8 – the direction of action of the stresses that caused the conditions of compression (7) and tension (8); 9 – sources removed from their location; the size of the punches is proportional to the magnitude of the earthquake (inset). Arabic numbers are source numbers in the regional catalog of focal mechanisms [Volfman et al., 2022]; Roman numerals are areas of maximum concentration of sources: I – Yuzhnoberezhnaya, II – Tuapse–Anapa

Методы исследований

В количественном отношении в регионе доминируют очаги, отнесенные (по [Гинтов, 2005]) к «идеальным» деформационным режимам – взбросовому, сбросовому и сдвиговому, в которых две оси главных напряжений являются субгоризонтальными, а третья – субвертикальной. Они составляют 73% от общего числа фокальных механизмов, являясь индикаторами кинематических обстановок в квазиמודелях регионального сейсмогенеза. Отметим, что из почти 2-х тысяч землетрясений Средиземноморского пояса (от Атлантического океана до Каспийского моря и от Северной Африки до Центральной Европы), для которых получены решения механизмов, «идеальным» режимам отвечает более 80%. Такое соотношение обусловлено горизонтальными перемещениями литосферных плит, к границам которых приурочены основные сейсмогенные пояса Земли. На этом основании поля напряжений, предопределившие наличие «идеальных» режимов, отнесены к категории *первичных, нетрансформированных* [Вольфман и др., 2022].

Очаги, значения параметров которых существенно отличаются от основной массы фокальных механизмов, отражая проявления «комбинаторных» (взбросо- и сбросо-сдвигового, сдвиго-сбросового) типов деформационных режимов, составляют 27% от общего количества и присущи не всем кинематическим обстановкам. Усложнение режимов сейсмогенеза обусловлено разворотом тензора напряжений, который является следствием локальной трансформации (от лат. *transformatio* – «преобразование», «превращение») первичного поля, позволяя обозначить данные системы напряжений как *трансформированные*. Это подтверждается незначительным количеством очагов Средиземноморского пояса, отвечающих «комбинаторным» деформационным режимам, где они составляют менее 20%.

Результаты работы и их обсуждение

Стереографические квазиמודели регионального сейсмогенеза. В результате усреднения значений параметров фокальных механизмов (ориентировок главных осей, векторов смещений, элементов залегания нодальных плоскостей), характеризующих сходными кинематическими обстановками и «идеальными» деформационными режимами, получено девять квазиמודелей сейсмогенеза, отражающих разные условия напряженно-деформированного состояния земной коры региона (рис. 2). Фактологическое их наполнение (количество фокальных механизмов в их составе) различно: в первичных (нетрансформированных) полях напряжений наиболее выражены обстановки субмеридионального сжатия и растяжения в том же направлении (рис. 2а, е). Однако в энергетическом отношении весьма значимыми являлись и обстановки юго-восточного–северо-западного растяжения, обусловившие формирование самого сильного за последние 100 лет разрушительного Ялтинского землетрясения 11 сентября 1927 г. с магнитудой $M_w=6,9$.

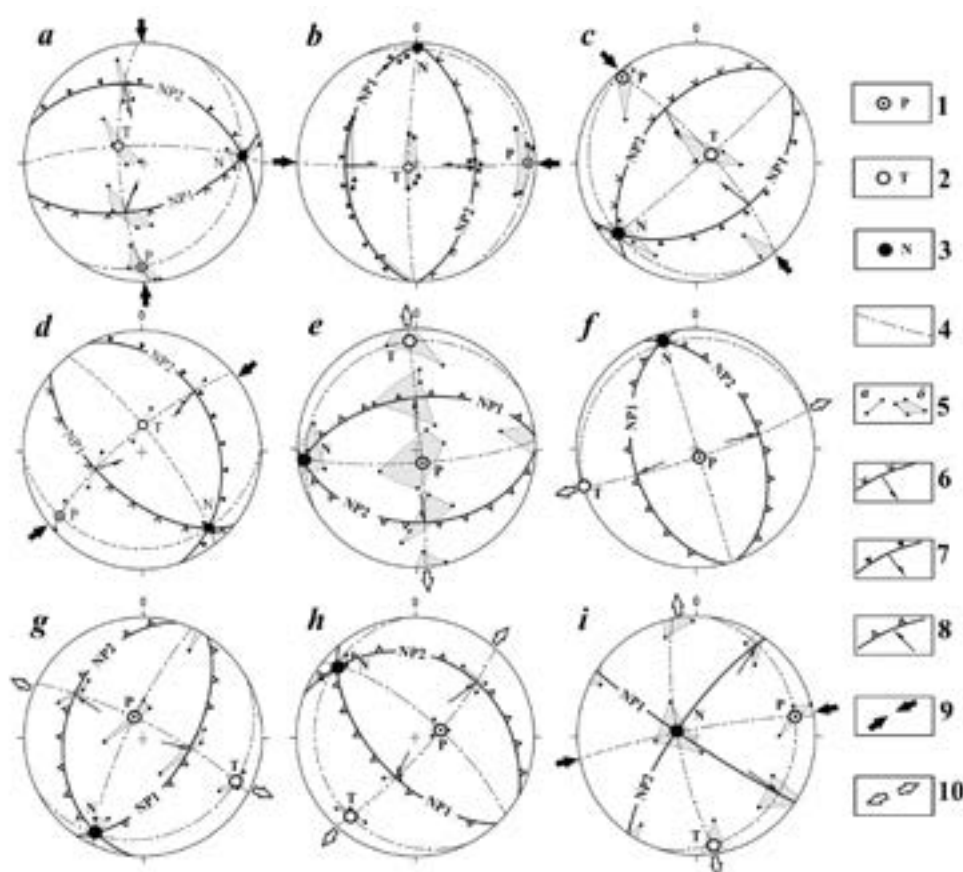


Рис. 2. Квазимодели сейсмогенеза для кинематических обстановок сжатия (а – меридионального, б – широтного, с – юго-восточного, d – юго-западного), растяжения (е – меридионального, f – широтного, g – юго-восточного, h – юго-западного) и равновероятного меридионального сжатия–широтного растяжения (i). Условные обозначения: 1–3 – проекции осей главных напряжений (1 – сжатия, 2 – растяжения, 3 – промежуточной); 4 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений; 5 – разброс значений одноименных параметров в квазимоделях, аппроксимирующих данные 2-х (а) и более (b) фокальных механизмов; 6–8 – проекции нодальных плоскостей и их характеристика (6 – взбросы, сдвиго-взбросы, 7 – надвиги, 8 – сбросы, сдвиго-сбросы), бергштрихи – со стороны падения плоскости, стрелки – направления перемещения висячего крыла; 9 – направления сжатия; 10 – направления растяжения /

Fig. 2. Quasi-models of seismogenesis for kinematic settings of compression (a – meridional, b – latitudinal, c – southeast, d – southwest.) and equiprobable meridional compression–latitudinal extension (i). Legend: 1–3 – projections of the main stress axes (1 – compression, 2 – tension, 3 – intermediate); 4 – plane projections for the placement of the axes of the main stresses; 5 – scatter of the values of the parameters of the same name in the quasi-models approximating the data of 2 (a) and more (b) focal mechanisms; 6–8 – projections of nodal planes and their characteristics (6 – thrust faults, shift–thrust faults, 7 – overthrusts, 8 – slip faults, shift–slip faults); 9 – directions of compression; 10 – tension directions

Данные квазимодели аппроксимируют значения параметров всех 52-х фокальных механизмов Черноморской впадины и отражают многообразие первичных полей напряжений и кинематических обстановок сейсмогенного разрывообразования региона.

Особенности трансформаций первичных полей напряжений. Выше отмечалось, что усложнение основных режимов сейсмогенеза, является следствием ло-

кальных трансформаций первичных полей напряжений. Причиной трансформаций является изменение соотношения абсолютных величин напряжений, количественная оценка которых неосуществима ввиду недостатка данных. Трансформации первичного поля присущи не всем кинематическим обстановкам регионального сейсмогенеза. Так, в условиях субмеридионального и субширотного сжатия, субширотного сжатия–субмеридионального растяжения таковые не проявились.

Установлены специфические соотношения между параметрами квазимоделей сейсмогенеза первичного поля и значениями одноименных параметров фокальных механизмов землетрясений, сформированных в идентичной кинематической обстановке, но в условиях трансформированных систем напряжений. Во всех случаях трансформации происходят путем вращения тензора напряжений вокруг направления действия одной из главных осей с изменением положения двух других осей (рис. 3а–е). При этом углы вращения и, соответственно, смещения осей относительно их первоначального положения, как правило, составляют $(45 \pm 10)^\circ$. По-видимому, в природных геосистемах, подверженных релаксации и/или трансформации, такой механизм дискретного изменения полей напряжений является наименее энергозатратным.

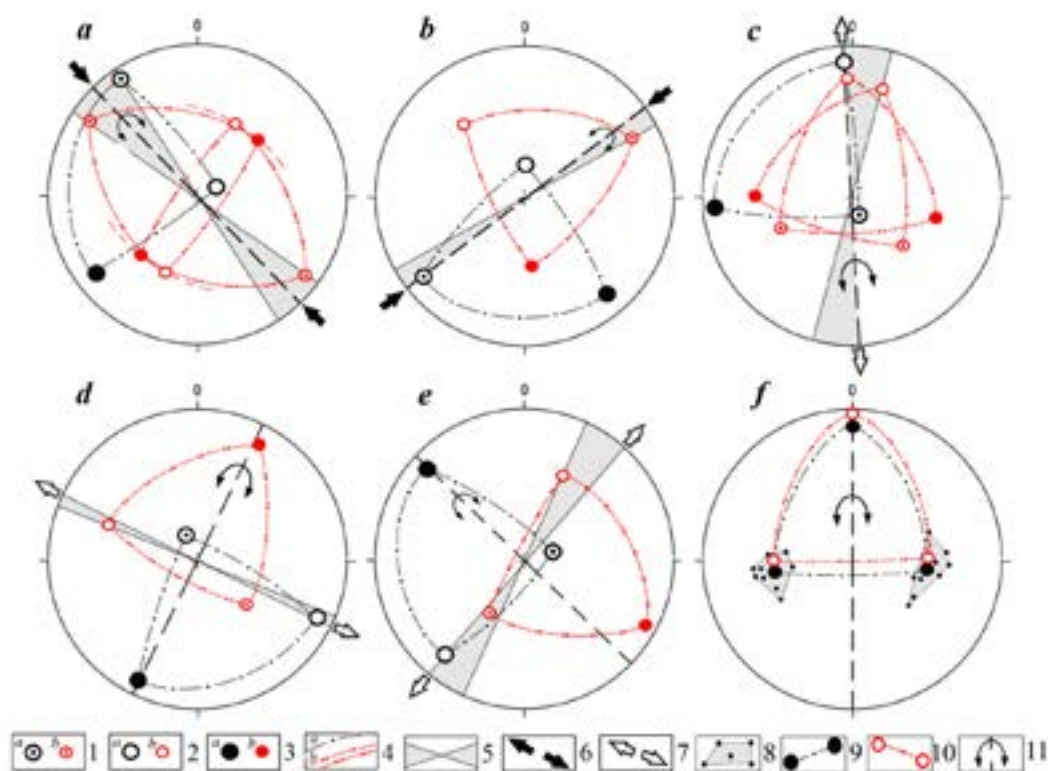


Рис. 3. Особенности трансформаций первичного поля в обстановках: а, б – юго-восточного и юго-западного сжатия; с, d, e – субмеридионального, юго-восточного и юго-западного растяжения; f – «реальная» (черное) и «идеальная» (красное) модели отклонения двух главных осей от направления третьей оси. Условные обозначения: 1 – проекции осей сжатия Р для квазимоделей (а) и очагов трансформированного поля (б); 2 – то же самое – для осей растяжения Т; 3 – то же самое – для промежуточных осей N; 4 – проекции плоскостей размещения осей напряжений для квазимоделей (а) и очагов (б); 5 – секторы сжатия-растяжения; 6, 7 – направления сжатия (б) и растяжения (7); 8 – области отклонений двух главных осей от направления третьей (независимо от их названия); 9 – проекции осей и плоскостей их размещения в «реальной» модели трансформированных полей; 10 – то же самое, для «идеальной» модели; 11 – ось вращения тензора напряжений /

Fig. 3. Features of transformations of the primary field in the following settings: a, b – southeast and southwest compression; c, d, e – submeridional, southeastern, and southwestern extension; e – “real” (black) and “ideal” (red) models of deviation of two main axes from the direction of the third axis. Legend: 1 – projections of the compression axes P for quasi-models (a) and sources of the transformed field (b); 2 – the same – for the tension axes T ; 3 – the same – for intermediate axes N ; 4 – plane projections for the placement of stress axes in quasi-models (a) and sources (b); 5 – compression–tension sectors; 6, 7 – directions of compression (6) and tension (7); 8 – areas of deviations of two main axes from the direction of the third (regardless of their name); 9 – projections of the axes and planes of their placement in the “real” model of the transformed fields; 10 – the same for the “ideal” model; 11 – axis of rotation of the stress tensor

При этом углы вращения и, соответственно, смещения осей относительно их первоначального положения, как правило, составляют $(45 \pm 10)^\circ$. По-видимому, в природных геосистемах, подверженных релаксации и/или трансформации, такой механизм дискретного изменения полей напряжений является наименее энергозатратным.

В общем виде особенности трансформаций отражает стереограмма, где приведены величины отклонений двух главных осей от направления третьей оси (независимо от их названия), вокруг которой происходит вращение тензора напряжений (рис. 3e). Среднее значение в совокупностях отклонений от оси вращения составляет $(45 \pm 1)^\circ$, что позволяет обосновать модель тензора напряжений, общую для всех типов трансформированных систем. Как видно из стереограммы, построенная («реальная») модель отличается от «идеальной», в которой ось вращения принята строго горизонтальной, лишь небольшим углом наклона этой оси.

Приведенные особенности трансформаций первичных систем напряжений дополняют обоснованное в работе [Volfman et al., 2017] положение о «поясном» характере распределения главных осей в процессе сейсмогенеза. Согласно этому положению, первый круговой пояс, протягивающийся вдоль внешней границы стереограммы, образует концентрации осей главных напряжений в условиях проявления основных деформационных режимов. Второй пояс (под углами $35 \div 55^\circ$ к горизонту) отражает распределение главных осей в тензорах трансформированных систем напряжений.

Инверсии кинематических обстановок сейсмогенеза. Ранее в ряде работ отмечалась пространственно-временная изменчивость кинематических обстановок в очагах землетрясений, локализованных даже в ограниченных сегментах земной коры [Гущенко, 1979; Степаненко и др., 2013; Шебалин и др., 1986; Широкова, 1967; Юнга, 1996; Казымова, Казымов, 2020; Стогний и др., 2022, 2023]. Изменения напряженно-деформированного состояния коры Черноморской впадины весьма явственно отражают инверсии сейсмогенерирующих полей напряжений (от лат. *inversio* – «переворачивание, перестановка»). Они проявляются в решениях механизмов очагов, сформированных в противоположных кинематических обстановках в течение коротких временных интервалов как непосредственно друг за другом, так и безотносительно к последовательности их возникновения.

В регионе установлены инверсии полей напряжений 2-х видов (рис. 4):

– 1-го вида, когда вследствие изменения кинематической обстановки на противоположную (например, сжатие сменяется растяжением в том же направлении) происходит замена взбросового режима на сбросовый; при этом положение оси P , определяющей направление сжатия, занимает ось T , указывая на растяжение в том же направлении (и наоборот);

– 2-го вида, когда происходит изменение ориентировки тензора напряжений таким образом, что та из осей напряжений, которая определяет тип кинематической обстановки (сжатия или растяжения), меняет свое направление почти под прямым углом к ее первоначальному положению.

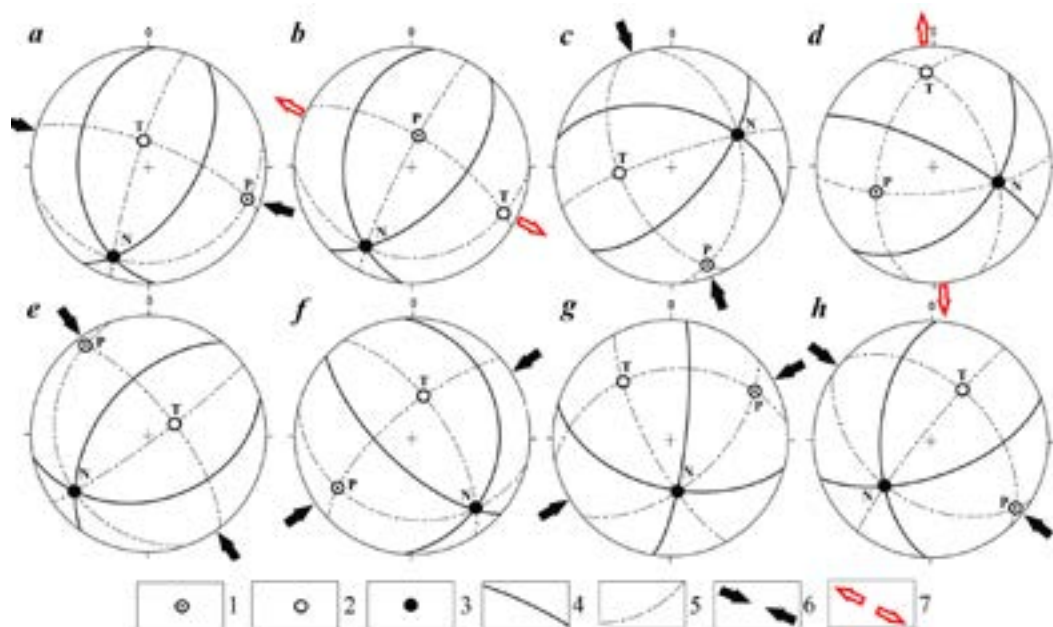


Рис. 4. Отражение инверсий кинематических обстановок в фокальных механизмах землетрясений: *a-d* – инверсий 1-го вида в парах очагов 09.12.2013 (*a*) и 02.03.2014 (*b*); 30.01.2012 (*c*) и 10.12.2012 (*d*); *e-h* – инверсий 2-го вида в парах очагов 12.07.1966 (*e*) и 03.09.1978 (*f*); 22.11.1996 (*g*) и 02.06.1999 (*h*). Условные обозначения: 1–3 – проекции осей главных напряжений: сжатия (1), растяжения (2), промежуточной (3); 4 – проекции нодальных плоскостей; 5 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений; 6 – направления сжатия; 7 – направления растяжения /

Fig. 4. Reflection of inversions of kinematic conditions in the focal mechanisms of earthquakes: (*a-d*) inversions of the 1st type in pairs of sources on 09.12.2013 (*a*) and 02.03.2014 (*b*); 30.01.2012 (*c*) and 10.12.2012 (*d*); (*e-h*) inversions of the 2nd type in pairs of sources on 12.07.1966 (*e*) and 03.09.1978 (*f*); 22.11.1996 (*g*) and 02.06.1999 (*h*). Legend: 1–3 – projections of the main stress axes: compression (1), tension (2), intermediate (3); 4 – projections of nodal planes; 5 – projections of the planes of placement of the axes of the main stresses; 6 – directions of compression; 7 – tension directions

В наиболее общем виде инверсии 1-го вида проявлены в альтернативных квази-моделях сейсмогенеза, например, меридионального сжатия и растяжения (рис. 2*a, d*), широтного сжатия и растяжения (рис. 2*b, e*) и т.д., то есть в условиях, когда сжимающие и растягивающие усилия попеременно действовали в одном и том же направлении. Инверсионные соотношения этого вида отражают и пары фокальных механизмов, приведенные на рисунке 4 (*a-b* и *c-d*). Парные механизмы в нижнем ряду этого рисунка являются иллюстрацией проявления инверсий 2-го вида (рис. 4*e-f, g-h*).

Особенности изменений во времени кинематических обстановок сейсмогенеза (в т.ч. инверсионных) отражает хронограмма ориентировок напряжений (рис. 5) в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон (положение зон см. на рис. 1). Она же позволяет установить пары или группы близких (по времени их реализации) событий, в которых проявился инверсионный характер полей напряжений.

Последовательный (пособытийный) анализ инверсионных проявлений сейсмогенеза и промежуточных (между ними) изменений напряженно-деформированного состояния земной коры показал, что временные интервалы, в течение которых происходила полная инверсия сейсмогенерирующих полей напряжений в регионе, как правило, весьма незначительны – от нескольких месяцев до нескольких лет (рис. 5). В качестве примеров короткопериодных инверсий 1-го вида можно привести пары очагов №35 (30.01.2012) – №36 (10.12.2012) и №39 (09.12.2013) – №40 (02.03.2014), локализованных, соответственно, в пределах Туапсинско-Анапской и Южнобережной сейсмогенных зон. Инверсии 2-го вида, происходившие в течение нескольких лет путем последовательных изменений кинематических обстановок (через реализацию промежуточных напряженно-деформированных состояний коры), нашли отражение в фокальных механизмах №3 (22.07.1972) – №10 (03.09.1978) Туапсинско-Анапской зоны и №20 (22.11.1996) – №22 (18.10.1998), локализованных у побережья Крыма.

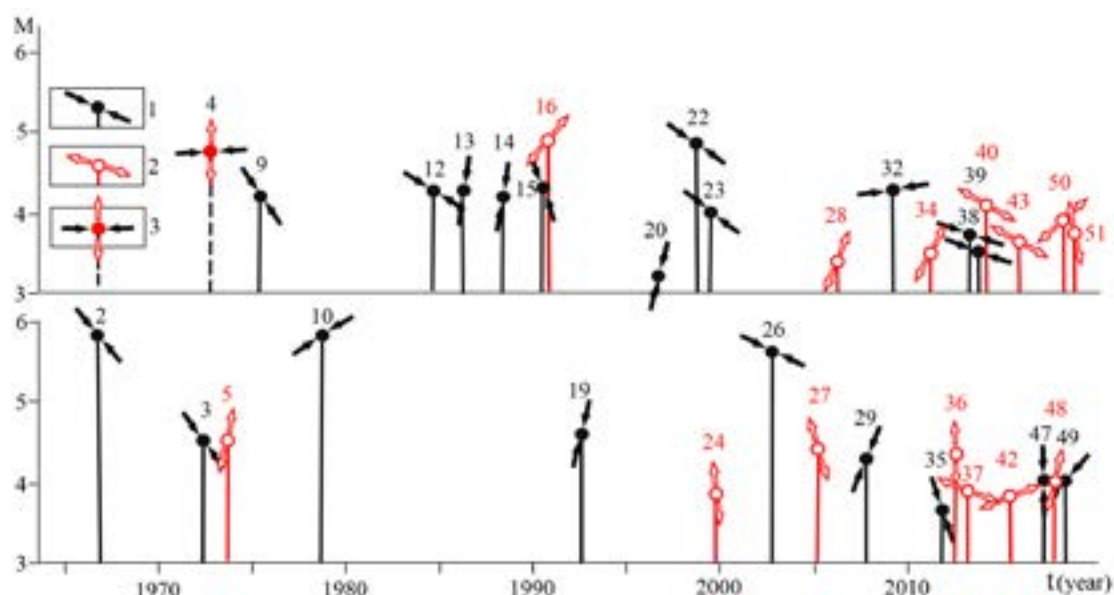


Рис. 5. Хронограмма изменения кинематических обстановок сейсмогенеза в пределах Южнобережной (верхний ряд) и Туапсинско-Анапской (нижний ряд) зон. Условные обозначения: 1 – очаги, сформированные в обстановках сжатия; 2 – очаги, сформированные в обстановках растяжения; 3 – очаги сдвигового типа (формирование которых равновероятно как в обстановках субширотного сжатия, так и субмеридионального растяжения). Цифры и стрелки – номера очагов (на рис. 1), направления сжатия (черные) и растяжения (красные) /

Fig. 5. Chronogram of changes in the kinematic conditions of seismogenesis within Yuzhnoberezhnaya (upper row) and Tuapse–Anapa (lower row) zones. Legend: 1 – sources formed in compression environments; 2 – sources formed in tension conditions; 3 – shif-type sources (the formation of which is equally probable both in settings of sublatitudinal compression and submeridional tension). The numbers and arrows are the numbers of the sources (in Fig. 1), the directions of compression (black) and tension (red)

Таким образом, приведенная хронограмма ориентировок напряжений в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской зон отражает многообразие проявлений и быструю сменяемость кинематических обстановок регионально-го сейсмогенеза.

Общие особенности сейсмогенного разрывообразования в регионе. Общие особенности разрывообразования в очагах землетрясений региона проявляются

при сопоставлении параметров квазимоделей сейсмогенеза, отражающих противоположные кинематические обстановки. Алгоритм данного подхода предполагает попарное совмещение на стереограммах положений осей P и T , а также проекций нодальных плоскостей альтернативных квазимоделей, обусловленных влиянием сжимающих и растягивающих напряжений, попеременно действующих в одном направлении [Вольфман и др., 2022].

Анализ показал, что на стереограммах, где совмещены квазимоделели для противоположных обстановок сжатия и растяжения, нодальные плоскости, идентифицируемые, соответственно, как взбросы (или надвиги) и сбросы, имеют близкие значения параметров, а проекции осей P и T меняются местами, располагаясь вблизи внешнего круга стереограмм (рис. 6). При этом в сопоставляемых парах квазимоделей разница углов падения разрывов (взбросов и сбросов), имеющих наклон в одном направлении, составляет от 1° до 15° (среднее значение – 7°); а расхождения между проекциями осей P и T примерно такого же порядка: от 4° до 14° (среднее – 9°).

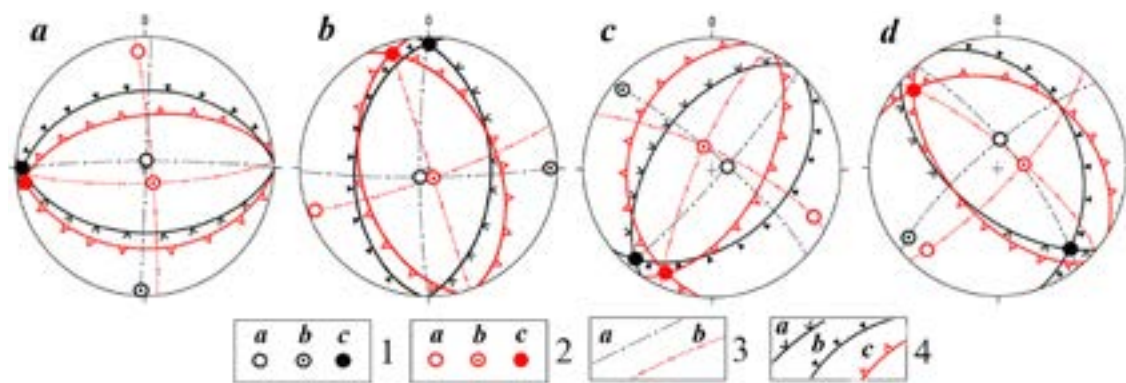


Рис. 6. Соотношение проекций осей напряжений и нодальных плоскостей в квазимоделях, аппроксимирующих обстановки сжатия и растяжения в направлениях: а – субмеридиональном; б – субширотном; с – юго-восточном–северо-западном; d – юго-западном–северо-восточном. Условные обозначения: 1 – проекции осей напряжений в квазимоделях обстановок сжатия (а – ось P , б – ось T , с – ось N); 2 – то же самое – в квазимоделях обстановок растяжения; 3 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений в квазимоделях сжатия (а) и растяжения (б); 4 – проекции нодальных плоскостей и их характеристики: взбросы (а), надвиги (б), сбросы (с) /

Fig. 6. Correlation between the projections of stress axes and nodal planes in quasi-models approximating compression and tension in the directions: a – submeridional; b – sublatitudinal; c – southeast–northwest; d – southwest–northeast. Legend: 1 – projections of stress axes in quasi-models of compression conditions (a – P axis, b – T axis, c – N axis); 2 – the same – in quasi-models of tension conditions; 3 – plane projections for the placement of the axes of main stresses in the quasi-models of compression (a) and tension (b); 4 – projections of nodal planes and their characteristics: thrust faults (a), overthrusts (b), slip faults (c)

Таким образом, процессы сейсмогенного разрывообразования в регионе обусловлены, в основном, влиянием горизонтальных напряжений, на что указывают незначительные углы наклона осей P и T в квазимоделях, характеризующих первичные (нетрансформированные) системы напряжений. Следовательно, в инверсионных обстановках наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов, соответственно, как взбросового, так и сбросового типов являются одни и те же сегменты в разрезе земной коры, имеющие наклоны под углами $(45 \pm 10)^\circ$ к горизонтальной поверхности и отвечающие положениям плоскостей максимальных касательных напряжений.

Данное обстоятельство предопределяет основные особенности деформирования геологической среды в условиях горизонтального сжатия и растяжения, попеременно действующих в одном направлении. В обоих случаях образуются (активируются) преимущественно плоскости одних и тех же систем разрывов, при этом в обстановках сжатия они проявляются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения (рис. 6). Реальная картина разрывообразования в очагах может выглядеть сложнее. В работе [Гинтов, 2005] отмечено, что согласно теории прочности Ш. Кулона–А. Навье–О. Мора, образование сколовых разрывов зачастую происходит под углом, не равным 45° к направлению действия осей нормальных напряжений, а с отклонением их в сторону оси максимального сжатия (минимального растяжения). Следовательно, сейсмогенные разрывы, обусловленные обстановками растяжения (сбросы), могут иметь более крутые падения (под углами $\geq 45^\circ$ к земной поверхности), в то время как разрывы, образующиеся в обстановках сжатия, будут представлены преимущественно надвигами с углами падения $\leq 45^\circ$. При этом в очагах землетрясений (относительно немногочисленных), обусловленных влиянием трансформированных систем напряжений, тензоры напряжений и, соответственно, проекции нодальных плоскостей смещаются приблизительно на 45° относительно их положений в первичных системах напряжений. Вследствие этого, одна их нодальных плоскостей занимает положение, близкое к горизонтальному, вторая становится практически вертикальной.

ВЫВОДЫ

Анализ фокальных механизмов землетрясений и квазимоделей сейсмогенеза, аппроксимирующих параметры очагов, сформировавшихся в сходных условиях, позволил обосновать причины и особенности изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины. Установлено, что эти изменения обусловлены трансформациями первичных полей напряжений с усложнениями типов деформационных режимов разрывообразования в очагах, а также сменой кинематических обстановок сейсмогенеза вплоть до полной инверсии последних.

1. Сопоставление параметров квазимоделей, характеризующих первичные поля напряжений, и фокальных механизмов, обусловленных влиянием трансформированных систем, показало, что трансформации полей напряжений носят закономерный характер: они происходят путем вращения тензора напряжений вокруг направления действия одной из главных осей с изменением положения двух других осей (независимо от их названия) на величину, близкую 45° (рис. 3e).

2. Соотношения параметров фокальных механизмов, сформированных в противоположных кинематических обстановках, отражают два вида инверсий сейсмогенирующих полей напряжений. В первом случае сжатие в очагах сменяется растяжением в том же направлении с заменой взбросового деформационного режима сбросовым (и наоборот). Во втором случае происходит изменение ориентировки тензора напряжений таким образом, что ось главных напряжений, определяющая тип кинематической обстановки (например, сжатия), меняет направление на перпендикулярное к своему первоначальному положению (рис. 4). Периоды инверсионных циклов весьма кратковременны – от нескольких месяцев до нескольких лет (рис. 5). При этом инверсии полей напряжений в пределах Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон происходят не синхронно, что свидетельствует

о локальном характере влияния геодинамических факторов, обусловивших эти процессы.

3. Инверсионный характер напряжений предопределил закономерности сейсмогенного разрывообразования в регионе, установленные по соотношению параметров квазимоделей сейсмогенеза, обусловленных противоположными кинематическими обстановками. В условиях воздействия инверсионных систем напряжений теоретически наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов являются одни и те же сегменты в разрезе земной коры, отвечающие направлениям действия максимальных касательных напряжений первичного поля. При этом в обстановках сжатия разрывы реализуются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения (рис. 6).

4. Многообразие кинематических обстановок, идентифицированных в очагах землетрясений, отражает гетерогенный характер и сложное строение сейсмогенных региональных зон, обусловленные изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины, что не позволяет обосновать принадлежность этих зон к какому-либо одному типу сейсмогенеза.

Литература

1. Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. – М.: Наука, 1969. – 136 с.
2. Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. Новые результаты тектонофизического анализа фокальных механизмов землетрясений Крымско-Черноморского региона. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8(74). №4. – С. 162–206.
3. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Малянова Л.С. Северный Кавказ. // Землетрясения Северной Евразии в 2007 г. – Обнинск: ГС РАН, 2013а. – С. 100–115.
4. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Малянова Л.С., Якушева В.Н. Землетрясение 10 декабря 2012 г. с $M_w=4.6$ с вблизи г. Анапы // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013б. – С. 35–45.
5. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. – Киев: Феникс, 2005. – 572 с.
6. Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М.: Наука, 1979. – С. 26–51.
7. Гущенко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современного регионального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса // Докл. АН СССР. – 1991. – №4. – С. 830–835.
8. Казымова С.Э., Казымов И.Э. Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений и GPS-станций. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10(3). – С.40–56. DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003
9. Пустовитенко Б.Г. Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2002. – С. 59–64.
10. Пустовитенко Б.Г. Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 г.).
11. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона. // Землетрясения Северной Евразии в 2014 г. – 2020. – Вып. 23. – С. 250–262.
12. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-

Черноморского региона в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021а. – Вып. 24. – С. 226–236.

13. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Скорректированные очаговые параметры землетрясений Крыма 2018-2019 гг. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2021б. – Том 7 (73). №4. – С. 164–175.

14. Степаненко Н.Я., Симонова Н.А., Карданец В.Ю. Пространственные вариации осей главных напряжений в очагах землетрясений области Вранча. Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. – С. 46–56.

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

16. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №1. – С. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.

17. Шебалин Н.В., Ибрагимов Р.Н., Чернов Ю.К. и др. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.

18. Широкова Е.И. Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса. // Физика Земли. – 1967. – №1. – С. 22–36.

19. Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии. // Физика Земли. – 1996. – №12. – С. 37–58.

20. Volfman Y.M., Kolesnikova E.Y., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective manifestation of tectogenic stress field within the Mediterranean belt (based on earthquake focal mechanism solutions). // Journal of Volcanology and Seismology. – 2017. – Vol. 11. No.6. – pp. 447–461. DOI: 10.1134/S0742046317060069

References

1. Vvedenskaya A.V. Study of stresses and ruptures in earthquake sources using the theory of dislocations. Moscow. Nauka, 1969. 136 p. (In Russ.)

2. Volfman Y.M., Pustovitenko B.G., Kolesnikova E.Ya. New results of tectonophysical analysis of focal mechanisms for earthquakes in the Crimean-Black Sea region. In: Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2022. Vol. 8. Issue 74. No. 4. pp. 162–206. (In Russ.)

3. Gabsatarova I.P., Selivanova E.A., Malyanova L.S. North Caucasus. Earthquakes of Northern Eurasia in 2007. Obninsk, GS RAS, 2013a. pp. 100–115. (In Russ.)

4. Gabsatarova I.P., Selivanova E.A., Malyanova L.S., Yakusheva V.N. The earthquake of December 10, 2012 with $M_w=4.6$ near Anapa. Seismological bulletin of Ukraine, 2012. Sevastopol, 2013b. pp. 35–45. (In Russ.)

5. Gintov O.B. Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the Earth's crust of Ukraine. Kiev, Phoenix, 2005. 572 p. (In Russ.)

6. Gushchenko O.I. Reconstruction of the field of megaregional tectonic stresses in seismically active regions of Eurasia. Stress and strain fields in the lithosphere. Moscow. Nauka, 1979. pp. 26–51. (In Russ.)

7. Gushchenko O.I., Mostryukov A.O., Petrov V.A. Structure of the field of modern regional stress in seismically active zones of the Earth's crust in the eastern part of the Mediterranean active belt. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1991. No. 4. pp. 830–835. (In Russ.)

8. Kazimova S.E., Kazimov I.E. Geodynamics of the Talish region according to earthquake source mechanisms and GPS-stations. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No.3. pp. 40–56. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003

9. Pustovitenko B.G. Focal mechanism of perceptible earthquakes in the Crimean-Black

Sea region of the last 20 years. Seismological bulletin of Ukraine, 2000. Sevastopol, 2002. pp. 59–64. (In Russ.)

10. Pustovitenko B.G. Catalog of earthquake source mechanisms in the Crimean-Black Sea region for 2016–2017. Earthquakes in Northern Eurasia. 2022. Issue. 25 (2016–2017). (In Russ.)

11. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. Spectral and source parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region. Earthquakes in Northern Eurasia in 2014. 2020. Issue. 23. pp. 250–262. (In Russ.)

12. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2015. Earthquakes in Northern Eurasia. 2021a. Issue. 24. pp. 226–236. (In Russ.)

13. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. Corrected focal parameters of earthquakes in Crimea in 2018–2019. In: Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2021b. Volume 7. Issue 73. No. 4. pp. 164–175. (In Russ.)

14. Stepanenko N.Ya., Simonova N.A., Kardanets V.Yu. Spatial variations of principal stress axes in earthquake sources in the Vrancea region. Seismological bulletin of Ukraine, 2012. Sevastopol, 2013. pp. 46–56. (In Russ.)

15. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.2. pp. 34–52. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003

16. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No.1. pp. 76–96. in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006

17. Shebalin N.V., Ibragimov R.N., Chernov Yu.K. Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent, Fan, 1986. 368 p. (In Russ.)

18. Shirokova E.I. General regularities in the orientation of principal stresses in earthquake sources in the Mediterranean-Asian Seismic Belt. *Physics of the Solid Earth*. 1967. No. 1. pp. 22–36. (In Russ.)

19. Yunga S.L. Seismotectonic deformations and stresses in folded belts of neotectonic activation in Northern Eurasia. *Physics of the Solid Earth*. 1996. No. 12. pp. 37–58. (In Russ.)

20. Volfman Y.M., Kolesnikova E.Y., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective manifestation of tectogenic stress field within the Mediterranean belt (based on earthquake focal mechanism solutions). *Journal of Volcanology and Seismology*. 2017. Vol. 11. No. 6. pp. 447–461. DOI: 10.1134/S0742046317060069

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.1

DOI: [10.46698/VNC.2023.63.12.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.63.12.005)

Оригинальная статья

Один эффективный метод решения начально-краевых задач поперечных колебаний балки с учетом ее внутреннего сопротивления

В.Б. Заалишвили¹, И.Д. Музаев^{1, 2}

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, д. 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

²Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Молодежная, д. 7, e-mail: illarion.muzaev@yandex.ru

Статья поступила: 25.04.2021, доработана: 29.05.2021, принята к публикации: 08.06.2021

Резюме: Актуальность работы. В статье приведен вновь разработанный эффективный метод постановки и решения краевых задач поперечных колебаний балки с учетом внутреннего сопротивления материала балки по гипотезе Е.С. Сорокина. Рассматриваемые колебания, обусловленные приложением к балке сосредоточенных сил в случае, когда концы балки закреплены шарнирно, моделируются краевыми задачами для дифференциального уравнения с комплексным коэффициентом. Комплексный коэффициент создает некоторые математические сложности в процессе решения начально-краевой задачи. **Методы исследования.** Разработанный в статье метод постановки и решения подобных начально-краевых задач основан на последовательном выполнении ряда математических операций. Достоверность и приемлемость разработанного метода доказаны концептуальным анализом и путем сопоставления полученных в статье результатов с ранее известными решениями таких же задач, но без учета внутреннего сопротивления балки. Результаты расчетов, являясь частными случаями при равенстве нулю коэффициента потерь, через который учтено внутреннее сопротивление балки, точно совпадают с результатами, полученными в данной статье. **Результаты работы.** На основе полученных расчетных формул в статье доказано утверждение о том, что учет внутреннего сопротивления балки существенно уточняет закономерности вынужденных колебаний, когда частота колебаний вынуждающей силы близка к значению собственной частоты колебаний балки. Это показывает высокую эффективность разработанного подхода. На основе проведенного сопоставительного анализа в статье доказано следующее важное утверждение: решения краевых задач, моделирующих вынужденные поперечные колебания балки, поставленные на основе гипотез Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта, могут резко отличаться одно от другого, однако их амплитудные значения будут точно совпадать. Вследствие того, что вынужденные колебания балки с учетом внутреннего сопротивления моделируются линейными краевыми, либо линейными начально-краевыми задачами математической физики, к ним и к разработанному в статье методу применим принцип суперпозиции решений. Согласно этому принципу, если на балку приложено несколько гармонических сил, то результирующие колебания можно получить наложением колебаний, вызванных каждой отдельной силой. Точно таким же образом можно решить по разработанному методу задачу о колебании балки, когда на нее приложена непрерывно распределенная гармоническая нагрузка, но дискретное суммирование необходимо заменить интегрированием вдоль длины балки.

Ключевые слова: начально-краевая задача, гипотеза Е.С. Сорокина, сосредоточенная сила, окорезонансная частота колебаний, характеристическое уравнение.

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Музаев И.Д. Один эффективный метод решения начально-краевых задач поперечных колебаний балки с учетом ее внутреннего сопротивления. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 55-66. DOI: [10.46698/VNC.2023.63.12.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.63.12.005).

GEOPHYSICS

[DOI: 10.46698/VNC.2023.63.12.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.63.12.005)

Original paper

One effective method for solving initial-boundary problems of transverse vibrations of a beam, taking into account its internal resistance

V.B. Zaalishvili¹, **I.D. Muzaev**^{1, 2}

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

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

Received: 25.04.2021, revised: 29.05.2021, accepted: 08.06.2021

Abstract: Relevance. The article presents a newly developed effective method for setting and solving boundary value problems of transverse vibrations of a beam, taking into account the internal resistance of the beam material according to the hypothesis of E.S. Sorokin. The considered vibrations caused by the application of concentrated forces to the beam in the case when the ends of the beam are hinged, are modeled by boundary value problems for a differential equation with a complex coefficient. The complex coefficient creates some mathematical difficulties in the process of solving the initial boundary value problem. **Methods.** The method of setting and solving similar initial-boundary value problems developed in the article is based on the sequential execution of a number of mathematical operations. The reliability and acceptability of the developed method are proved by conceptual analysis and by comparing the results obtained in the article with previously known solutions to the same problems, but without taking into account the internal resistance of the beam. The calculation results, being special cases when the loss factor is equal to zero, through which the internal resistance of the beam is taken into account, exactly coincide with the results obtained in this article. **Results.** On the basis of the obtained calculation formulas, the paper proves the assertion that taking into account the internal resistance of the beam significantly refines the patterns of forced vibrations when the frequency of the driving force is close to the value of the natural frequency of the beam. This shows the high efficiency of the developed approach. On the basis of the comparative analysis carried out in the article, the following important statement is proved: the solution of boundary value problems simulating the forced transverse vibrations of the beam, set on the basis of the hypotheses of E.S. Sorokin and Kelvin-Voigt may differ sharply from one another, but their amplitude values will exactly match. Due to the fact that the forced vibrations of the beam, taking into account internal resistance, are modeled by linear boundary or linear initial-boundary problems of mathematical physics, the principle of superposition of solutions is applicable to them and to the method developed in the article. According to this principle, if several harmonic forces are applied to the beam, then the resulting vibrations can be obtained by superimposing the vibrations caused by each individual force. In exactly the same way, it is possible to solve the problem of beam vibrations using the developed method when a continuously distributed harmonic load is applied to it, but the discrete summation must be replaced by integration along the length of the beam.

Keywords: initial-boundary problem, hypothesis of E.S. Sorokin, concentrated force, near-resonant vibration frequency, characteristic equation.

For citation: Zaalishvili V.B., Muzaev I.D. One effective method for solving initial-boundary problems of transverse vibrations of a beam, taking into account its internal resistance. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 55-66. DOI: 10.46698/VNC.2023.63.12.005.

Введение

В различных научных разработках по теории колебаний и волн [Клаф, Пензиен, 1979; Корн Г., Корн Т., 1971; Кошляков и др., 1962; Лурье, 1970; Музаев и др., 2014, 2016; Рэлей, 1965; Скучик, 1971; Слепян, 1972; Сорокин, 1956; Тимошенко, 1959; Уфлянд, 1948; Ansari et al., 2014; Das et al., 2011; Khiemm, Tean, 2003; Lepid et al., 2009; Li et al., 2013; Mazza F., Mazza M., 2010; Mindlin, 1951; Prasad, 2008; Wang, Chang, 2010] поставлены и решены различные краевые задачи поперечных колебаний балочных и пластинчатых упругих тел, когда колебания вызваны приложением к ним сосредоточенных сил. При этом внутреннее сопротивление материала тела ни в одной работе не учтено. Между тем учет внутреннего сопротивления существенно уточняет закономерности вынужденных колебаний, когда частота колебаний вынуждающей силы близка к значению собственной частоты колебаний. Что касается свободных колебаний, то они быстро затухают под действием внутреннего сопротивления материала балки.

В книге С.П. Тимошенко [1959] поставлена и решена начально-краевая задача колебаний балки, когда колебание обусловлено воздействием на балку сосредоточенной синусоидальной силы $F(t) = F_0 \cdot \sin \omega t$.

На рисунке 1 представлена расчетная схема этой задачи.

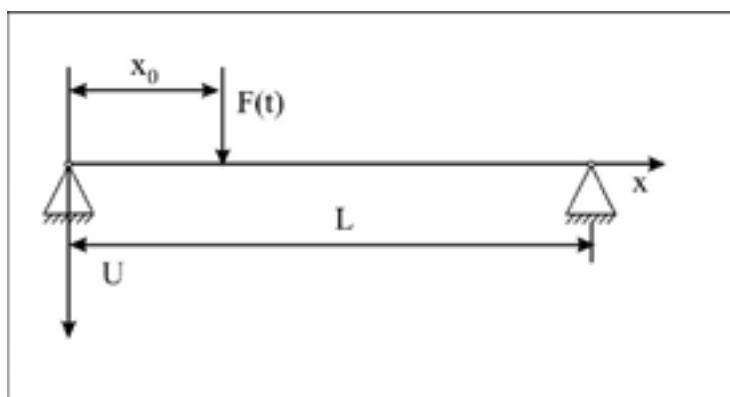


Рис. 1. Расчётная схема начально-краевой задачи С.П. Тимошенко /

Fig. 1. Calculation scheme of the initial-boundary value problem of S.P. Timoshenko

Полагается, что концы балки $x=0$ и $x=L$ шарнирно закреплены. Поставленная задача решена методами математической физики с привлечением методов виртуальных перемещений.

Для функции $U(x, t)$ получена следующая расчетная формула:

$$U(x, t) = \frac{2 F_0}{L \rho S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin a_n x_0 \cdot \sin a_n x}{z_n^2 - \omega^2} \sin \omega t - \frac{2 F_0}{L \rho S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega}{z_n} \frac{\omega \sin a_n x_0 \cdot \sin a_n x}{(z_n^2 - \omega^2)} \sin z_n t \quad (1)$$

$$z_n = \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} a_n^2; \quad a_n = \frac{n\pi}{L}, \quad (2)$$

где приняты следующие обозначения: ρ и E – плотность и модуль упругости материала балки, S и I – площадь и момент инерции поперечного сечения балки, L – длина балки, x_0 – точка приложения сосредоточенной силы $F(t)$, ω – частота синусоидальной силы.

Первая сумма в формуле (1) выражает вынужденные колебания балки под действием приложенной силы $F(t)$. Вторая сумма выражает свободные колебания балки. Если бы в постановке этой задачи было учтено внутреннее сопротивление материала балки, то вторая сумма затухала бы в течение времени, а первая сумма получилась бы с существенными поправками. Следовательно, для вынужденных колебаний балки без учета внутреннего сопротивления материала получается следующая расчетная формула:

$$U(x, t) = \frac{2}{L} \frac{F_0}{\rho S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin a_n x_0 \cdot \sin a_n x}{z_n^2 - \omega^2} \sin \omega t \quad (3)$$

С учетом диссипации энергии колебания балки моделируются двумя разными дифференциальными уравнениями в зависимости от принимаемой гипотезы Е.С. Сорокина либо Кельвина-Фойгта.

Согласно гипотезе Е.С. Сорокина, поперечное колебание балки с учетом диссипации энергии моделируются следующим дифференциальным уравнением в частных производных [Скучик, 1971; Сорокин, 1956; Музаев и др., 2014]:

$$EI(1 + i\eta) \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (4)$$

Согласно гипотезе Кельвина-Фойгта, поперечные упругие колебания балки с учетом диссипации энергии моделируются следующим дифференциальным уравнением:

$$EI \left(\frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + \delta \frac{\partial^5 U}{\partial x^4 \partial t} \right) + \rho S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = q(x, t), \quad (5)$$

где i – мнимая единица, x – координата, отсчитываемая вдоль продольной си балки, t – время, $q(x, t)$ – внешняя поперечно распределенная либо сосредоточенная сила. Оба коэффициента η и δ характеризуют интенсивность диссипации энергии колебаний из-за внутреннего трения в материале балки.

При гармонических колебаниях эти коэффициенты взаимосвязаны следующей зависимостью:

$$\eta = \omega \delta. \quad (6)$$

С целью сопоставления решений краевых задач, получаемых из рассматриваемых двух математических моделей при одинаковых внешних силах, рассмотрим тестовую задачу, когда правые части дифференциальных уравнений (4) и (5) заданы в виде общей гармонической функции от времени:

$$q(x, t) = q_0(x) e^{i\omega t}. \quad (7)$$

Для определения вынужденных колебаний балки искомые функции $U(x, t)$ надо представить в следующем виде:

$$U(x, t) = V(x) e^{i\omega t}. \quad (8)$$

В результате подстановки выражения (8) в (4) и (5) для неизвестной функции $V(x)$ получаются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} EI(1 + i\eta) \frac{d^4 V}{dx^4} - \rho S \omega^2 V &= q_0(x), \\ EI(1 + i\delta\omega) \frac{d^4 V}{dx^4} - \rho S \omega^2 V &= q_0(x), \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом зависимости (6) эти два дифференциальных уравнения имеют одинаковые виды, и при одинаковых граничных условиях они будут иметь одинаковые решения.

В другой тестовой задаче полагается, что внешняя сила $q(x, t)$ задана в виде синусоидальной гармонической функции по времени t , а также синусоидальной функцией по продольной координате x .

$$q(x, t) = q_0 \sin \omega t \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x, n=1, 2, \dots \quad (10)$$

Кроме этого полагается, что концы балки закреплены шарнирно. С учетом этих предположений, решения краевой задачи, поставленной на основе гипотезы Е.С. Сорокина, получается в виде следующей комплексной функции:

$$U(x, t) = \frac{q_0}{\rho S} \frac{z_n^2 - \omega^2 - iz_n^2 \eta}{(z_n^2 - \omega^2)^2 + (z_n^2 \eta)^2} \sin \frac{n\pi}{L} x \cdot \sin \omega t. \quad (11)$$

Решение той же краевой задачи, поставленной на основе Кельвина-Фойгта, получается в виде следующей действительной функции:

$$U(x, t) = \frac{q_0}{\rho S} \frac{(z_n^2 - \omega^2) \sin \omega t - z_n^2 \delta \omega \cos \omega t}{(z_n^2 - \omega^2)^2 + (z_n^2 \delta \omega)^2} \sin \frac{n\pi}{L} x. \quad (12)$$

Эти два решения резко отличаются друг от друга. Однако их амплитуды колебания точно совпадают. Для комплексной функции ее амплитудой колебания считается ее модуль:

$$|U(x, t)| = \frac{q_0}{\rho S} \frac{\sin \frac{n\pi}{L} x}{\sqrt{(z_n^2 - \omega^2)^2 + (z_n^2 \delta \omega)^2}} \quad (13)$$

Амплитуда действительной функции (12) также получается в виде:

$$\text{Amp} U(x, t) = \frac{q_0}{\rho S} \frac{\sin \frac{n\pi}{L} x}{\sqrt{(z_n^2 - \omega^2)^2 + (z_n^2 \delta \omega)^2}} \quad (14)$$

Учитывая формулу (6) становится очевидным, что формулы (13) и (14) точно совпадают.

На основе проведенного сопоставительного анализа можно сделать следующее важное заключение: Решения краевых задач, моделирующих вынужденные поперечные колебания балки, поставленные на основе гипотез Е.С. Сорокина и Кельвина-Фойгта, могут значительно отличаться одно от другого, однако их амплитудные значения будут точно совпадать.

Методы работы

Методы разрешения рассматриваемой проблемы основаны на постановке и решении краевой задачи вынужденных поперечных колебаний балки с учетом его внутреннего сопротивления.

Постановка и решение краевой задачи вынужденных поперечных колебания балки с учетом внутреннего сопротивления. Согласно гипотезе Е.С. Сорокина, поперечные вынужденные колебания балки с учетом вышеперечисленных особенностей моделируется следующей краевой задачей математической физики:

$$EI(1 + i\eta) \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = F(t) \frac{f(x)}{2\varepsilon} \quad (15)$$

$$f(t) = F_0 \sin \omega t; F(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] \\ 0, & \text{при } x \notin [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] \end{cases} \quad (16)$$

$$U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0, \text{ при } x = 0, x = L \quad (17)$$

где $f(x)$ – вспомогательная функция имеющая вид (16), i – мнимая единица.

Легко можно заметить, что сосредоточенная в точке x_0 сила $F(t)$ рассредоточена в малой ε -окрестности точки x_0 . Выражение (15) есть дифференциальное уравнение поперечных колебаний балки, в котором через коэффициент η учтено внутреннее сопротивление в процессе колебаний балки.

Метод постановки и решения начально-краевой задачи, который ранее был применен С.П. Тимошенко, пригоден только для случая, когда не учитывается внутреннее сопротивление балки, то есть когда $\eta=0$. При $\eta \neq 0$ коэффициент в дифференциальном уравнении является комплексной величиной. Этот фактор создает некоторые математические трудности в процессе решения дифференциального уравнения (15) с граничными условиями (17). Данная статья посвящена разработке метода решения таких краевых задач.

На первом шаге разрабатываемого метода сила $F(t)$ рассредоточивается на малой ε -окрестности точки приложения силы, как показано в формулах (15)–(16) и на рисунке 2.

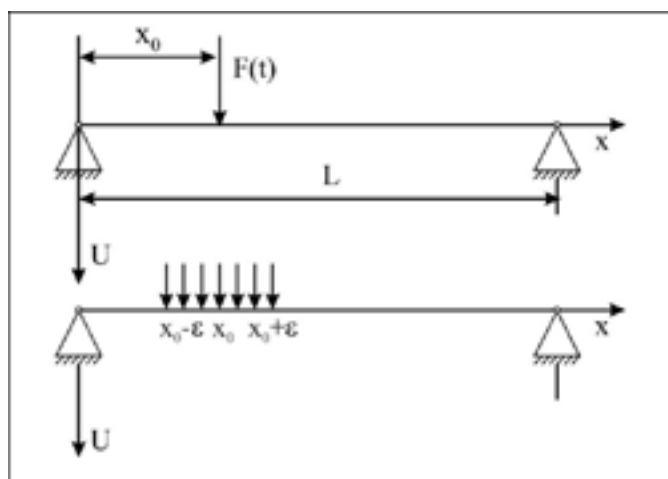


Рис. 2. Расчётная схема начально-краевой задачи /

Fig. 2. Calculation scheme of the initial-boundary value problem

На втором шаге искомая комплексная функция $U(x, t)$ ищется в виде следующего тригонометрического ряда по собственным функциям, удовлетворяющим граничным условиям (2.3) [Корн Г., Корн Т., 1971; Кошляков и др., 1962; Музаев и др., 2014, 2016; Тимошенко, 1959; Ansari et al., 2014; Das et al., 2011; Khiemm, Tean, 2003; Lepid et al., 2009; Li et al., 2013; Mazza F., Mazza M., 2010; Prasad, 2008; Wang, Chang, 2010]:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(t) \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (18)$$

На этом же шаге вспомогательная функция $f(x)$ разлагается в ряд Фурье по собственным функциям $\left\{ \sin \frac{n\pi}{L} x \right\}$ начально-краевой задачи:

$$\frac{1}{2\varepsilon} f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \sin \frac{n\pi}{L} x, \quad \alpha_n = \frac{2}{La_n} \frac{\sin a_n x_0 \cdot \sin a_n \varepsilon}{\varepsilon} \quad (19)$$

Выражение (18) автоматически удовлетворяет граничным условиям (17). В результате подстановки выражений (18) и (19) в дифференциальное уравнение (15) для искомых функций $U_n(t)$ получится следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 U_n}{dt^2} + Z_n^2 (1 + i\eta) U_n = \frac{F_0}{\rho S} \alpha_n \sin \omega t Z_n = \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \quad (20)$$

Теория дифференциальных уравнений с комплексными коэффициентами не разработана, соответствующие справочные пособия отсутствуют. В связи с этим дифференциальное уравнение (20) с комплексным коэффициентом целесообразно привести к системе, состоящей из двух дифференциальных уравнений с действительными коэффициентами, где искомыми функциями являются действительная часть и коэффициент мнимой части искомой комплексной функции $U_n(t)$ [Кошляков и др., 1962; Корн Г., Корн Т., 1971]:

$$U_n(t) = Y_{1,n}(t) + iY_{2,n}(t) \quad (21)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 Y_{1,n}}{dt^2} + Z_n^2 Y_{1,n} - Z_n^2 \eta Y_{2,n} = \frac{F_0}{\rho S} \alpha_n \sin \omega t, \\ \frac{d^2 Y_{2,n}}{dt^2} + Z_n^2 Y_{2,n} + Z_n^2 \eta Y_{1,n} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

В результате исключения функции $Y_{2,n}$ из системы (22) для функции $Y_{1,n}$ получится следующее дифференциальное уравнение четвертого порядка с действительными коэффициентами:

$$\frac{d^4 Y_{1,n}}{dt^4} + 2Z_n^2 \frac{d^2 Y_{1,n}}{dt^2} + Z_n^4 (1 + \eta^2) Y_{1,n} = \frac{F_0}{\rho S} \alpha_n (Z_n^2 - \omega^2) \sin \omega t \quad (23)$$

Характеристическое уравнение дифференциального уравнения (23) имеет следующий вид [Клаф, Пензиен, 1979; Корн Г., Корн Т., 1971; Кошляков и др., 1962; Лурье, 1970; Музаев и др., 2014, 2016; Рэлей, 1965; Скучик, 1971; Слепьян, 1972; Сорокин, 1956; Уфлянд, 1948; Mindlin, 1951]:

$$(\lambda^2 + Z_n^2)^2 + Z_n^4 \eta^2 = 0, \quad (24)$$

Корни этого уравнения являются следующие комплексные числа:

$$\lambda = \pm(\alpha \pm i\beta)Z_n, \alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\eta^2}-1}{2}}, \beta = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\eta^2}+1}{2}} \quad (25)$$

Очевидно, что функции $Y_{1,n}(t)$ и $Y_{2,n}(t)$ должны быть ограничены при $t \rightarrow \infty$. В связи с этим решение дифференциального уравнения (23) получается в следующем виде [Корн Г., Корн Т., 1971; Кошляков и др., 1962; Музаев и др., 2014, 2016]:

$$Y_{1,n}(t) = \frac{F_0}{\rho S} \alpha_n \frac{(Z_n^2 - \omega^2) \sin \omega t}{(Z_n^2 - \omega^2)^2 + (Z_n^2 \eta)^2} \quad (26)$$

Для функции $Y_{2,n}(t)$ получается следующее выражение:

$$Y_{2,n}(t) = -\frac{F_0}{\rho S} \alpha_n \frac{Z_n^2 \eta \cos \beta Z_n t}{(Z_n^2 - \omega^2)^2 + (Z_n^2 \eta)^2} \quad (27)$$

Выражения (26) и (27) совместно представляют решение системы дифференциальных уравнений (22).

Для первоначальной искомой комплексной функции $U(x, t)$ получено следующее выражение:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} [Y_{1,n}(t) + iY_{2,n}(t)] \sin a_n x, a_n = \frac{n\pi}{L}, \quad (28)$$

При $\varepsilon \rightarrow 0$ из выражения (19) получается:

$$\alpha_n \rightarrow \frac{2}{L} \sin a_n x_0. \quad (29)$$

Действительная часть полученного решения (28) краевой задачи (15)–(17) представляет закон колебания балки, на которую приложена гармоническая сила $F(t) = F_0 \cdot \sin \omega t$:

$$ReU(x, t) = \frac{2 F_0}{L \rho S} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \frac{(Z_n^2 - \omega^2) \sin \alpha_n x}{(Z_n^2 - \omega^2)^2 + (Z_n^2 \eta)^2} \sin \omega t, Z_n = \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \alpha_n^2 \quad (30)$$

При $\varepsilon \rightarrow 0$ рассредоточенная сила $F(t)$ сосредотачивается в точке x_0 .

Модуль комплексного перемещения $U(x, t)$ получается в следующем виде:

$$|U(x, t)| = \frac{2 F_0}{L \rho S} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \frac{\sin \alpha_n x_0}{(Z_n^2 - \omega^2)^2 + (Z_n^2 \eta)^2} \sin \alpha_n x \quad (31)$$

Математический анализ полученных расчетных формул и концептуальное доказательство приемлемости разработанного метода. При значении $\eta=0$, в разработанном методе внутреннее сопротивление балки не учитывается. Комплексное решение (28) поставленной краевой задачи (15)–(17) вырождается в действительную функцию и приводится к следующему виду:

$$U(x, t) = \frac{2 F_0}{L \rho S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha_n x_0 \sin \alpha_n x}{Z_n^2 - \omega^2} \sin \omega t, \quad (32)$$

Эта расчетная формула для вынужденных перемещений в балке точно совпадает с расчетной формулой (3), которая впервые была получена С.П. Тимошенко [1959] методом виртуальных перемещений.

Если сила $F(t)$ изменяется настолько медленно, что $F(t)$ сохраняет постоянное значение F при $\omega \rightarrow 0$, то в формуле (30) можно пренебречь величиной ω^2 и тогда она приводится к следующему виду:

$$ReU(x, t) = \frac{2 F_0}{L \rho S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha_n x_0 \sin \alpha_n x}{Z_n^2 (1 + \eta^2)} \quad (33)$$

Если постоянная сила F приложена в середине балки, то формула (3.2) сильно упрощается и из нее получается следующая формула для максимального прогиба серединной точки балки под действием постоянной силы приложенной к середине балки:

$$ReU\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{2 F L^3}{\pi^4 E I (1 + \eta^2)} \quad (34)$$

При $\eta=0$ формулы (33) и (34) точно совпадают с формулой С.П. Тимошенко [1959] для той же задачи но без учета внутреннего сопротивления.

Из формулы (3) можно получить формулу для вычисления вынужденных колебаний балки, вызванных гармоническим моментом, приложенным к концу балки при $x=0$. К условиям таких колебаний мы приблизимся тем более точно, чем меньше координата x_0 точки приложения силы F . Взяв весьма малое значение x_0 и рассматривая только первые несколько членов ряда (33) можно принять приближение:

$$\sin \frac{n\pi}{L} x_0 \approx \frac{n\pi}{L} x_0.$$

Подставляя это приближенное значение в формулу (33) и обозначив $M=F \cdot x_0$, получим:

$$ReU(x, t) = \frac{2\pi M}{S \rho L^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(Z_n^2 - \omega^2) \sin \alpha_n x}{(Z_n^2 - \omega^2)^2 + (Z_n^2 \eta)^2} \sin \omega t \quad (35)$$

При $\eta=0$ эта формула точно совпадает с формулой, полученной С.П. Тимошенко [1959] для той же задачи, но без учета внутреннего сопротивления балки. В связи с тем, что колебание балки моделируется линейным дифференциальным уравнением, к поставленной приложим закон (принцип) суперпозиции согласно которому, если на балку действует несколько сил, то итоговое колебание определяется

наложением колебаний, обусловленных каждой отдельной силой. Если на балку действует равномерно распределенная по всей длине балки гармоническая нагрузка интенсивностью $q_0 \sin \omega t$ (Н/м), то соответствующее решение можно получить из выражения (28) следующими подстановками:

$$x_0 = \frac{L}{2}; \quad \varepsilon = \frac{L}{2}; \quad \frac{F}{L} = q_0;$$

и тогда:

$$\text{Re}U(x, t) = \frac{4q_0}{\rho S L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(Z_n^2 - \omega^2) \sin b_n x \sin \omega t}{[(Z_n^2 - \omega^2)^2 + (Z_n^2 \eta)^2]^{1/2} b_n}, \quad b_n = \frac{(2n-1)\pi}{L} \quad (36)$$

Если в выражении (36) предположить, что частота колебаний нагрузки весьма малая величина, но при этом интенсивность нагрузки сохраняет постоянное значение, то решение задачи, соответствующее этим предположениям, получается из выражения (36) в следующем виде:

$$\text{Re}U(x, t) = \frac{4q_0 L^4}{EI \pi^5 (1 + \eta^2)} \left(\frac{\sin \frac{\pi x}{L}}{1^5} + \frac{\sin \frac{3\pi x}{L}}{3^5} + \frac{\sin \frac{5\pi x}{L}}{5^5} + \dots \right) \quad (37)$$

Бесконечный ряд в скобках сходится очень быстро. Для вычисления прогиба серединной точки балки получается следующая приближенная формула:

$$\text{Re}U\left(\frac{L}{2}\right) \approx \frac{4q_0 L^4}{EI \pi^5 (1 + \eta^2)} \quad (38)$$

При $\eta=0$ эти формулы (35)–(38) точно совпадают с формулами полученными С.П. Тимошенко [1959]

В монографии Е. Скучика [1971] приведены графики зависимостей коэффициентов потерь η от частоты колебаний для следующих веществ: стекло, серебро, алюминий, сталь, латунь, резина и дерево с различной степенью сушки. Максимальное значение коэффициента потерь η имеет резина и составляет $\eta=0,5$, в то время как у всех остальных веществ η на два-три порядка меньше чем у резины. Для стали при высоких частотах колебаний $\eta=0,0005$.

Математический анализ полученных расчетных формул для вынужденных колебаний балки показывает, что учет сопротивления материала в колебательном процессе существенно уточняет закономерность колебания балки при около резонансных частотах колебаний. Если частота приложенной силы существенно отличается от всех значений спектра собственных (резонансных) частот колебаний балки, то учет внутреннего сопротивления материала балки на ее колебательный процесс практически не влияет из за малых значений величины η . В этом случае учет внутреннего сопротивления балки имеет лишь теоретический интерес.

Результаты работы и их обсуждение

В статье впервые получена совокупность расчетных формул для закона поперечного колебания балки с шарнирно заделанными концами, на которую приложены гармонические сосредоточенные силы. В полученных формулах уточнено внутреннее сопротивление материала балки.

Математическим анализом полученной совокупности расчетных формул доказано утверждение о том, что учет внутреннего сопротивления материала балки существенно уточняет закономерности колебания балки, когда частота колебания вынуждающей силы близка к частоте собственного колебания балки. Если частота приложенной силы существенно отличается от всех значений спектра собствен-

ных (резонансных) частот колебаний балки, то учет внутреннего сопротивления материала балки на ее колебательный процесс практически не влияет из-за малых значений коэффициента сопротивления. В этом случае учет внутреннего сопротивления балки имеет лишь теоретический интерес.

Выводы

Разработан эффективный метод постановки и решения краевых задач вынужденных поперечных колебаний балки с учетом внутреннего сопротивления материала балки, в соответствии с гипотезой Е.С. Сорокина. Колебание балки обусловлено приложением на нее сосредоточенной силы. Рассмотрен случай, когда концы балки заделаны шарнирно. При перечисленных условиях поперечные колебания балки моделируются краевой задачей математической физики, поставленной для дифференциального уравнения с комплексным коэффициентом. В связи с этим учет внутреннего сопротивления, а также сосредоточенность приложенной силы создают определенные математические трудности как в постановке, так и в решении краевой задачи. Разработанный метод постановки и решения подобных краевых задач основан на последовательном выполнении следующих математических операций:

- сосредоточенные силы рассредоточиваются на малых ε -окрестностях точек их приложения;
- искомая комплексная функция ищется в виде тригонометрического ряда по собственным функциям, удовлетворяющим граничные условия задачи;
- для вычисления коэффициентов тригонометрического ряда получается обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с комплексным коэффициентом, которое затем приводится к системе, состоящей из двух дифференциальных уравнений второго порядка с действительными коэффициентами и этим приемом устраняется комплексный коэффициент в краевой задаче;
- далее ход решения поставленной краевой задачи идет в соответствии с теорией решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с действительными коэффициентами;
- в конце решения краевой задачи ε -окрестности устремляются к нулю, раскрываются неопределенности типа $0/0$ и рассредоточенные силы вновь сосредотачиваются в точках их приложения.

Достоверность и приемлемость разработанного метода доказаны концептуальным анализом и путем сопоставления полученных в статье результатов с ранее известными решениями таких же задач, но без учета внутреннего сопротивления балки. Эти решения, как частный случай, точно совпадают с результатами, полученными в данной статье при равенстве нулю коэффициента потерь, через который учтено внутреннее сопротивление балки.

На основе полученных расчетных формул доказано утверждение о том, что учет внутреннего сопротивления материала балки существенно уточняет закономерности вынужденных колебаний, когда частота колебания вынуждающей силы близка к значению собственной частоты колебания балки.

Литература

1. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров. – М.: Наука, 1977. – 830 с.

3. Кошляков А.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Дифференциальные уравнения математической физики. – М.: Физматгиз, 1962. – 767 с.
4. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. – 940 с.
5. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Постановка и решение многослойной краевой задачи сейсмических колебаний высотного сооружения. // Сейсмическое строительство, безопасность сооружений. – 2014. – №01. – С. 22–25.
6. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Теоретические положения автоматизации проектирования селективных водозаборных устройств. // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21. №4. – С. 99–110.
7. Рэлей. Теория звука. Т. II. – М.: Гостехиздат, 1965. – 475 с.
8. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. Перевод с англ. – М.: Мир, 1971. – 274 с.
9. Слепян Л.И. Нестационарные упругие волны. – Л.: Судостроение, 1972. – 371 с.
10. Сорокин Е.С. Динамический расчет несущих конструкций зданий. – М.: Гостехиздат, 1956. – 336 с.
11. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Физматгиз, 1959. – 439 с.
12. Уфлянд Я.С. Распространение волн при поперечных колебаниях стержней и пластин. // Прикладная математика и механика. – 1948. – Т. 12. Вып. 2. – С. 289–300.
13. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Бетров З.С., Заалишвили В.Б. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8(1). – С. 46–51.
14. Ansari M.F.F.S., Mohammadi V., Rouhi, H. Nonlinear forced vibration analysis of postbuckled beams. // Archive of Applied Mechanics. – 2014. – Vol. 84(3). – pp. 421–440.
15. Das D., Sahoo P., Saha, K. A numerical analysis of large amplitude beam vibration under different boundary conditions and excitation pattern. // Journal of Vibrations and Control. – 2011. – Vol. 18(12). – pp. 1900–1915.
16. Khiem N.T., Tean L.K. A novel method for crack detection beamlike structures by measurement of natural frequencies. // Journal of Sound and Vibration. – 2003. – Vol. 259(1). – pp. 145–160.
17. Lepidi M., Gautulle V., Verstroni F. Damage identification in classic suspended cables through frequency measurement. // Journal of Vibrations and Control. – 2009. – Vol. 15(6). – pp. 867–896.
18. Li S., Reinders E., Maes K., De Roeck G. Vibration-based estimation of axial force for a beam member with uncertain boundary conditions. // J. Sound Vibrat. – 2013. – Vol. 332. – pp. 795–802.
19. Mazza, F., Mazza, M. Nonlinear analysis of spatial framed structures by lumped plasticity model based on the Haar-Karman principle. // Computational Mechanics. – 2010. – Vol. 45(6). – pp. 647–664.
20. Mindlin R.D. Influence of rotary inertia and shear elastic plates. // Journ. Of Appl. Mech. 1951. – Vol. 18. No.1. – p.31.
21. Prasad R., Seshu D.R. A study on dynamic characteristic of structural materials using modal analysis. // Asian Journal of Civil Engineering. – 2008. – Vol. 9. No.2. – pp. 141–152.
22. Wang Y.-R., Chang H.-L. The effect of a vibration absorber on a nonlinear two-dimensional system in vibration reduction. // J. Emerging Trends And Appl. Sci. – 2010. – Vol. 1. No.1. – pp. 60–71.

References

1. Clough R., Penzien J. Structural dynamics. Moscow. Stroyizdat, 1979. 320 p. (In Russ.)
2. Korn G., Korn T. Handbook of mathematics for researchers and engineers. Moscow. Nauka, 1977. 830 p. (In Russ.)

3. Koshlyakov A.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Differential Equations of Mathematical Physics. Moscow. Fizmatgis, 1962. 767 p. (In Russ.)
4. Lurie A.I. Theory of elasticity. M.: Nauka, 1970. - 940 p. (In Russ.)
5. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. The multilayer boundary-value problem of the high-rise building seismic vibrations setting and the solution. Earthquake engineering. Constructions safety. 2014 . No. 01 . pp. 22–25. (In Russ.)
6. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Theoretical positions of automation of designing selective water intake devices. Computational technologies. 2016. Vol. 21. No. 4. pp. 99–110. (In Russ.)
7. Rayleigh. Theory of sound. T. II . Moscow. Gostekhizdat, 1965. 475 p. (In Russ.)
8. Skuchik E. Simple and complex oscillatory systems. Moscow. Mir. 1971. 274 p. (In Russ.)
9. Slepyan L.I. Non-stationary elastic waves. Leningrad. Shipbuilding. 1972. 371 p. (In Russ.)
10. Sorokin E.S. Dynamic calculation of load-bearing structures of buildings. Moscow. Gostekhizdat, 1956. 336 p. (In Russ.)
11. Timoshenko S.P. Vibrations in engineering. Moscow. Fizmatgiz, 1959. 439 p. (In Russ.)
12. Uflyand Ya.S. Propagation of waves during transverse vibrations of rods and plates. Applied mathematics and mechanics. 1948. Vol. 12. Issue 2. pp. 289–300. (In Russ.)
13. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. Sustainable Development of Mountain Territories. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51.
14. Ansari MFFS, Mohammadi V., Rouhi, H. Nonlinear forced vibration analysis of postbuckled beams. Archive of Applied Mechanics. 2014. Vol. 84. No. 3. pp. 421–440.
15. Das D., Sahoo P., Saha, K. A numerical analysis of large amplitude beam vibration under different boundary conditions and excitation pattern. Journal of Vibrations and Control. 2011. Vol. 18. No. 12. pp. 1900–1915.
16. Khiemm NT, Tean LK A novel method for crack detection beamlike structures by measurement of natural frequencies. Journal of Sound and Vibration. 2003. Vol. 259. No. 1. pp. 145–160.
17. Lepidi M., Gautulle V., Verstroni F. Damage identification in classic suspended cables through frequency measurement. Journal of Vibrations and Control. 2009. Vol. 15. No. 6. pp. 867–896.
18. Li S., Reinders E., Maes K., De Roeck G. Vibration-based estimation of axial force for a beam member with uncertain boundary conditions. Journal of Sound and Vibration. 2013. Vol. 332. pp. 795–802.
19. Mazza, F., Mazza, M. Nonlinear analysis of spatial framed structures by lumped plasticity model based on the haas-karman principle. Computational Mechanics. 2010. Vol. 45. No. 6. pp. 647–664.
20. Mindlin RD Influence of rotatory inertia and shear elastic plates. Journal of Applied Mechanics. 1951. Vol. 18. No.1. p. 31.
21. Prasad R ., Seshu DR A study on dynamic characteristic of structural materials using modal analysis. Asian Journal of Civil Engineering. 2008. Vol. 9. No.2. pp. 141–152.
22. Wang Y.-R., Chang H.-L. The effect of a vibration absorber on a nonlinear two-dimensional system in vibration reduction. Journal of Emerging Trends And Applied Sciences. 2010. Vol. 1. No.1. pp. 60–71.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3

[DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.67.36.006)

Оригинальная статья

Об оценках спектров колебаний и спектральных характеристик грунтов для вероятностного анализа сейсмической опасности территорий

Ю.К. Чернов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru

Статья поступила: 26.04.2023, доработана: 22.05.2023, одобрена к публикации: 31.05.2023

Резюме: Актуальность работы. В связи с появлением новых данных о существенной вариабельности, полученных для территории РСО-Алания интегральных (кумулятивных) оценок макросейсмической интенсивности сотрясений разных по сейсмическим свойствам грунтов, для этого же района рассмотрены аналогичные количественные оценки других важных с научной и практической точек зрения характеристик сейсмических воздействий – спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов и соотношений между ними. **Цель исследования.** Изучение абсолютных и относительных оценок интегральных спектров колебаний грунтов с разными сейсмическими свойствами для вероятностного прогнозирования сейсмической опасности территории РСО-Алания. **Методы исследования.** Основной элемент работы – вероятностный анализ сейсмической опасности (PSHA) нескольких «представительных» участков территории РСО-Алания, выполненный в терминах интегральных вероятных спектров Фурье и спектров реакции колебаний «мягких» и «твердых» грунтов, а также соотношений между ними – спектральных характеристик. Итоговые функции распределения рассчитывались отдельно для каждой из 18 спектральных составляющих в диапазоне частот 0,28–22 Гц. Расчеты проведены на основе формулы полной вероятности, где условная вероятность отражает случайную природу колебаний грунта при возникновении землетрясений, а безусловная – неопределенность в возникновении этих землетрясений. Использованы разработанные ранее модели локальной сейсмичности (модели зон ВОЗ, повторяемости землетрясений во времени и др.) и модели сильных движений (вероятностные функции затухания спектров Фурье «мягких» и «твердых» грунтов). Интегральные спектры реакции рассчитывались по интегральным спектрам Фурье с использованием связи спектральных ускорений с энергетической спектральной плотностью Фурье. **Результаты исследования.** Для каждого «представительного» участка разработаны интегральные спектры Фурье и спектры реакции колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях со средними периодами повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет. По соотношениям этих спектров определены интегральные спектральные характеристики колебаний «мягких» грунтов по отношению к «твердым». Произведен сравнительный анализ полученных спектров и спектральных характеристик. Показано, что полученные спектральные характеристики подвержены значительным (до 45%) флуктуациям как в части расположения расчетного участка, так и в зависимости от среднего периода повторяемости расчетных землетрясений, что говорит о необходимости учета этого обстоятельства в исследовательской и практической работе. Установленные флуктуации спектров и спектральных характеристик в целом сходны с выявленной ранее для данной территории вариабельностью интегральных макросейсмических интенсивностей сотрясений и приращений балльности. Но есть и отличия. Это делает прямые переходы, например, от оценок приращений балльности к спектральным характеристикам чреватыми существенными погрешностями. Это также следует иметь в виду при проведении оценок типа PSHA. Полученные результаты пока трактуются как относящиеся только к территории РСО-Алания. Насколько они применимы и к другим районам предстоит выяснить в дальнейшем.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, вероятностные оценки сейсмических воздействий, спектральные характеристики грунтов, спектры колебаний грунта, сейсмическое микрорайонирование.

Для цитирования: Чернов Ю.К. Об оценках спектров колебаний и спектральных характеристик грунтов для вероятностного анализа сейсмической опасности территорий. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006.

GEOPHYSICS

[DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.67.36.006)

Original paper

On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories

Y.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: 26.04.2023, revised: 22.05.2023, accepted: 31.05.2023

Abstract: Relevance. In connection with the emergence of new data on the significant variability of integral (cumulative) estimates of the macroseismic intensity of shaking of soils of different seismic properties obtained for the territory of RNO–Alania, similar quantitative estimates of other seismic impact characteristics that are important from scientific and practical points of view are considered for the same area – vibration spectra of “soft” and “hard” soils and the relationships between them. **The aim.** The study of absolute and relative estimates of the integral spectra of soil vibrations with different seismic properties for probabilistic forecasting of the seismic hazard of the RNO–Alania territory. **Methods.** The main element of the work is a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) of several “representative” sites of the RNO–Alania territory, performed in terms of the integral probable Fourier spectra and the response spectra of vibrations for “soft” and “hard” soils, as well as the ratios between them – spectral characteristics. The final distribution function was calculated separately for each of the 18 spectral components in the frequency range of 0.28–22 Hz. The calculations were carried out on the basis of the total probability formula, where the conditional probability reflects the random nature of ground vibrations during the occurrence of earthquakes, and the unconditional one reflects the uncertainty in the occurrence of these earthquakes. Previously developed models of local seismicity (models of PSS zones, recurrence of earthquakes in time, etc.) and models of strong motions (probability functions of the Fourier spectrum attenuation of “soft” and “hard” soils) were used. The integral reaction spectra were calculated from the integral Fourier spectra using the relationship between spectral accelerations and the Fourier energy spectral density. **Results.** For each “representative” site, integral Fourier spectra and response spectra of vibrations for “soft” and “hard” soils during earthquakes with average return periods of 500, 1000, 2500 and 5000 years have been developed. According to the ratios of these spectra, the integral spectral characteristics of vibrations of “soft” soils in relation to “hard” soils are determined. A comparative analysis of the obtained spectra and spectral characteristics is carried out. It is shown that the obtained spectral characteristics are subject to significant (up to 45%) fluctuations both in terms of the location of the calculated site and depending on the average recurrence period of the calculated earthquakes, which indicates the need to take this circumstance into account in research and practical work. The established fluctuations of the spectra and spectral characteristics are generally similar to the variability of the integral macroseismic intense shaking and intensity increments identified earlier for this territory. But there are also differences. This makes direct transitions, for example, from estimations of intensity increments to spectral characteristics, fraught with significant errors. This should also be kept in mind when conducting PSHA–type assessments. The results obtained so far are interpreted as relating only to the territory of RNO–Alania. How applicable they are to other areas remains to be seen in the future.

Keywords: seismic hazard, probabilistic estimates of seismic impacts, spectral characteristics of soils, spectra of soil vibrations, seismic microzonation.

For citation: Chernov Y.K. On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006.

Введение

Грунтовые условия существенным образом влияют на характер и величину последствий возникающих в данном месте землетрясений. В связи с этим количественной оценке и учету такого влияния в инженерно-сейсмологических исследованиях во всем мире всегда уделялось большое внимание. В результате к настоящему времени уже накоплен обширный опыт экспериментальных и теоретических разработок, произведены глубокие обобщения, подготовлены соответствующие методические и практические рекомендации, создана соответствующая нормативная база. В то же время, несмотря на значительный прогресс в данной области знаний, в процессе развития данного направления продолжают выявляться новые аспекты, требующие дополнительного рассмотрения. Так, например, выполненные в Геофизическом институте ВНИИ РАН исследования, показали, что функции затухания спектров Фурье ускорений колебаний двух разных типов грунтов, в обобщенном виде названных «мягкими» и «твердыми», могут существенно отличаться от моделей, традиционно используемых в отечественной и ряде зарубежных практик оценок сейсмических воздействий, сейсмической опасности и сейсмического риска. Основная особенность этих функций затухания состоит в том, что количественные соотношения между уровнями спектральной плотности ускорений колебаний рассмотренных двух типов («мягких» и «твердых») грунтов на фиксированных частотах не являются постоянными (в средне-статистическом смысле, разумеется) величинами, как это вытекает из действующих отечественных нормативно-методических документов, а закономерно меняются в зависимости от частоты спектральной составляющей, магнитуды землетрясения и расстояния до очага [Чернов, 2022]. В свою очередь, использование этих новых функций затухания в расчетах сейсмических воздействий, может приводить к корректировке оценок, получаемых на основе традиционных моделей сильных движений грунта. В наиболее простой и явной форме этот эффект будет проявляться в случае так называемых «ситуационных» оценок, когда расчет воздействия осуществляется для землетрясения с известным (заданным) расположением, магнитудой и другими характеристиками очага ожидаемого землетрясения. Для интегральных же вероятностных оценок, когда прогнозируемое воздействие рассчитывается как суперпозиция воздействий от всех потенциально опасных для данного места очагов землетрясений, с учетом вероятности их возникновения в окружающем расчетную точку сейсмогенерирующем пространстве, вопрос о том, каковы характер и величина ожидаемой коррекции уже не является тривиальным и требует отдельного рассмотрения.

В связи с этим в Геофизическом институте ВНИИ РАН в рамках следующего этапа исследований для территории РСО-Алания выполнены вероятностные оценки макросейсмической интенсивности сотрясений для «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях со средними периодами повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет. Эти данные затем были использованы для оценок распределения по рассматриваемой территории приращений балльности, т.е. поточечных разностей вероятных балльностей сотрясений, рассчитанных для «мягких» и «твердых» грунтов. Полученные результаты показали значительную (до 0,8 балла *MSK*) вариабельность рассчитанных значений приращений балльности как по площади, так и по повторяемости расчетных землетрясений, что, помимо чисто познавательного значения, делает учет этих флуктуаций актуальным для практических целей (подробнее см. в [Чернов Ю. и др., 2022]).

В вышеуказанном случае вероятные сейсмические воздействия в первоочередном порядке рассмотрены в виде макросейсмических интенсивностей сотрясений.

Это сделано потому, что в отечественных строительных нормативах именно этот параметр является одним из основных показателей, используемых для расчетов сейсмических нагрузок на строительные объекты. В то же время практикой антисейсмического проектирования предусмотрено использование еще одного важного расчетного параметра – спектров реакции колебаний грунта, которые российскими нормативами в формализованном виде задаются в виде произведения нормативного или эффективного ускорения (ранее коэффициента сейсмичности) и соответствующих разным частотам коэффициентов динамичности. Поэтому, принимая во внимание вышеприведенные оценки вариабельности приращений балльности, можно сказать, что в рассматриваемом контексте вопрос анализа вариабельности вероятных интегральных спектров «мягких» и «твердых» грунтов и их соотношений (спектральных характеристик) при оценках долговременной сейсмической опасности также становится **актуальным**.

Рассмотрению данной **задачи** и посвящено настоящее исследование.

Методика исследований

Основным элементом данной работы является вероятностный анализ сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis или PSHA) нескольких «представительных» участков территории РСО-Алания, выполненный в терминах интегральных вероятных спектров Фурье и производных от них спектров реакции ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов. Рассмотрено четыре таких участка размером 5×5 км² – по одному в каждой из выделенных ранее на территории РСО-Алания зон с разными значениями приращений балльности для землетрясений с средним периодом повторяемости $t=500$ лет. Расположение участков выбрано таким образом, чтобы они характеризовались средними для данной зоны значениями приращений балльности (рис. 1). Для каждого из участков (№1–4) сделаны оценки спектров Фурье и спектров реакции для землетрясений со средними периодами повторяемости $t=500$, 1000, 2500 и 5000 лет.

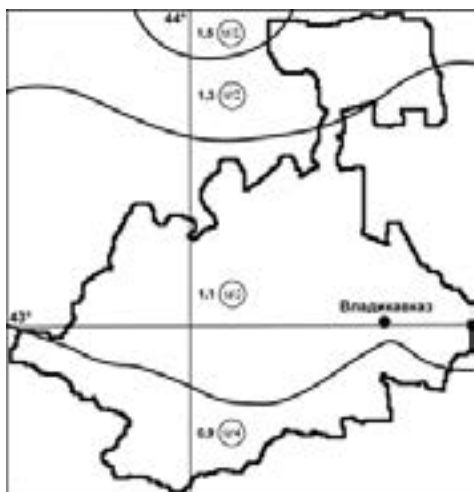


Рис. 1. Участки, для которых произведены оценки вероятных спектров и спектральных характеристик «мягких» и «твердых» грунтов (кружки с номерами этих участков). Толстая линия – граница РСО-Алания; тонкие линии – границы зон с разными приращениями балльности для землетрясений с $t=500$ лет из [Чернов Ю. и др., 2022], цифры около кружков – средние значения приращений балльности для данной зоны /

Fig. 1. Sites for which estimates of probable spectra and spectral characteristics of “soft” and “hard” soils were made (circles with numbers of these sites). The thick line is the RNO–Alania border; thin lines are the boundaries of zones with different intensity increments for earthquakes with $t=500$ years from [Chernov Yu. et al., 2022], the numbers near the circles are the average intensity increments for this zone

Расчеты PSHA производились по той же общей схеме, что и ранее выполненные оценки макросейсмических интенсивностей сотрясений. Согласно этой схеме, итоговая функция распределения вероятностей рассчитывается на основе формулы полной вероятности, где условная вероятность отражает случайную природу ко-

лебаний грунта при возникновении землетрясений с теми или иными характеристиками, а безусловная описывает случайный характер возникновения самих этих землетрясений (см. [Чернов Ю. и др., 2022]).

В процессе указанных построений использованы исходные данные двух типов. Первый тип – это разработанные на предыдущих этапах исследования модели сильных движений грунта (СДГ) – спектров Фурье ускорений колебаний двух типов грунтов, обозначаемых как «мягкие» и «твердые» грунты. Подробно эти модели описаны в [Чернов, 2022]. Здесь же приводятся только их основные характеристики.

Данные модели описывают частотно-зависимые значения параметров функций распределения вероятностей уровней спектральной плотности Фурье ($|S|(f)$) колебаний указанных двух типов грунтов при землетрясениях с различными магнитудами (M) и расстояниями до очага (D). Эти модели построены на основе статистического анализа большого объема эмпирического материала – 2362 спектра колебаний «мягких» и 1021 спектр «твердых» грунтов при землетрясениях с $M=2,5-7,3$ и $D=1-672$ км инструментально зарегистрированных на Кавказе, в Средней Азии, на Дальнем Востоке, в Калифорнии, Индии, Новой Зеландии, Юге Европы, Тайване, Японии и других сейсмоактивных районах мира. Исходным материалом при этом являются записи землетрясений, в разные годы полученные эпицентрными экспедициями и стационарными сейсмическими станциями Института сейсмологии АН УзССР, Института физики Земли АН СССР (РАН), Института морской геологии и геофизики ДВО АН СССР (РАН) и материалы, приводимые в публикациях, (см. [Ташкентское..., 1971; San-Fernando..., 1973; Analysis..., 1969-1976; Toker, Brune, 1973; Рустанович, 1974; Bull. of international..., 1978a–e; Strong-motion..., 1975-1979; Preliminary..., 1979; Назарбекское..., 1981; , Дагестанское..., 1981; Исфара-Баткентское..., 1981; Porcella et al., 1982; Bull. of strong-motion..., 1984a–c; Газлийские..., 1986; Папское..., 1986; Адылов и др., 1988; The Northridge..., 1994; Шикотанское..., 1995; Геодинамика..., 1997; Соколов, 1998], а также в специализированных базах сильных движений (Strong-Motion Virtual Data Center (VDC); European Strong-Motion Database (ESD)).

Модели построены в виде оценок наиболее вероятных значений и дисперсий (стандартных отклонений), распределенных по нормальному закону (при заданных M , D и f) случайных величин $\lg|S|(f)$ в ближней зоне землетрясений разных магнитуд и частотно-зависимых коэффициентов затухания этих величин по мере удаления от очагов землетрясений – $n(f, M, D) = \Delta \lg|S|(f, M, D) / \Delta \lg D$. На рисунке 2 в графическом виде даны примеры этих характеристик.

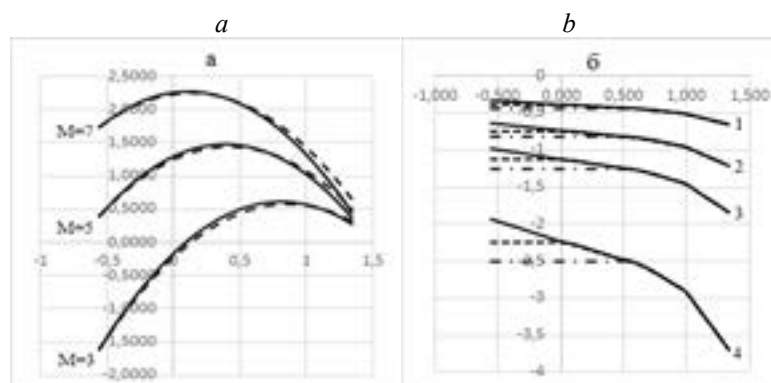


Рис. 2. Примеры принятых моделей СДГ: а – наиболее вероятные уровни спектров Фурье колебаний «мягких» (сплошная линия) и «твердых» (пунктир) грунтов в ближней зоне землетрясений разных магнитуд (M), ось ординат – $\lg|S|$ в см/с, ось абсцисс – $\lg f$ в Гц;

b – коэффициенты затухания n (ось ординат) уровней спектров колебаний «мягких» грунтов в зависимости от $\lg f$ (ось абсцисс); индексы 1, 2, 3, 4 – в переходной, в первой подзоне дальней зоны, в дальней зоне и во второй подзоне дальней зоны, соответственно; сплошная линия, пунктир и пунктир с точкой – для землетрясений с $M=7$, 5, и 3, соответственно /

Fig. 2. Examples of adopted SDG models: a – the most probable levels of the Fourier spectra for “soft” (solid line) and “hard” (dotted line) soil vibrations in the near zones of earthquakes of different magnitudes (M), ordinate axis – $\lg|S|$ in cm/s, abscissa-axis is $\lg f$ in Hz; b – attenuation coefficients n (ordinate axis) of the levels of vibration spectra for “soft” soils depending on $\lg f$ (abscissa axis), indices 1, 2, 3, 4 – in the transition, in the first subzone of the far zone, in the far zone and in the second subzone of far zone, respectively, solid line, dashed line and dashed line with a dot – for earthquakes with $M=7$, 5, and 3, respectively

Второй тип исходных данных – это разработанные на предыдущих этапах исследований модели локальной сейсмичности – модели зон ВОЗ (зон возникновения очагов землетрясений), модели повторяемости очагов землетрясений в рассматриваемом пятимерном сейсмогенерирующем объеме (энергия-пространство-время), модели, описывающие параметры потенциально опасных очагов землетрясений (рис. 3).

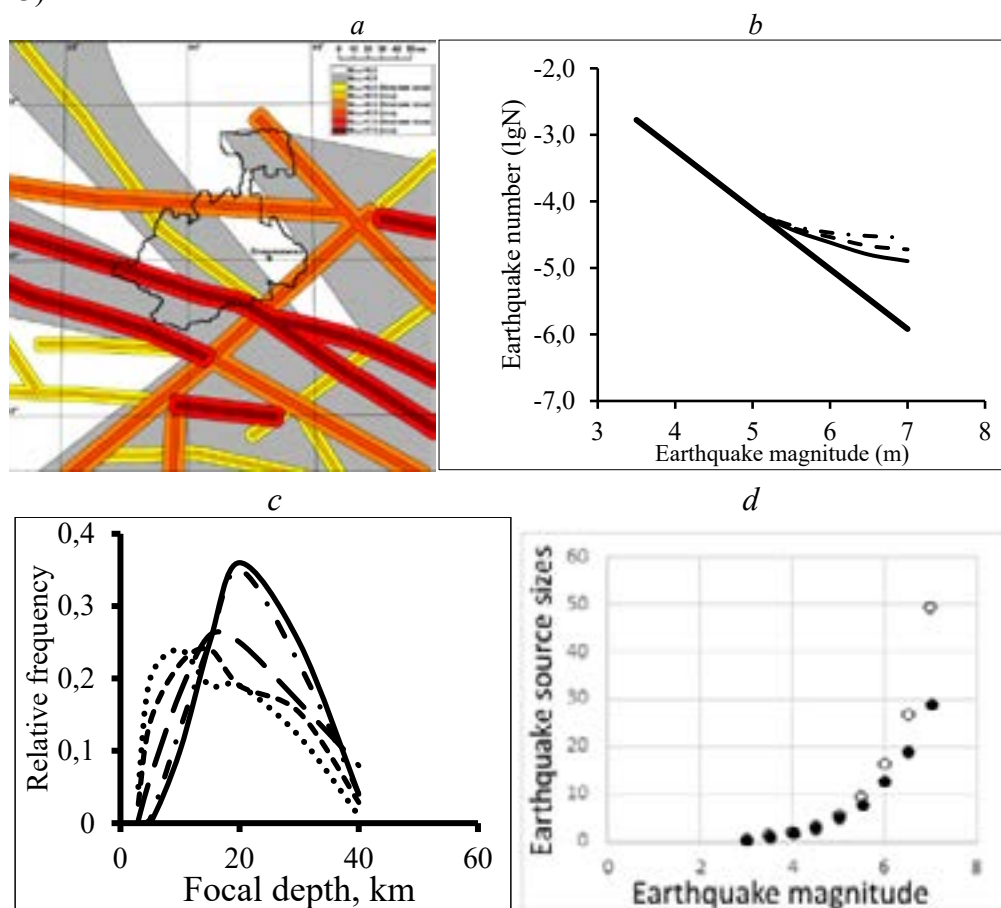


Рис. 3. Примеры использованных моделей локальной сейсмичности. a – зоны ВОЗ, черная ломаная линия – граница РСО-Алания; b – средние количества землетрясений (N) разных магнитуд (M) для площади $5 \times 5 \text{ км}^2$ и времени 1 год (толстая и тонкая сплошные линии – средние по району и по зонам ВОЗ с разными $M_{\max}$, без разделения на осевые и боковые подзоны; пунктир и пунктир с точкой – для зон ВОЗ с разными $M_{\max}$ с разделением на боковые и осевые подзоны, соответственно); c – распределения очагов по глубине для землетрясений с $M=3$ (точечная линия), с $M=4$ (короткий пунктир) с $M=5$ (длинный пунктир), с $M=6$ (пунктир с точкой, с $M=7$ (сплошная линия); d – длина и ширина (пустые и залитые кружки) очагов землетрясений /

Fig.3. Examples of used models of local seismicity. a – PSS zones, black broken line – the border of RNO–Alania; b – average number of earthquakes ($\bar{N}$) of different magnitudes ($\bar{M}$) for an area of 5'5 sq. km. and time of 1 year (thick and thin solid lines are averages for the area and for the PSS zones with different M_{max} without division into axial and lateral subzones; dashed line and dashed line with a dot are for PSS zones with different M_{max} divided into lateral and axial subzones, respectively); c – depth distributions of sources for earthquakes with $M=3$ (dotted line), with $M=4$ (short dashed line) with $M=5$ (long dashed line), with $M=6$ (dashed line with a dot), with $M=7$ (solid line); d – length and width (empty and filled circles) of earthquake sources

Под «зонами ВОЗ» здесь понимаются сейсмогенерирующие области земной коры и верхней мантии, где очаги землетрясений могут возникнуть или зародиться. Сами же очаги в процессе своего развития могут и выходить за границы непосредственно зон ВОЗ. В данном случае физический смысл зон ВОЗ отличается от представления о зонах ВОЗ как об областях, целиком вмещающих возникающие в их пределах очаги землетрясений. Указанные различия в определении зон ВОЗ не имеют большого значения при оценках сейсмической опасности на больших удалениях от этих зон или при небольших, разрешенных в этих зонах магнитудах землетрясений. При приближении же к зонам ВОЗ, особенно если в них могут возникать очаги большой протяженности, влияние размеров очага может оказаться решающим при оценках вызываемых ими сейсмических воздействий.

Итоговые функции распределения вероятностей случайных величин $lg|S|(f)$ рассчитывались отдельно для 18 спектральных составляющих, равномерно распределенных по частоте в инженерном диапазоне 0,28–22 Гц. По этим функциям затем по методике из [Ванмарке, 1981] оценивались параметры функций распределения соответствующих спектров реакции ($SA(f)$), т.е. амплитуд колебаний 18-ти осцилляторов с 5-типроцентным затуханием.

По полученным интегральным (кумулятивным) спектрам Фурье и спектрам реакции рассчитывались спектральные характеристики «мягких» грунтов по отношению к «твердым» – значения $\phi(f)=|S|(f)_m/|S|(f)_t$ и $\psi(f)=SA(f)_m/SA(f)_t$, соответственно.

Результаты работы и их обсуждение

На рисунке 4 в качестве примера приведены вероятные значения $|S|(f)$ и $SA(f)$ «мягких и «твердых» грунтов, рассчитанные для рассматриваемых четырех участков территории РСО-Алания при землетрясениях с $t=500$ лет.

Из этого рисунка видно, что уровни спектров (и Фурье, и реакции) при землетрясениях с $t=500$ возрастают в южном направлении – от участка №1 к участку №4. Максимальные значения $|S|(f)_m$ и $|S|(f)_t$ наблюдаются на частотах 1–1,3 Гц, а максимумы $SA(f)_m$ и $SA(f)_t$ – на частотах 3–3,5 Гц. Спектры колебаний «твердых» грунтов в пределах одного участка ниже спектров колебаний «мягких» грунтов. Примерно так же ведут себя спектры Фурье и спектры реакции при увеличении t . Разница состоит в постепенном возрастании общего уровня спектров (и Фурье, и реакции, и для «мягких» и для «твердых» грунтов) в 2,3–2,9 раза при изменении t от 500 до 5000 лет. Стандартные отклонения случайных величин $lg|S|(f)$ и $lgSA(f)$ (в предположении их лог. нормального распределения) составляют $\sim 0,3$ для рассматриваемых f и t и для всех исследуемых участков на территории РСО-Алания.

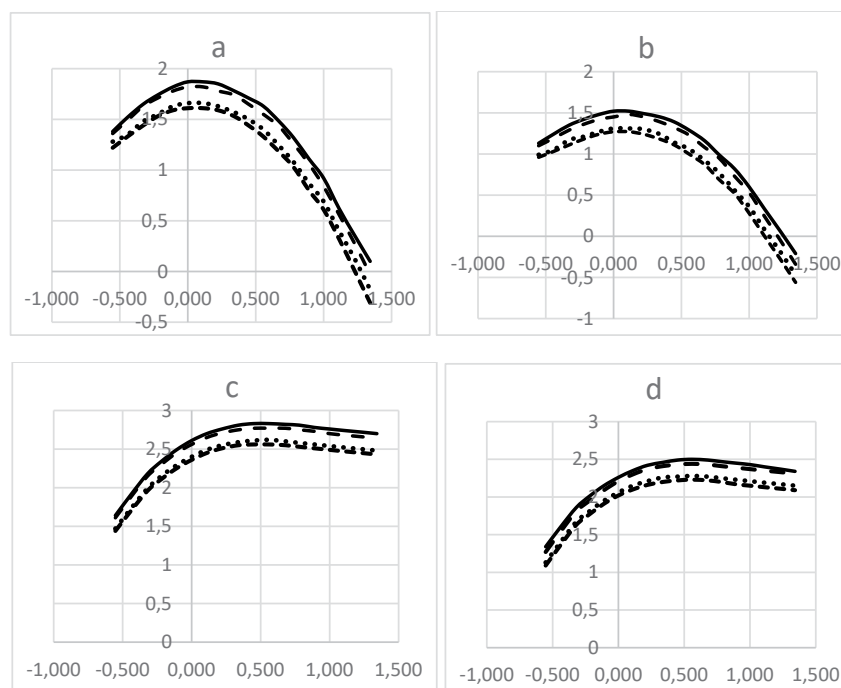


Рис. 4. Наиболее вероятные спектры колебаний грунта при землетрясениях с $t=500$ лет: а и б – спектры Фурье «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно; с и d – спектры реакции «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно; короткий пунктир, точечная линия, длинный пунктир и сплошная линия – оценки для участков №1, 2, 3 и 4, соответственно; оси абсцисс – $\lg f$ в Гц, оси ординат – $\lg|S|$ в см/с и $\lg SA$ и см/с/с, соответственно /

Fig. 4. The most probable spectra of soil vibrations during earthquakes with $t=500$ years: a and b – Fourier spectra for “soft” and “hard” soils, respectively; c and d – reaction spectra for “soft” and “hard” soils, respectively; short dashed line, dotted line, long dashed line and solid line are the estimates for sites 1, 2, 3 and 4, respectively; abscissa axes – $\lg f$ in Hz, ordinate axes – $\lg|S|$ in cm/s and $\lg SA$ and cm/s/s, respectively

О реалистичности представленных выше оценок (например, спектров реакции), в частности, говорит их хорошая согласованность с приведенными в таблице 1 независимыми оценками вероятных пиковых ускорений (PGA) и интенсивности сотрясений (I) грунта, полученных для тех же участков в процессе предыдущих исследований (см. [Чернов Ю. и др., 2022]).

Таблица 1 / Table 1

Интегральные вероятностные оценки параметров сейсмических воздействий в условиях «мягких» грунтов, независимым образом полученные для рассматриваемых участков территории РСО-Алания при землетрясениях с разными средними периодами повторяемости t . / Integral probabilistic estimates of the parameters of seismic impacts in the conditions of “soft” soils, independently obtained for the considered sites of the territory of RNO–Alania for earthquakes with different average return periods t

Участок, № / Site, N	t, лет /	Параметры сейсмических воздействий / Parameters of seismic impacts		
		$SA(f)_{\max}$, см/с/с / $SA(f)_{\max}$, cm/s/s	PGA , см/с/с / PGA , cm/s/s	I , балл MSK / I , MSK intensity
1	500	372	158	7,09
	1000	490	200	7,39
	2500	646	269	7,80
	5000	759	331	8,12

2	500	417	178	7,25
	1000	540	223	7,46
	2500	708	316	8,03
	5000	891	407	8,35
3	500	589	219	7,62
	1000	813	309	8,00
	2500	1122	437	8,48
	5000	1380	589	8,75
4	500	676	245	7,81
	1000	912	347	8,20
	2500	1245	501	8,75
	5000	1549	661	9,10

Действительно, отношения $(SA(f)_{\max})/PGA$ для разных участков и значений t варьируют в диапазоне 2,19-2,76 (среднегеометрическое значение 2,45), что не противоречит многочисленным данным, полученным разными исследователями по инструментальным записям сильных землетрясений (см. например, [Sadigh et al., 1986; Boore et al., 1994; Boore, Atkinson, 2008]). Соотношения между $SA(f)_{\max}$ (и другими значениями $SA(f)$), полученными в настоящем исследовании и I , коррелируют, например, с данными, приводимыми в [Atkinson, Sonley, 2000]. Кроме того, хорошие соответствия можно видеть между спектрами реакции настоящих исследований и оценками спектров, вытекающими из рекомендаций отечественных строительных нормативов, применительно к приведенным в таблице 1 значениям PGA и I в сочетании со стандартной кривой динамичности $\beta(T)$.

Далее по полученным интегральным спектрам для рассматриваемых участков территории РСО-Алания выполнен расчет соотношений $\phi(f)=|S(f)_M|/|S(f)_T|$ и $\psi(f)=SA(f)_M/SA(f)_T$ для землетрясений с $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет. На рисунке 5 приведены типичные примеры полученных оценок.

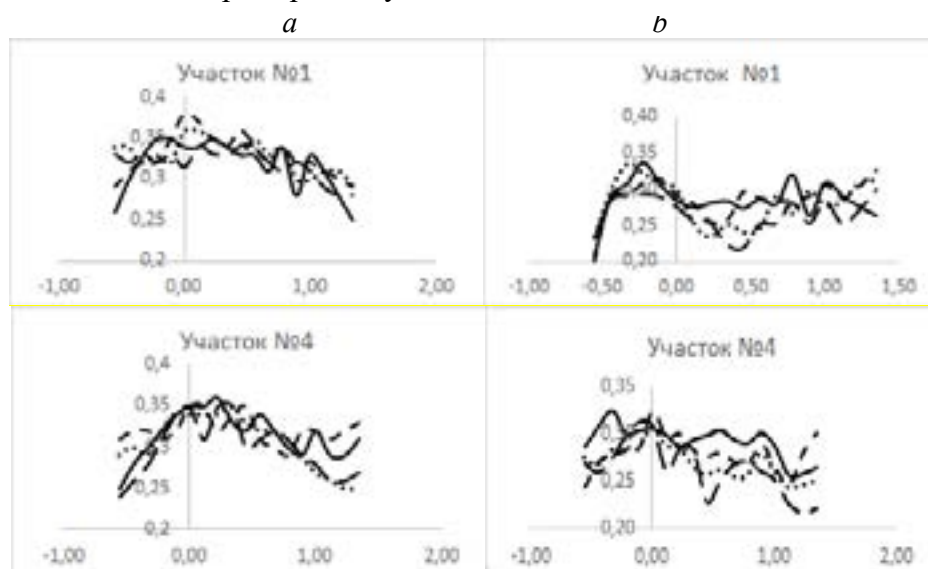


Рис. 5. Примеры вероятных значений $\lg\phi(f)$ (a) и $\lg\psi(f)$ (b), рассчитанных для различных участков и землетрясений с $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет (сплошные линии, короткий пунктир, точечные линии и длинный пунктир, соответственно); оси абсцисс – $\lg f$ в Гц /

Fig. 5. Examples of probable values of $\lg\phi(f)$ (a) and $\lg\psi(f)$ (b) calculated for different areas and earthquakes with $t=500, 1000, 2500$ and 5000 years (solid lines, short dashed line, dotted lines and long dashed line, respectively); abscissa axis – $\lg f$ in Hz

Как видно из этих примеров, функции $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, рассчитанные для разных участков и для разных значений t заметно различаются между собой. В принципе их вариабельность ожидаема, принимая во внимание результаты предыдущих исследований (см. [Чернов, 2022; Чернов Ю. и др., 2022] и рис. 1). В удобном для анализа виде эта вариабельность видна на рисунке 6, где приведены значения $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, полученные на всех рассматриваемых участках и для землетрясений со всеми рассматриваемыми t . Из этого рисунка, например, можно видеть некоторые общие черты в характере полученных данных. Так значения и $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ имеют значительный разброс во всем рассматриваемом диапазоне частот. Максимумы этих разбросов наблюдаются на крайних высоких и низких частотах, где $\varphi(f)$ изменяются от 1,73 до 2,40 (разница 39%), а $\psi(f)$ – от 1,58 до 2,29 (разница 45%). Минимальные разбросы наблюдаются в области частот 0,6–0,8 Гц – для $\varphi(f)$ от 2,0 до 2,24 (разница 12%) и для $\psi(f)$ от 1,93 до 2,15 (разница 11%). Стандартные отклонения значений $\lg\varphi(f)$ и $\lg\psi(f)$ по всем оценкам также близки – 0,027 и 0,026, соответственно. Уменьшение (по сравнению с общим фоном) значений как $\varphi(f)$, так и $\psi(f)$, наблюдается на частотах, на которых наблюдаются максимальные уровни спектров Фурье и спектров реакции.

Есть и некоторые отличия. Так, среднегеометрические по массиву значения $\varphi(f)$ составляют ~2,1, против 1,94 для аналогичных определений $\psi(f)$. Кроме того, в области средних частот ($f=2-6$ Гц) разброс значений $\varphi(f)$ в среднем уменьшается, в то время как разброс значений $\psi(f)$, наоборот, увеличивается.

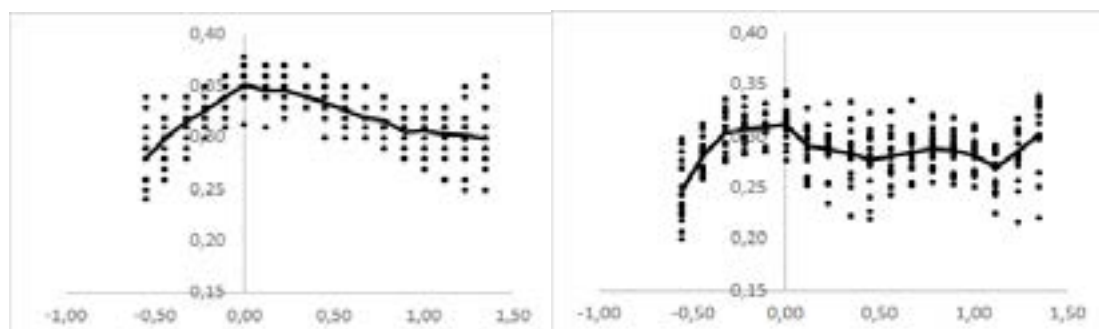


Рис. 6. Совокупные массивы спектральных отношений, рассчитанные по спектрам Фурье (а) и спектрам реакции (б) на разных участках территории РСО-Алания и для землетрясений с разными t : точки и линии – индивидуальные и осредняющие оценки, соответственно; оси абсцисс – значения $\lg f$ в Гц, оси ординат – значения $\lg\varphi(f)$ и $\lg\psi(f)$, соответственно /

Fig. 6. Cumulative arrays of spectral ratios calculated from the Fourier spectra (a) and response spectra (b) in different parts of RNO–Alania and for earthquakes with different t : points and lines are individual and averaging estimates, respectively; the abscissa axes are the values of $\lg f$ in Hz, the ordinate axes are the values of $\lg\varphi(f)$ and $\lg\psi(f)$, respectively

Полученные данные по интегральным спектрам и спектральным характеристикам Фурье и реакции в целом корреспондируют с полученными ранее (см. [Чернов Ю. и др., 2022]) интегральными оценками макросейсмических интенсивностей (I) и приращений балльности (ΔI) в условиях «мягких» и «твердых» грунтов территории РСО-Алания. Так для средних по массивам значений $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, составляющие здесь также (как и в случае I и ΔI) наблюдается существенная изменчивость полученных оценок в зависимости от расположения точки наблюдения и значений t для расчетных землетрясений. В то же время имеются и некоторые отличия. Так вариабельность значений $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ в целом немного ниже и распределена по площади

и по повторяемости землетрясений несколько иначе, чем вариабельность значений ΔI . Так, например, вариабельность средних значений ΔI при $t=500$ лет существенно выше, чем при $t=1000-5000$ лет ($\sim 0,6$ балла *MSK* против $\sim 0,2$ балла, соответственно). В то же время значения $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ при $t=500$ лет ниже, чем при $t=1000-5000$ лет на 5–10%, тогда, как значения ΔI , наоборот выше. Принимая во внимание известные соотношения между уровнями спектров и макросейсмической интенсивностью сотрясений (см., например, [Atkinson, Sonley, 2000; Чернов Ю. и др., 2022]) можно видеть, что изменения значений $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ при изменении расположения расчетной точки, также несколько меньше, чем аналогичные изменения в величинах ΔI .

Обобщая вышеизложенное, можно констатировать, что осуществляемые в рамках PSHA вероятностные оценки спектров Фурье и спектров реакции также, как и рассмотренные на предыдущем этапе исследований оценки макросейсмических интенсивностей сотрясений, обладают существенной изменчивостью как таковой и вариабельностью по отношению друг к другу. При этом важно подчеркнуть, что определяющие эту изменчивость разные соотношения между спектрами колебаний «мягких» и «твердых» грунтов объективно вытекают из уникальности сочетаний в каждой расчетной точке не только физико-механических, геометрических и других свойств самих грунтовых комплексов, о чем подробно можно найти, например, в [Заалишвили, 2009; Штейнберг и др., 1993; Мельков и др., 2022; Cotton et al., 2006], но и соотношения различных характеристик зон ВОЗ, сейсмического режима и других параметров очаговой сейсмичности. Многочисленность этих сочетаний и невозможность полной их предсказуемости (что необходимо для детерминистских оценок), создают механизм случайности в данном сегменте интегральных оценок PSHA, что, кстати, принципиально отличает их от полудетерминистских (или полув вероятностных) «ситуационных» определений. В этих условиях статистические подходы (к которым относится и вероятностная технология настоящего исследования), представляются предпочтительными, а получаемые на их основе результаты обоснованными и адекватными.

Подводя итог данному этапу исследований, можно сказать, что, как и рассмотренные на предыдущих этапах соотношения интегральных (т.е. полученных посредством PSHA) макросейсмических интенсивностей сотрясений «мягких» и «твердых» грунтов, аналогичные соотношения между спектрами их колебаний так же подвержены значительной вариабельности, хотя и в несколько сглаженном виде и с рядом других отличий. При этом данная вариабельность обусловлена не только известным влиянием свойств самих грунтов, но и связана с особенностями окружающего сейсмогенерирующего пространства, которые при вероятностных оценках сейсмической опасности типа PSHA обычно учитываются в рамках общего сейсмического районирования (ОСР), детального сейсмического районирования (ДСР) и уточнения исходной сейсмичности (УИС) при сейсмическом микрорайонировании (СМР), то есть в отрыве от особенностей местных грунтовых условий. Местные же грунтовые условия учитываются путем последующего внесения в результаты ОСР, ДСР и УИС поправок (приращений балльности, спектральных отношений и др.), которые в свою очередь, не зависят от вероятностных оценок ОСР, ДСР и УИС. Эту расчетную схему мы называем «двухступенчатой». Но, как показывает опыт настоящего исследования, такой «двухступенчатый» подход может приводить к искажениям получаемых оценок. Так, например, рекомендуемые российскими нормативами стандартные спектральные ускорения для грунтов первой категории СНиП

по сейсмическим свойствам (группа «твердых» грунтов по нашей и [Чернов, 2022; Чернов Ю. и др., 2022] терминологии) в два раза ниже чем значения $SA(f)$, рекомендуемые для грунтов второй категории (т. е. для «мягких» грунтов). И это соотношение постоянно и не зависит от частоты спектральной составляющей, от места расположения расчетной точки (т.е. от окружающей сеймотектонической обстановки) и от того, для землетрясений, с какими периодами повторяемости производится данная оценка. Т.е., следуя данным рекомендациям, и взяв за основу полученную для данного места в результате ОСР, ДСР или УИС интегральную оценку спектра, например, «мягкого» грунта, при последующем переходе к «твердому» грунту, как видно из вышеизложенных материалов, мы рискуем получить существенную погрешность. Очевидно, также, что применение в такой «двухступенчатой» схеме более сложных и точных оценок реакции самой грунтовой толщи, с более подробным учетом ее особенностей (что обычно реализуется при проведении СМР) в принципе не меняет дела, так как и в этом случае за рамками остаются учет конкретного расположения расчетной точки на местности и величины t .

Поэтому, вслед за рекомендациями работ [Чернов, 2022; Чернов Ю. и др., 2022], высказанными относительно вероятностных оценок приращений балльности, здесь укажем на целесообразность применения «одноступенчатых» расчетных схем и при оценках спектров и спектральных характеристик разных типов грунтов. Под «одноступенчатыми» схемами понимаются оценки PSHA с одновременным и взаимовязанным учетом как влияния свойств грунтов, так и очаговых факторов.

Выводы

1. Полученные посредством PSHA оценки показывают, что интегральные (кумулятивные) спектры и спектральные характеристики колебаний «мягких» и «твердых» грунтов обладают существенной изменчивостью, что необходимо учитывать в исследовательских проектах и на практике.

2. Изменчивости кумулятивных спектров и спектральных характеристик Фурье и реакции в целом коррелируют с аналогичными изменчивостями макросейсмических интенсивностей и приращений балльности, но в деталях могут иметь отличия, что следует иметь в виду при, например, оценках спектров и спектральных характеристик по значениям балльности и наоборот.

3. Полученные в данном исследовании результаты и сделанные на их основе выводы пока относятся только к сеймотектоническим условиям территории РСО-Алания. В какой части и в какой степени они применимы и к другим районам предстоит выяснить в процессе дальнейших исследований.

Литература

1. Адылов С.К., Соколов В.Ю., Фремд В.М. и др. Сильные землетрясения Узбекистана в 1984-1985 гг. – М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1988. – 121 с.
2. Ванмарке Э.Х. Реакция сооружений на землетрясения. // В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981. – С. 256–299.
3. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: «Фан», 1986. – 368 с.
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. Исфара-Баткентское и Таваксайское землетрясения 1977 г. – Ташкент: «Фан», 1981. – 152 с.
8. Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Фидарова М.И., Мерзликин Т.И., Песраева З.В. Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 72–84. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006
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. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. – М.: Наука, 1974. – 97 с.
12. Соколов В.Ю. Спектры ускорений колебаний грунта при землетрясениях на Кавказе. // Физика Земли. – 1998. – №8. – С. 56–69.
13. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 г. – Ташкент: «Фан», 1971. – 672 с.
14. 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. 61–78. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004
15. Чернов Ю.К., Заалишвили В.Б., Чернов А.Ю. Некоторые новые данные о влиянии различных грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 85–100. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007
16. Шикотанское землетрясение 1994 г. Эпицентральные наблюдения и очаг землетрясения. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. // Информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. – М., 1995. – 136 с.
17. 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. 5–94.
18. Analysis of strong-motion accelerograms. Vol. I, part A-V. Vol. II, part A-V. Vol. III, part A-V. Vol. IV, part A-V, Index (EERS' Rep 76-P2). Earthquake Engineering Research Labor., California Inst. Technol. Pasadena, California, USA, 1969-1976.
19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. // BSSA. – 2000. – Vol. 90(2). – pp. 533-544.
20. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978a. – Vol. 13. No.5.
21. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978b. – Vol. 13. No.6.
22. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978c. – Vol. 13. No.7.
23. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978d. – Vol. 13. No.8.
24. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978e. – Vol. 13. No.9.
25. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. // University “Kirill and Mefodij”. – Skopje, 1984a. – No.1.
26. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. // University “Kirill and Mefodij”. – Skopje, 1984b. – No.2.
27. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. // University “Kirill and Mefodij”. – Skopje, 1984c. – No.3.
28. 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(1). – pp. 99–138.
29. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E.. Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations From Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. // U.S. Geological Survey Open – File Report. – 1994. – pp. 94-127.
30. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. // Journal of Seismology. – 2006. – Vol. 10. – pp. 137–156.

31. Porcella R.L., Matthiesen R.B., Maley R.P. Strong motion data records in the United States. Imperial Valley, California Earthquake of October 15, 1979. // Geological Survey Professional Paper 1254. Washington, 1982. – pp. 289-318.
32. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake. – Skopje, 1979. – No. №4. – 78 p.; No.67. – 184 p.
33. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. // Earthquake Notes. – 1986. – pp. 57-13
34. San-Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. – 1973. – 482p.
35. Strong-motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. – Vol. 1, Part 1-5, Commissions CHEM-ENEI, Italy, 1975–1979.
36. The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center for Earthquake Engineering Research. Edited by J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.
37. Toker B.E., Brune J.N. Seismograms, S-Wave Spectra, and source Parameters for Aftershocks of San Fernando, California, Earthquake. // San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. – 1973. – pp. 69-121.

References

1. Adylov S.K., Sokolov V.Yu., Fremd V.M. et al. Strong earthquakes in Uzbekistan in 1984–1985. Moscow. IPE AS USSR. 1988. 121 p. (In Russ.)
2. Vanmarke E.Kh. Building response to earthquakes. In: Seismic Risk and Engineering Solutions. Moscow. Nedra. 1981. pp. 256–299. (In Russ.)
3. Ghazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent, Fan. 1986. 368 p. (In Russ.)
4. Geodynamics of the tectonosphere in the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Volume VI. Problems of seismic hazard in the Far East region. Yuzhno-Sakhalinsk, 1997. 340 p. (In Russ.)
5. Dagestan earthquake on May 14 1970. Destructive consequences. Engineering seismology. Problems 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. Isfara-Batkent and Tavaksay earthquakes of 1977. Tashkent, Fan. 1981. 152 p. (In Russ.)
8. Melkov D.A., Gabaraev A.F., Fidarova M.I., Merzlikin T.I., Persaeva Z.V. Influence of nonlinear properties of the medium on the seismic effect of strong earthquakes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 72–84. (In Russ.). DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006.
9. Nazarbek earthquake on December 11, 1980. Tashkent, Fan. 1984. 145 p. (In Russ.)
10. Pap earthquake of 1984. Tashkent, Fan. 1986. 136 p. (In Russ.)
11. Rustanovich D.N. Vibrations of the Earth's surface in the epicentral zones of strong earthquakes. Moscow. Nauka, 1974. 97 p. (In Russ.)
12. Sokolov V.Yu. Spectra of accelerations of ground vibrations during earthquakes in the Caucasus. *Physics of the Solid Earth*. 1998. No. 8. pp. 56–69. (In Russ.)
13. Tashkent earthquake of April 26, 1966. Tashkent, Fan. 1971. 672 p. (In Russ.)
14. 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*. (In Russ.). 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 61–78. DOI: 10.46698/VNC. 2022.45.59.004.
15. Chernov Y.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Y. Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 85–100. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007.
16. Shikotan earthquake of 1994. Epicentral observations and earthquake source. Federal

System of Seismological Observations and Earthquake Prediction. Information and analytical bulletin. Special issue. Moscow. 1995. 136 p. (In Russ.)

17. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods for assessing seismic effects (handbook). Problems of engineering seismology. Issue 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5–94. (In Russ.)

18. Analysis of strong-motion accelerograms. v. I, part A-V, v. II, part A-V, v. III, part A-V, v. IV, part A-V, Index (EERS' Rep 76-P2), Earthquake Engineering Research Labor., California Inst. Technol. Pasadena, California, USA, pp. 1969–1976.

19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. BSSA. 2000. Vol. 90. No. 2. pp. 533–544.

20. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978a. Vol. 13. No.5.

21. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978b. Vol. 13. No.6.

22. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978c. Vol. 13. No.7.

23. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978d. Vol. 13. No.8.

24. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978e. Vol. 13. No.9.

25. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. University “Kirill and Mefodij”. Skopje, 1984a. No.1.

26. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. University “Kirill and Mefodij”. Skopje, 1984b.No.2.

27. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. University “Kirill and Mefodij”. Skopje, 1984c. No.3.

28. 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.

29. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. U.S. Geological Survey Open–File Report. 1994. pp. 94–127.

30. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. Journal of Seismology. 2006. Vol. 10. pp. 137–156.

31. Porcella R.L., Matthiesen R.B., Maley R.P. Strong motion data records in the United States. Imperial Valley, California Earthquake of October 15, 1979. Geological Survey Professional Paper 1254. Washington. 1982. pp. 289–318.

32. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake. Skopje. 1979. No. 4. 78 p. No.67. 184 p.

33. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. Earthquake Notes. 1986. pp. 57–13

34. 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.

35. Strong-motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. Vol. 1, Part 1-5, Commissions CHEM-ENEI, Italy, pp. 1975–1979.

36. The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center for Earthquake Engineering Research. Edited by J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.

37. Toker B.E., Brune J.N. Seismograms, S-Wave Spectra, and source Parameters for After-shocks of San Fernando, California, Earthquake. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. 1973. pp. 69–121.

УДК 552.3:550.4:550.42:550.93

DOI: [10.46698/VNC.2023.36.94.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.36.94.007)

Оригинальная статья

Типизация эпитермальных золото-серебряных
систем Большого КавказаА.И. Гусев 

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

Статья поступила: 12.04.2023, доработана: 17.05.2023, одобрена в печать: 24.05.2023

Резюме: Актуальность работы. На Большом Кавказе описаны различные месторождения и рудопроявления золотого оруденения, в том числе и эпитермального. Однако типизация золото-серебряного эпитермального оруденения с использованием физико-химических условий их формирования на современном уровне не проведена. **Целью исследования** является получение комплексной геолого-минералогической и физико-химической характеристики руд и их типизация на современном уровне. Объектом для исследований были выбраны эпитермальные месторождения и проявления золото-серебряного типа во всех тектонических зонах региона. Материалы, используемые в статье, получены автором в процессе проведения поисковых, поисково-оценочных, геолого-съёмочных (1:50000) и специализированных металлогенических исследований, проводимых с 1967 года на Большом Кавказе. В 2014-2018 годах собраны дополнительные материалы по эпитермальным системам: Радужной, Ковалевской, Кериги. **Методы исследования.** Методы изучения, кроме геологического и петрографического описания руд и окколорудных метасоматитов, включали получение количественных характеристик определения температур кристаллизации минералов, фугитивностей кислорода и серы, P_h и других термодинамических параметров оруденения. Фугитивности серы, кислорода и теллура получены из стандартных графиков соотношений физико-химических параметров. **Результаты исследования.** В результате комплексных исследований получены новые данные по типизации эпитермальных золото-серебряных систем различных тектонических юнитов Большого Кавказа. Магматизм, с которым связано оруденение, характеризуется повышенной щёлочностью и аномальными параметрами флюидного режима. Все золото-серебряные эпитермальные объекты отнесены к низкосернистому, промежуточно-сернистому и высокосернистому типам, отличающимися особенностями составов руд и окколорудных метасоматитов, температурами кристаллизации продуктивных стадий минерализации, окколорудных метасоматитов, величинами фугитивностей кислорода и серы, различным соотношением селенидов и теллуридов в рудах. Совмещение медно-молибден-золото-порфирового и эпитермального золото-серебряного оруденения в регионе представляет наибольшие перспективы. К числу таких районов относятся: потенциальное рудное поле Кериги, а также Танадон-Сонгутидон-Казбекский рудный район, где развиты периферические части порфировой системы, которая может сопровождаться и эпитермальной золото-серебряной минерализацией.

Ключевые слова: эпитермальные системы, золото, серебро, фугитивности серы и кислорода.

Для цитирования: Гусев А.И. Типизация эпитермальных золото-серебряных систем Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 82-94. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.94.007.

[DOI: 10.46698/VNC.2023.36.94.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.36.94.007)

Original paper

Typization of epithermal gold-silver systems of Greater Caucasus

A.I. Gusev 

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

Received: 12.04.2023, revised: 17.05.2023, accepted: 24.05.2023

Abstract: Relevance. The different deposits and manifestations of gold ore mineralization on the Greater Caucasus described and so an epithermal. Typization of gold-silver epithermal ore mineralization with using physic-chemical of conditions it forming on the modern level did not lead. **The aim of the study** is to receive complex geology-mineralogical and physic-chemical characteristic of ores and it typezation on the modern level. Objects of researching were choose an epithermal deposits and manifestations gold-silver types in all tectonic zones of region. Materials, using in paper, received by of author in process carrying out of prospecting, prospecting-estimation, geology-survey (1:50000) and special metallogenic researching that it conducted from 1967 year on the Greater Caucasus. The additional materials on epithermal systems of Raduzhnaya, Kovalevskaya, Kerigo collected in 2014-2018 years. **Methods.** Methods of study except of geological and petrographic of description of ores and metasomatic include receiving quantitative characteristic of determination of temperatures of crystallization minerals, fugacity oxygen, and sulfur, Ph and other thermodynamic parameters of ore mineralization. Fugacity oxygen, sulfur and tellurium received from standard plots of ratio physic-chemical parameters. **Results.** New data received on typezation of an epithermal gold-silver systems of different tectonic unites of Greater Caucasus in result of complex researching. Magmatism with that connected ore mineralization characterized by high alkali and anomaly parameters of fluid regime. All gold-silver epithermal objects carry to low sulfidation, intermediate sulfidation and high sulfidation types distinguishing of peculiarities content of ores and ore metasomatic changes, temperatures of crystallization productive stages of mineralization, metasomatic changes, quantify fugacity oxygen, sulfur, different ratio of selenides and tellurides in ores. Reconciling of copper-molybdenum-gold-porphyry and epithermal gold-silver ore mineralization in region present more perspective. The potential ore field Kerigo and Tanadon-Sangutidon-Kazbek ore district where it developed periphery sites of porphyry system that it may accompany and by epithermal gold-silver mineralization refer to such districts.

Keywords: epithermal systems, gold, silver, fugacity of sulfur and oxygen.

For citation: Gusev A.I. Typization of epithermal gold-silver systems of Greater Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 82-94. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.94.007.

Введение

Фундаментальной проблемой геологии рудных месторождений является прогноз и поиски новых геолого-промышленных типов месторождений благородных металлов. К ним относится и класс эпитермальных золото-серебряных месторождений, тесно ассоциирующих с вулканогенными разрезами и субвулканическими образованиями. Эпитермальное Ag-Au оруденение занимает значительный объ-

ём в добыче серебра и золота, составляя для золота более 17,5% (без месторождения Витватерсранд), для серебра более 6% мировой добычи [Hedenquist, 1996]. Большинство гигантских эпитермальных золото-серебряных месторождений локализуется в обстановках молодых вулканических дуг, таких как месторождение Янакоча в Южной Америке и месторождение Лихир в Папуа Новой Гвинее [Richards, 2013]. В схожих геодинамических обстановках золото-серебряные объекты мирового класса по запасам металлов обнаруживаются и в более древних образованиях [Гусев, 2019; Хулелидзе и др., 2016; Holley et al., 2017; Zhong et al., 2017].

В связи с рекомендациями Государственной геологической службы России, в условиях истощения минерально-сырьевой базы в известных золоторудных районах России, одной из важных задач, обеспечивающих устойчивое развитие золотодобывающей отрасли, является проведение геологоразведочных работ, ориентированных на выявление крупных месторождений с рядовыми и бедными рудами [Караганов, 2002], т.е. крупно-объемных месторождений, и на новых площадях. К числу таких районов следует отнести и Северный Кавказ, где имеются предпосылки выявления подобных золоторудных объектов.

В последнее время пристальное внимание геологов привлекают районы совмещения эпитермального золото-серебряного и медно-молибден-золото-порфирового оруденения с выделением комплексного порфирово-эпитермального медно-золото-серебряного семейства руд. Такие комплексные системы зональны и глубже эпитермального оруденения должно локализоваться порфировое и, возможно, скарновое. Совмещение порфирового и эпитермального Au-Ag оруденения отмечается в рудах Михеевского месторождения на Урале, Au-Ag месторождениях Роговик и Баимка на Северо-Востоке России, в Айлаошаньском рудном поясе на Северо-Западе Китая, Красноярского Au-Ag месторождения на Алтае [Гусев, 2019; Zhong et al., 2017]. Большой Кавказ в этом плане может стать регионом, где также могут совмещаться указанные типы оруденения, а это залог открытия очень крупных по запасам металлов месторождений.

Цель исследования. На основе комплексных геолого-минералогических и термодинамических параметров провести типизацию эпитермальных золото-серебряных систем Большого Кавказа.

Методы исследований

Микротермометрические исследования флюидных включений проводились с помощью криотермокамеры THMSG600 фирмы Linkam при температурах от -180 до $+300^{\circ}\text{C}$ в Аналитическом центре СО РАН г. Новосибирска. Изотопный состав серы, углерода и кислорода определён на масс-спектрометре МИ 1201В в Лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва).

Результаты работы и их обсуждение

Эпитермальное золото-серебряное оруденение распространено на Большом Кавказе в районах распространения ранне-среднеюрских вулканогенных разрезов

и субвулканических образований и имеют с ними пространственно-парагенетическую связь. Этот тип оруденения распространён в зонах Главного хребта Центрального Кавказа (Радужное месторождение), зоне Северо-Кавказского краевого массива в области Транскавказского трансформного поперечного поднятия (проявления Ковалёвское, Мара, Джедаркольское, Гитчезен), подзоне Бокового хребта Центрального Кавказа (проявления Кериго, Хаснат) (рис. 1).

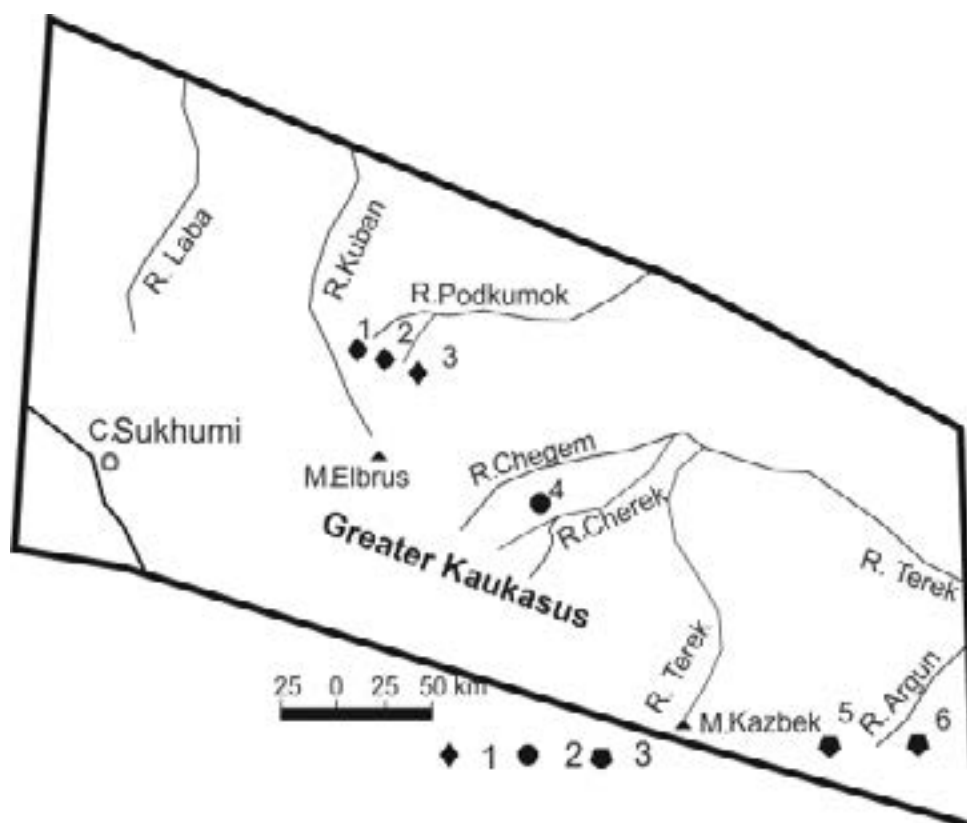


Рис. 1. Схема размещения типов эпитермального золото-серебряного оруденения Большого Кавказа

1 – низкосернистый тип (1 – Ковалевское, 2 – Мара, 3 – Гитчезен);
2 – промежуточно-сернистый тип (4 – Радужное); 3 – высокосернистый тип
(5 – Хаснат, 6 – Кериго) /

Fig. 1. Scheme of localization types epithermal gold-silver ore mineralization of Greater Caucasus:

1 – Low sulfidation type (1 – Kovalevskoe, 2 – Mara, 3 – Gitcheezen);
2 – intermediate sulfidation type
(4 – Raduzhnoe); 3 – high sulfidation type (5 – Khasnat, 6 – Kerigo)

Особенности вещественного состава руд и некоторых минералов, термодинамических параметров эпитермального золото-серебряного оруденения региона позволяют согласно современным представлениям [Гусев, 2019; John, 2001; Hedenquist et al., 1996; Sillitoe et al., 2003] отнести их к следующим типам: низкосернистым (Lowsulfidation) (Ковалёвское месторождение, проявление Мара), промежуточно-сернистым (Intermediatesulfidation) (Радужное месторождение, Лаурское проявление), высокосернистым (Highsulfidation) (проявления Кериго, Хаснат). По указан-

ным объектам приведены данные об их составе и физико-химическим условиям формирования (рис. 2).

Компоненты/Components	Месторождения/Deposits		
	Ковалёвское/ Kovalevskoe (LS)	Радужное/ Raduzhnoe (IS)	Кериге/ Kerigo (HS)
Кварц/Quartz	—	—	—
Кальцит/Calcite	—	—	—
Сидерит/Siderite	—	—	—
Пирит/Pyrrite	—	—	—
Арсенопирит/Arsenopyrite	—	—	—
Гематит/Gematite	—	—	—
Галенит/Galena	—	—	—
Сфалерит/Sphalerite	—	—	—
Халькопирит/Chalcopyrite	—	—	—
Теннантит/Tennantite	—	—	—
Тетраэдрит/Tetrahedrite	—	—	—
Энаргит/Enargite	—	—	—
Люзонит/Luzonite	—	—	—
Электрум/Electrum	—	—	—
Аргентит/Argentite	—	—	—
Гессит/Hessite	—	—	—
Тетрадимит/Tetrademite	—	—	—
Алтаит/Altaite	—	—	—
Адуляр/Adularia	—	—	—
Монтмориллонит/Montmorillonite	—	—	—
Каолинит/Kaolinite	—	—	—
Иллит/Illite	—	—	—
Алунит/Alunite	—	—	—
Сульфиды в %/Sulfides in %	1-3	7-10	11-16
Теллуриды и селениды/ Tellurides and selenides	Селениды/ Selenides	Селениды и теллуриды/Selenides and tellurides	Теллуриды/ Tellurides
FeS in ZnS in mol. %	2-3	6,5-7,5	9-10
log f_{O_2}	-36,1 - 37,3	-38 - -39	-39 - 40,5
Ph	7-8,2	6,8-7,5	4-5,5
PI sphalerite	207,6	207,1	206
log f_{S_2}	-9 - -10	-7 - -8,2	-6 - -3,8
Главные металлы/Basic metals	Pb, Zn ± Ag	Ag-Au, Zn, Pb, Cu	Au-Ag, Cu

Рис. 2. Сопоставление минерального состава и некоторых физико-химических параметров типов эпитермальных золото-серебряных систем Большого Кавказа: типы эпитермальных систем: LS – низкосернистый, IS – промежуточносернистый, HS – высокосернистый.

Красным цветом показаны главные минералы. PI – потенциал ионизации по [Жариков, 1967]; f – фугитивность компонентов /

Fig. 2. Comparison of mineral composition and some physic-chemical parameters of type an epithermal gold-silver systems of Greater Caucasus: Types of an epithermal systems:

LS – low sulfide, IS – intermediate sulfide, HS – high sulfide. Red colour show main minerals.

PI – potential of ionization after [Zharikov, 1967]; f – fugacity of components

Температуры гомогенизации первичных газово-жидких включений в кварце главной продуктивной стадии формирования золото-серебряного оруденения всех типов варьировали от 240 до 290°C (табл. 1). Анализ сопоставительных данных показывает, что типы эпитермального золото-серебряного оруденения различаются по многим параметрам.

Таблица 1 / Table 1

**Термобарогеохимические и изотопные данные исследований минералов
эпитермальных систем Большого Кавказа / Thermobarogeochemical
and isotopic data researching of minerals epithermal systems
of Greater Caucasus**

Месторождения и минералы / Deposits and minerals	n	T _{гом.} , °C / T _{hom.} , °C	Солёность, масс. %-экв. / Salinity, eq.wt.% NaCl	δ ³⁴ S, ‰	δ ¹³ C, ‰	δ ¹⁸ O, ‰ SMOW
Ковалевское / Kovalevskoe:						
кварц 2 / quartz 2	2	290-285	6,5-7,5	-		15,9-16,6
кварц 3 / quartz 3	2			-		
пирит 2 / pyrite 2	2	220-225	4,5-3,5	(-3,9)–(-2,7)		16,5-17,5
кальцит / calcite	2	-			(-5,1)–(-4,8)	
Радужное / Raduzhnoe:						
кварц 2 / quartz 2	2	280-265	7,0-7,8	-		15,0-15,8
кварц 3 / quartz 3	3	195-200	3, 8-4,0			17,5-18,1
пирит 2 / pyrite 2	3					-
кальцит / calcite	2			(-5,9)–(-2,5)	(-5,0)–(-4,9)	
Кериго / Kerigo:						
кварц 2 / quartz 2	2	255-260	5,5-4,8			15,5-16,5
кварц 3 / quartz 3	2	175-185	0,5-1,0			15,0-15,5
халькопирит / chalcopyrite	2			(-1,5)–(-5,5)		
кальцит / calcite	2				(-5,5)–(-5,9)	

Примечание: n – количество проб. / Note: n – quantitative of probes.

Низкосернистый тип эпитермального оруденения выявлен в области развития вулканитов маринского комплекса, характеризующийся повышенной щёлочностью. Наиболее изученным является Au-Ag проявление Ковалевское, которое расположено в верховьях р. Подкумок и приурочено к полосе развития флюидо-эксплозивных брекчий, аргиллизитов и пропилитов. Прогнозные ресурсы по категории P₁ составляют: Au – 10–15 т, Ag – 180 т. Здесь выявлены три рудные зоны мощностью 45–150 м, прослеженные по простиранию на 640–820 м и на глубину 200–250 м. Среднее содержание Au 4 г/т (максимально до 20 г/т), содержания серебра от 40 до 480 г/т [Газеев и др., 2013, 2022; Чотчаев и др., 2021]. Размер золотинок до 1–3 мм, редко 5–9 мм; пробность золота варьирует от 790 до 835‰. Низкосернистое месторождение Ковалёвское характеризуется присутствием индикаторной ассоциации минералов, и в первую очередь, наличием адуляра, а из рудных минералов – арсенопирита, и значительной ролью в рудах галенита и сфалерита. Специфической чертой Ковалёвского участка является наличие крустификационных текстур в кварце. Температура кристаллизации минералов продуктивной стадии в рудах

была наиболее высокой (290°C) из всех изученных эпitherмальных систем представляемого класса. Фугитивности кислорода для LS объектов были самые высокие, а серы – минимальные (рис. 3, 4).

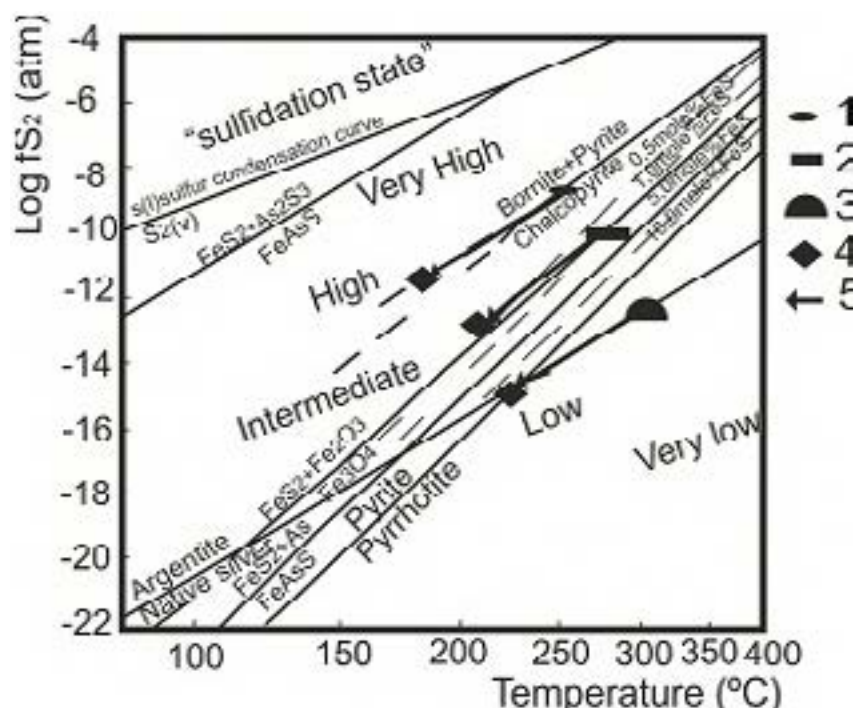


Рис. 3. Диаграмма $\text{Log } f\text{S}_2$ – температура для рудной минерализации эпitherмального золото-серебряного оруденения Большого Кавказа. Изоплеты FeS содержаний для сфалерита рассчитаны с использованием уравнений по [Scott et al., 1971]. Положение на диаграмме продуктивной второй стадии минерализации месторождений и проявлений, а также приблизительные оценки фугитивности серы и температурные условия для: 1 – Кериго, 2 – Радужное, 3 – Ковалевское; 4 – третья стадия всех типов эпitherмальных систем региона; 5 – направление снижения температур кристаллизации кварца и фугитивности серы от второй к третьей стадиям /

Fig. 3. Plot $\text{Log } f\text{S}_2$ vs. – temperature for ore mineralization for ore mineralization of epithermal gold-silver ore mineralization of Greater Caucasus. Isopleths of FeS content for sphalerite are calculated using the equations after [Scott et al., 1971]. Localization on plot of quick 2^d stage mineralization of deposits and manifestations and so approximate valuation of fugacity sulfur and temperature conditions for: 1 – Kerigo, 2 – Raduzhnoe, 3 – Kovalevskoe; 4 – third stage of all types epithermal systems of region; 5 – direction of decreasing temperature crystallization of quartz and fugacity of sulfur from second to third stages

Потенциал ионизации сфалерита является показателем кислотности – основности среды рудоотложения [Гусев, Табакаева, 2019] и, в силу, максимальных содержаний железа в сфалерите, обладал максимальной основностью и Ph среды. По соотношению в рудах селенидов и теллуридов низкосернистый тип характеризуется присутствием исключительно селенидов и по этому признаку может быть отнесен к селенистому типу (наличие селенидов: агуларита, науманнита в рудах в ассоциации с пруститом) [Choi et al., 2005].

стые, умеренносернистые и высокосернистые, как это и фиксируется для молодых островных дуг (Индонезия, Камчатка, Курилы).

На тесную пространственную связь всех эпипермальных золото-серебряных объектов Большого Кавказа с магматизмом повышенной щёлочности указывают соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода. Все трассеры указанных изотопов тяготеют к магматическому источнику.

Аналогичный результат получен и в отношении источника серы сульфидов в рудах эпипермальных систем. Значения тяжёлого изотопа серы локализуются в области магматического источника серы. Магматический источник имели не только показатели стабильных изотопов, но и благородных металлов.

Различия, указанные для каждого типа эпипермальных систем Большого Кавказа, вероятно, кроются в особенностях глубинных очагов и механизмах действия гидротермальных систем.

Для низкосернистых объектов (Ковалёвское) главным отличием являлись процессы вскипания разбавленных хлоридно-углекислых флюидов по мере их восхождения к поверхности на глубинах 1-2 км, где пересекается кривая кипения водных флюидов. При вскипании происходит потеря CO_2 , что вызывает увеличение pH, фугитивности кислорода и снижение фугитивности серы. В результате происходит сдвиг стабильности минерал-гидротермы в направлении кристаллизации адуляра (отмечаемого в ассоциации с золотом в прожилках) и отложение селенидов.

Высокосернистые системы (Кериго) характеризуются низкими pH, минимальными фугитивностями кислорода и максимальными фугитивностями серы и теллура, что приводит к сильному гидролитическому выщелачиванию с образованием ноздреватого кварца и флюидо-эксплозивных брекчий. Золото тесно ассоциирует с теллуридами, а также с высокосернистыми минералами – энаргитом, люцонитом, часто в парагенезисе с пиритом, теннантит-тетраэдритом, борнитом и халькозинном. Термодинамические условия высокосернистого типа приводили к смене выщелоченного кремнезёма и последующему отложению кварц-алунитовых и кварц-каолининовых ассоциаций.

Промежуточносернистый тип эпипермальных систем региона (Радужное месторождение), имея сходство и с низкосернистым и высокосернистым типами, обладает медианными термодинамическими параметрами между крайними членами и несёт переходные черты от ранней стадии высокосернистого типа к поздней стадии низкосернистого. По этой причине в рудах месторождения присутствуют алуляр, а также селениды и теллуриды. К нему применима модель термодиффузии в жидкой среде по [Hildreth, 1981; Monecke et al., 2017], объясняющая особенности флюидного режима рудогенерирующих трахириолит-порфиров хуламского комплекса и трансформацию его магматогенных флюидов в гидротермальные растворы с преобладанием таких летучих компонентов как HCl , B_2O_3 , H_2O , CO_2 и SO_2 , участвовавших в переносе металлов, в том числе Au и Ag. Модель термодиффузии помогает объяснить возникновение и флюидо-эксплозивных брекчий, присутствующих на месторождении, обильную баритизацию, адуляризацию и каолинизацию вмещающих пород.

Следует отметить, что Большой Кавказ не ограничивается перспективами эпипермального золото-серебряного оруденения юрского структурного этажа. Более молодое золото-серебряное оруденение может быть обнаружено в пределах Танадонского рудного узла, связанного с теплинским плиоцен-плейстоценовым магматическим комплексом. Именно в этой части Танадон-Сонгутидон-Казбекского рудного района развиты периферические части порфировой системы, благоприятной для локализации эпипермального золото-серебряного оруденения [Парада, 2021].

Выводы

Эпитермальные системы Большого Кавказа связаны с вулcano-плутоническими образованиями повышенной щёлочности, характеризовавшимися различными условиями формирования со специфическими параметрами флюидного режима, обеспечивавшими формирование всех ныне выделяемых типов: низкосернистых, умеренно-сернистых и высокосернистых. Для каждого типа эпитермальных золото-серебряных систем характерны свои специфические составы руд, околорудных метасоматитов. Термодинамические отличия каждого из выделенных типов весьма контрастны и могут быть использованы при дальнейшей оценке эпитермального золото-серебряного оруденения. Источник серы, углерода, кислорода и металлов был магматический. Весьма перспективными системами могут стать объекты со вмещения порфирового и эпипермального семейства руд.

Литература

1. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Борисовский С.Е. Золотоносность раннеюрских вулканитов активной окраины Скифской плиты. // В сб.: Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений. – М.: ИГЕМ РАН, 2013. – С. 20.
2. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А. Раннекиммерийские вулcano-плутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерогения. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Гусев А.И. Минеральный состав и физико-химические особенности эпитермального золото-серебряного Радужного месторождения (Большой Кавказ). // XI Международная научно-практическая конференция «Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы». – Пенза: Наука и Просвещение, 2018. – С. 43–47.
4. Гусев А.И. Тыдтугемская эпитермальная магмо-рудно-метасоматическая система юго-восточной части Горного Алтая. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – №3(39). – С. 85–93. DOI: 10.20403/2078-0575-2019-3-85-93
5. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов. // Геология рудных месторождений. – 1967. – №5. – С. 75–89.
6. Кайгородова Е.Н., Чугаев А.В., Лебедев В.А., Садасюк А.С., Гареев Б.И., Баталин Г.А. Аи-сульфидное месторождение Радужное (Северный Кавказ): геологическое строение, минералогические особенности и источники вещества. // Геология рудных месторождений. – 2022. – Т. 64. №5. – С. 423–450. DOI: 10.31857/S0016777022040037
7. Караганов В.В. Итоги работы государственной геологической службы за 2001 г. и приоритетные направления деятельности МПР России в развитии минерально-сырьевой базы России и ее континентального шельфа в 2002 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2002. – №1-2. – С. 4–11.
8. Парада С.Г. Перспективные типы месторождений и рудопроявлений золота Юга России. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №1. – С. 57–72.
9. Парада С.Г. Рудно-магматические системы медно-порфирового типа Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011
10. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
11. 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. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

12. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria. // *Economic Geology*. – 1988. – Vol. 83. No.2. – pp. 377–394.
13. Choi S.-G., Ryu I., Pak S.J. et al. Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. // *Ore Geology Reviews*. – 2005. – Vol. 26. – pp. 115–135.
14. John D.A. Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. // *Economic Geology*. – 2001. – Vol. 96. – pp. 1827–1893.
15. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. // *Resource Geology Special Publication Number 1*. –Tokyo, 1996. – 368 pp.
16. Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – Vol. 86. Iss. B11. – pp. 10153–10192.
17. Holley E.A., Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112(7). – pp. 1747–1771.
18. Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112(7). – pp. 1747–1771.
19. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective. – Adelaide: PGC Publishing, 2000. – 350 pp.
20. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective. – Adelaide: PGC Publishing, 2002. – 377 pp.
21. Richards J.P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. // *Nat. Geosci.* – 2013. – Vol. 6. – pp. 911–916.
22. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. // *Economic Geology*. – 1971. – Vol. 66. – pp. 653–669.
23. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. // *Society of Economic Geologists Special Publication*. – 2003. – Vol. 10. – pp. 1–29.
24. Zhong J., Chen Y.-J., Qi J.-P., Chen J., Li J. Geology, fluid inclusion and stable isotope study of the Yueyang Ag-Au-Cu deposit, Zijinshan ore field, Fujian Province, China. // *Ore geology reviews*. – 2017. – Vol. 86. – pp. 254–270.

References

1. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.J., Borisovskiy S.E. Gold content of the Early Jurassic volcanic rocks of the active margin of the Scythian Plate. In: *Ore-forming processes: from genetic concepts to the forecast and discovery of new ore provinces and deposits*. Moscow. IGEMRAN, 2013. p. 20. (In Russ.).
2. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Y., Kondrashov I.A. Early Cimmerian volcano-plutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in North Ossetia: geodynamic typification and minerageny. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 6–18. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Gusev A.I. Mineral composition and physico-chemical peculiarity of epithermal gold-silver Raduzhnoe deposit (Great Caucasus). XI International Scientific and Practical Conference “Breakthrough Scientific Research: Problems, Patterns, Prospects”. Penza. Nauka i Prosveshcheniye, 2018. pp. 43–47. (In Russ.)
4. Gusev A.I. The Tydtugem epithermal magma-ore-metasomatic system of the southeast of the Gorny Altai. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2019. No.3(39). pp. 85–93. (In Russ.) DOI: 10.20403/2078-0575-2019-3-85-93
5. Zharikov V.A. Acid-base characteristics of minerals. *Geology of ore deposits*. 1967. No.5. pp. 75–89. (In Russ.)

6. Kaygorodova E.N., Chugaev A.V., Lebedev V.A., Sadasjuk A.S., Gareev B.I., Batalin G.A. Au-sulfide deposit Raduzhnoye (Northern Caucasus): geological structure, mineralogical features and sources of matter. *Geology of Ore Deposits*. 2022. Vol. 64. No.5. pp. 423-450. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016777022040037
7. Karaganov V.V. Results of the work of the State Geological Service in 2001 and priority areas of activity of the Ministry of Natural Resources of Russia in the development of the mineral resource base of Russia and its continental shelf in 2002. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2002. No. 1-2. pp. 4-11. (In Russ.)
8. Parada S.G. Promising types of golden deposits and ore manifestations of Russian South. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No.1. pp. 57 – 72. (In Russ.)
9. Parada S.G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.3. pp. 129-147. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011
10. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)
11. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
12. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria. *Economic Geology*. 1988. Vol. 83. No.2. pp. 377–394.
13. Choi S.-G., Ryu I., Pak S.J. et al. Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geology Reviews*. 2005. Vol. 26. pp. 115-135.
14. John D.A. Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*. 2001. Vol. 96. pp. 1827-1893.
15. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Resource Geology Special Publication Number 1*. Tokyo, 1996. 368 pp.
16. Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1981. Vol. 86. Iss. B11. pp. 10153–10192.
17. Holley E.A., Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. *Economic Geology*. 2017. Vol. 112(7). pp. 1747-1771.
18. Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. *Economic Geology*. 2017. Vol. 112(7). pp. 1747-1771.
19. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective. Adelaide: PGC Publishing, 2000. 350 pp.
20. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide coppergold and related deposits: A global perspective. Adelaide: PGC Publishing, 2002. 377 pp.
21. Richards J.P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nat. Geosci.* 2013. Vol. 6. pp. 911–916.
22. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*. 1971. Vol. 66. pp. 653–669.
23. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Publication*. 2003. Vol. 10. pp. 1-29.
24. Zhong J., Chen Y.-J., Qi J.-P., Chen J., Li J. Geology, fluid inclusion and stable isotope study of the Yueyang Ag-Au-Cu deposit, Zijinshan ore field, Fujian Province, China. *Ore geology reviews*. 2017. Vol. 86. pp. 254-270.

УДК 553.061.4

[DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.84.41.008)

Оригинальная статья

Рудно-магматические системы Восточного Донбасса

С.Г. Парада^{ID}, К.Ю. Гамбург^{ID}

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344005, Ростов-на-Дону,
пр. Чехова, 41, e-mail: segripa@rambler.ru

Статья поступила: 13.04.2023, доработана: 16.05.2023, одобрена к публикации: 23.05.2023

Резюме: Статья посвящена решению одной из научных проблем металлогении Восточного Донбасса, определяющей связь рудных проявлений с магматизмом. **Актуальность исследования.** В практическом отношении и в научном плане Восточный Донбасс всегда изучался в основном как угленосный бассейн. Вместе с тем в пределах его открытой части были установлены рудопроявления цветных, редких и благородных металлов. В сравнении с Западным Донбассом в Восточном Донбассе обнаруживается активное проявление магматической деятельности и приуроченность к ней рудных минерализаций. В связи с этим возникает необходимость оценки рудного потенциала Восточного Донбасса на основе концепции рудно-магматических систем (РМС) с учетом современных представлений о геодинамических обстановках их формирования. **Цель исследования.** Выявить, обосновать выделение и осуществить типизацию РМС в пределах Восточного Донбасса на основе геологических и современных геофизических данных. **Методы.** Исходные данные представляют собой материалы по геологическому строению, магматизму и рудоносности Восточного Донбасса, содержащиеся в отчетах о геологической съемке и поисковых работах на цветные металлы и золото, а также базу цифровых данных современных геофизических среднemasштабных съемок, охватывающих Восточную часть Донецкого бассейна и прилегающие территории. Для решения задачи выявления РМС в Восточном Донбассе использован принцип объектно-ориентированной фильтрации. Фильтрация осуществлялась в ГИС ИНТЕГРО с разным шагом последовательно с ориентиром на имеющиеся пространственные данные о положении интрузивных пород, до тех пор, пока получаемые контуры аномалий не совпадут с проявлениями интрузивных пород с максимально возможной точностью. **Результаты исследования.** Впервые в Восточном Донбассе по геолого-геофизическим данным обосновано выделение РМС. Они подразделены на системы центрального и системы ареального типов. РМС центрального типа представлены скоплениями малых интрузий несветаевского андезит-дацитового интрузивного комплекса, расположенными внутри изометричных высокоградиентных положительных аномалий магнитного поля. Такие аномалии обусловлены наличием центров внутрикорового магматизма основного состава, расположенными выше изотермы Кюри. РМС ареального типа представлены скоплениями даек миусско-керчикского лампрофирового комплекса. Ареалы этих даек не находят отображения в магнитном поле, так как источники лампрофирового магматизма миусско-керчикского комплекса расположены ниже изотермы Кюри, предположительно в мантии.

Ключевые слова: рудно-магматическая система, интрузивный комплекс, рудопроявления, потенциальные поля, магнитные аномалии, очаги магматизма, Восточный Донбасс.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № гос. регистрации 122020100345-8.

Для цитирования: Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса. Геология и геофизика Юга России. 2023. 13(2): 95-105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008.

DOI: [10.46698/VNC.2023.84.41.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.84.41.008)

Original article

Ore-magmatic systems of Eastern Donbass

S.G. Parada^{id}, K.Y. Hamburg^{id}

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

Received: 13.04.2023, revised: 16.05.2023, accepted: 23.05.2023

Abstract: The article is devoted to solving one of the scientific problems of metallogeny of the Eastern Donbass, which determines the connection of ore manifestations with magmatism. **Relevance.** In practical terms and in scientific terms, the Eastern Donbass has always been studied mainly as a coal-bearing basin. At the same time, ore occurrences of non-ferrous, rare and precious metals were found within its open part. In comparison with the Western Donbass, an active manifestation of magmatic activity and the occurrence of ore mineralization are found in the Eastern Donbass. In this regard, there is a need to assess the ore potential of the Eastern Donbass on the basis of the concept of ore-magmatic systems (RMS), taking into account modern ideas about the geodynamic conditions of their formation. **Aim.** To identify, justify the allocation and typification of the RMS within the Eastern Donbass on the basis of geological and modern geophysical data. **Methods.** The initial data are materials on the geological structure, magmatism and ore content of the Eastern Donbass contained in reports on geological survey and prospecting for non-ferrous metals and gold, as well as a database of digital data of modern geophysical medium-scale surveys covering the Eastern part of the Donetsk basin and adjacent territories. The principle of object-oriented filtering was used to solve the problem of detecting RMS in the Eastern Donbass. Filtration was carried out in GIS INTEGRO with different steps sequentially with reference to the available spatial data on the position of intrusive rocks, until the obtained contours of anomalies coincide with the manifestations of intrusive rocks with the maximum possible accuracy. **Results.** For the first time in the Eastern Donbass, the allocation of RMS is justified according to geological and geophysical data. They are divided into systems of central and systems of areal types. RMS of the central type are represented by clusters of small intrusions of the Nesvetaevsky andesite-dacite intrusive complex located inside isometric high-gradient positive magnetic field anomalies. Such anomalies are caused by the presence of centers of intracore magmatism of the main composition located above the Curie isotherm. RMS of the areal type are represented by clusters of dikes of the Miusko-Kerchik lamprophyre complex. The areas of these dikes are not reflected in the magnetic field, since the sources of lamprophyric magmatism of the Miusko-Kerchik complex are located below the Curie isotherm, presumably in the mantle.

Keywords: ore-magmatic system, intrusive complex, ore occurrences, potential fields, magnetic anomalies, magmatism foci, Eastern Donbass.

Acknowledgements: The work was carried out as part of the implementation of the state task of the UNC RAS, state registration no. 122020100345-8.

For citation: Parada S.G., Hamburg K.Yu. Ore-magmatic Systems of Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 95-105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008.

Введение

В научном плане и в практическом отношении Восточный Донбасс всегда изучался в основном как угленосный бассейн. Вместе с тем в пределах его открытой части были установлены рудопроявления цветных, редких и благородных металлов

[Зеленщиков и др., 2001; Неваленный, 2005]. В сравнении с относительно хорошо изученным Западным Донбассом в Восточном Донбассе обнаруживается активное проявление магматической деятельности [Бутурлинов, 1984; Парада, 2014]. Современное состояние проблемы оценки рудоносности Восточного Донбасса сводится к устаревшим представлениям о геологической истории Восточного Донбасса, основанной на устаревших концепциях. Магматизм рассматривался как продукт тектоно-магматической активизации без анализа причин последней [Granovsky, 2018]. Соответствующим образом оценивался минерогенический потенциал.

Попытки оценить металлогенический потенциал Восточного Донбасса упираются в отсутствие научно обоснованных представлений о рудно-магматических системах, основанных на современных геодинамических концепциях, изложенных, например в [Ханчук, Иванов, 1999; Кузнецов и др., 2022; Ярмолук и др., 2023] и основанных на современных геофизических данных. Как это сделано, например в [Saintot et al., 2003; Заалишвили и др., 2015; Spichak, Goidina, 2017; Ступак и др., 2020; Керимов, 2022].

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью оценки рудного потенциала Восточного Донбасса на основе концепции рудно-магматических систем [Eirish, 2009; Zürcher et al., 2019], с учетом современных представлений о геодинамических обстановках их формирования [Гребенников, Ханчук, 2021; Лобковский и др., 2021]. Цель исследования состоит в выявлении, обосновании и типизации рудно-магматических систем (РМС) в пределах Восточного Донбасса на основе геологических и современных геофизических данных.

Материалы и методы исследования

Исходные материалы настоящего исследования представляют собой материалы по геологическому строению, магматизму и рудоносности Восточного Донбасса, содержащиеся в производственных отчетах о геологической съемке и поисковых работах на цветные металлы и золото, проведенных производственными геологическими организациями в последние пятьдесят лет, а также базу цифровых данных результатов современных геофизических среднемасштабных съемок, охватывающих Восточную часть Донецкого бассейна и прилегающие территории.

Наблюдаемые геофизические аномалии почти всегда являются результатом наложения физических аномалий от разных геологических объектов, в том числе и от расположенных на разных глубинах. Для потенциальных полей это может быть линейное сложение или суперпозиция. В результате наблюдаемое поле представляет собой сумму наложенных полей, обусловленных геологическими неоднородностями различных глубин и масштабов. При этом связи между потенциальными полями и геологическим строением либо ослабляются, либо усиливаются. Поэтому в геофизике применяются различные приемы разделения полей на составляющие. Полученные таким образом аномалии связаны с геологическими неоднородностями разной природы, возраста, состава, глубины залегания.

Для решения задачи выявления рудно-магматических систем в Восточном Донбассе нами использован принцип объектно-ориентированной фильтрации. Фильтрация осуществляется с разным шагом последовательно с ориентиром на имеющиеся пространственные данные о положении интрузивных пород, до тех пор, пока получаемые аномалии не совпадут со скоплением интрузивных пород с максимально возможной точностью.

Сами интрузивные породы выделены на основании данных, приведенных в производственных отчетах о геологической съемке и в отчетах о поисковых работах на рудные полезные ископаемые.

Результаты работы и их обсуждение

Все выявленные магматические тела приурочены к палеозойскому структурному этажу, прорывая, либо залегая субсогласно в виде штоков, даек и силлов. В структурном плане магматические образования приурочены к зонам влияния крупных тектонических нарушений глубинного заложения, таких как региональные Персияновский и Сулино-Константиновский разломы. Магматические породы разделены на два разновозрастных комплекса: несветаевский трахиандезит-андезитовый и миусско-керчикский лампрофировый [Лихачев, 1983].

Выходы магматических пород несветаевского комплекса тяготеют в основном к зоне Персияновского разлома и локализуются в его северном приподнятом крыле, в присводовой части Южной антиклинали, где они характеризуются узловым распределением. Максимальные количества интрузий несветаевского комплекса и наибольшие их размеры отмечается в юго-восточной части исследуемой территории. В северо-западном направлении количество и размеры интрузий уменьшаются. В единичных случаях дайки этого комплекса отмечаются в зоне Сулино-Константиновского разлома, вытянутого в запад-северо-западном направлении вдоль оси Главной антиклинали, где они имеют такое же северо-западное простирание.

Морфология интрузивных тел достаточно проста – это штоки, силлы и дайки. Силлы и дайки, как правило, ориентированы параллельно общему простиранию вмещающей толщи (на запад-северо-запад), но имеют более крутое падение (60–85°). Мощность даек и силлов достигает 75 м, а возможно и более. Протяженность (с учетом геофизических данных) – до 2–3 км.

Абсолютный возраст интрузивных пород 190–210 миллионов лет указывает на юрский возраст магматизма [Granovsky, 2018]. Интрузивные тела прорывают отложения верхнего карбона и объединены в ранне-среднеюрский несветаевский андезит-трахиандезитовый комплекс.

Петрографический состав интрузивов однообразен: в подавляющем большинстве случаев – это дациты, редко переходящие в андезидациты и риодациты. Иногда отмечаются андезиты, андезибазальты и трахибазальты. В изменении состава наблюдается четкая тенденция: если на востоке, в бассейне р. Несветай, установлены только кислые породы, то к западу, в верховьях р. Тузлов, среди редких представителей комплекса отмечаются только средние и основные разности.

С интрузивными породами несветаевского комплекса связаны различного типа метасоматиты, гидротермалиты и золотоносные минерализации Керчикского и Чернореченского рудопроявлений. Каменноугольные терригенные отложения в поле развития интрузивных тел интенсивно изменены и превращены в биотитовые роговики и кварцево-серицито-хлоритовые метасоматиты, известняки подвержены скарнированию, в пластах углей развиваются массивные пирит-пирротиновые образования с амфиболом и пироксеном. Сами андезиты и трахиандезиты в эндо-контактных зонах также подвержены окварцеванию, серитизации и каолинизации. Мощность ореолов метасоматических изменений пород в экзоконтактах интрузивных тел зависит от их размеров и крутизны контактов и достигает первых сотен метров.

К миусско-керчикскому комплексу отнесены магматические породы, сложенные лампрофирами среднего, основного и ультраосновного состава. Область их распространения значительно шире, чем интрузивных пород несветаевского комплекса. Интрузии миусско-керчикского комплекса обычно отмечаются в виде круто залегающих даек преимущественно северо-восточного простирания. Мощность их достигает 5–7 м, протяженность до 1 км. Возраст всех этих интрузивных образований по геологическим данным и результатам определения абсолютного возраста (162–166 миллионов лет) считается средне-позднеюрским [Зеленщиков и др., 2001].

Сближенные дайки объединяются в дайковые поля, преимущественно вытянутой формы, протягивающиеся цепочкой в запад-северо-западном направлении вдоль Персияновского и Сулино-Константиновского разломов и часто поперечно относительно Донбасских структур в северо-восточном направлении. В последнем случае они контролируются системами крутопадающих поперечных малоамплитудных разрывов. Вместе с тем, по отношению к разрывным нарушениям дайки ведут себя независимо, лишь изредка «залечивая» тектонические швы, амплитуды смещения по ним невелики.

Наибольшее их количество отмечается в западной части исследуемой территории Восточного Донбасса. Можно отметить, что эти дайки, также как и интрузии несветаевского комплекса, имеют тенденцию к узловому распределению, при этом образуют более обширные ареалы. Также эти дайки отмечаются в пределах узлов локализации интрузий несветаевского комплекса, где они, являясь более поздними, пересекают последние. Вместе с тем считается [Бутурлинов, 1984], что миусско-керчикский интрузивный комплекс является пострудным по отношению к золотому оруденению.

Количество и размеры ареалов даек миусско-керчикского комплекса увеличивается с юго-востока на северо-запад. То есть, в этом отношении их распределение имеет прямо противоположную тенденцию, чем распределение интрузий несветаевского комплекса.

В петрографическом составе даек преобладают мончикиты и камптониты, реже отмечаются спессартиты и керсантиты. Лампрофиры несут следы сильных гидротермально-метасоматических изменений, проявленных в хлоритизации и карбонатизации породообразующих минералов.

Рассмотрение магматических проявлений в масштабе Донецкого бассейна показывает, что они приурочены в основном к узлам сгущения малоамплитудных разрывов в слабо выраженных структурах, напоминающих зарождающиеся поперечные поднятия. Более выражена тенденция преимущественной локализации большинства проявлений интрузивного магматизма к южной части Восточного Донбасса, где они приурочены к северному крылу Персияновского разлома.

В этой части Донбасса в результате объектно ориентированной фильтрации аномального магнитного поля выделены изометричные положительные магнитные аномалии разного размера и различной интенсивности (рис. 1).

Магнитные аномалии, расположенные южнее Персияновского разлома в западной части изучаемого района могут быть обусловлены геологическими структурами Ростовского выступа Украинского кристаллического щита (РВ УКЩ). Проведенные нами процедуры дальнейших преобразований магнитного поля позволили частично погасить влияние структур РВ УКЩ на структуру магнитного поля Дон-

басса. Другие магнитные аномалии, расположенные южнее Персияновского разлома в центральной и восточной частях изучаемого района, могут быть связаны с очагами магматизма несветаевского комплекса. Однако территория их проявления скрыта под мощным чехлом мезозойско-кайнозойских отложений и недоступна для изучения.



Рис. 1. Локальные аномалии магнитного поля Восточного Донбасса и их номера:

1 – Шахтинская (43,5), 2 – Керчикская (33,2), 3 – Кондаковская (98,5), 4 – Южная (50,5), 5 – Приразломная (60,7), 6 – Юго-восточная (68,0), 7 – Правотузловская (57,3), 8 – Левотузловская (53,8). В скобках указаны максимальные значения интенсивности магнитного поля в центрах изометричных аномалий в нТл. Коричневым цветом показаны изолинии магнитного поля, интенсивность магнитного поля в нТл показана числами зеленого цвета /

Fig. 1. Local magnetic field anomalies of Eastern Donbass and their numbers:

1 – Shakhtinskaya (43.5), 2 – Kerchikskaya (33.2), 3 – Kondakovskaya (98.5), 4 – Yuzhnaya (50.5), 5 – Prirazlomnaya (60.7), 6 – Southeastern (68.0), 7 – Pravotuzlovskaya (57.3), 8 – Levotuzlovskaya (53.8). The maximum values of the magnetic field intensity in the centers of isometric anomalies in nT are indicated in parentheses. The isolines of the magnetic field are shown in brown, the intensity of the magnetic field in nT is shown by green numbers

Скопления штоков, даек и силлов магматических пород основного, среднего и умеренно-кислого состава, относящихся к несветаевскому комплексу располагаются в контурах изометричных аномалий магнитного поля.

Значительно реже в контурах этих аномалий отмечаются дайки миусско-керчикского комплекса. При этом, как правило, их распространение выходит за границы аномалий. Большинство же выявленных ареалов даек миусско-керчикского комплекса не обнаруживают связи с аномалиями магнитного поля.

Отчетливых гравитационных аномалий магматические тела как несветаевского, так и миусско-керчикского комплексов не образуют. Из этого следует, что сами тела не обладают плотностями, превышающими $2,7 \text{ г/см}^3$ (плотность пород герцинского этажа), а скорее всего, характеризуются средними плотностями несколько ниже этого значения, и, кроме того, непосредственно под ними не залегают более плотные массивы основного состава. Вместе с тем, они часто локализованы на участках пониженного остаточного гравитационного поля.

Некоторое количество даек и силлов магматических пород несветаевского комплекса пространственно приурочено к зоне Персияновского разлома и характеризуется близвертикальным залеганием, что еще раз подтверждает крутое положение самого разлома. Отдельная группа штоков, даек и силлов установлена в зоне предполагаемого секущего Кондаковского разлома, имеющего северо-восточное простирание. Однако, даже будучи пространственно приуроченными к зонам разломов предполагаемого северо-восточного простирания, сами дайки и силлы тем не менее характеризуются северо-западным простиранием, что говорит об общем северо-восточном направлении осей растягивающих напряжений в период внедрения магматических пород несветаевского комплекса и о сомнительности наличия поперечного Кондаковского разлома.

Таким образом, по отношению к изометричным аномалиям магнитного поля скопления интрузивных тел можно разделить на два типа. К первому типу нами отнесены скопления магматитов несветаевского комплекса, которые концентрируются в контурах интенсивных магнитных аномалий. Последние отражают глубинные аномалиеобразующие объекты. Исходя из опыта выделения Тырнаузской РМС на Северном Кавказе [Парада, 2022], такие объекты мы интерпретируем как центры (очаги) интрузивного магматизма, в данном случае несветаевского комплекса. Минимальная глубина от поверхности предполагаемых очагов определяется по геофизическим данным, в соответствии с которыми верхняя кромка аномалиеобразующих объектов располагается на глубинах не менее 5 км. Максимальная глубина определяется положением поверхности Кюри, ниже которой физические тела утрачивают магнитные свойства и, соответственно, не отображаются в магнитном поле. Глубину такой поверхности определяем, исходя из значения геотермического градиента, установленного для Восточного Донбасса 23°C и температуре точки Кюри для магнетита 580°C . В результате получаем положение поверхности Кюри 25 км.

Результаты расчета совпадают с полученными ранее данными [Гордиенко и др., 2015] о распределении температур в коре и верхних горизонтах мантии Донбасса вдоль профиля ГСЗ-ХІ (рис. 2).

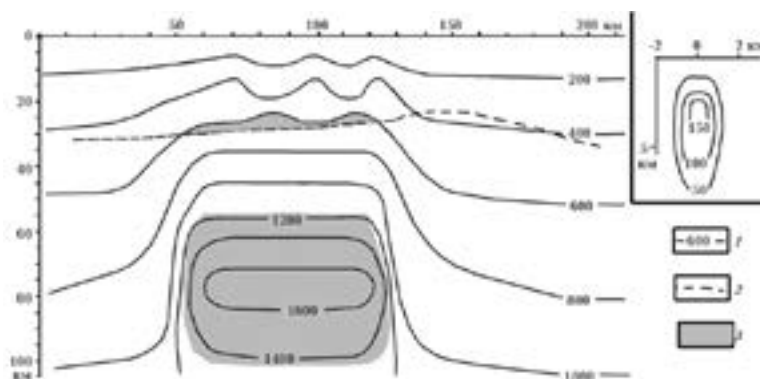


Рис. 2. Распределение температур в коре и верхних горизонтах мантии Донбасса вдоль профиля ГСЗ XI с юго-запада на северо-восток:

1 – изотермы, $^{\circ}\text{C}$, 2 – скоростная граница 6,8 км/с по данным с профилями ГСЗ-ХІ и D, 3 – зоны частичного плавления. На врезке – аномальные температуры, дополняющие модель, связанные с одним из вариантов конвекцией в проницаемой зоне Персияновского разлома /

Fig. 2. Temperature distribution in the crust and upper horizons of the Donbass mantle along the profile of GSZ XI from southwest to northeast:

1 – isotherms, $^{\circ}\text{C}$, 2 – speed limit of 6.8 km/s according to the data from the profiles GSZ-XI and D, 3 – zones of partial melting. The inset shows abnormal temperatures complementing the model associated with one of the variants of convection in the permeable zone of the Persianov fault

В соответствии с рисунком 2 глубина 25 км является верхней кромкой вторичного внутрикорового магматического очага, нижняя его граница располагается на глубинах 30–35 км.

Ареалы рассредоточенных даек миусско-керчикского комплекса не обнаруживают связи с аномалиями магнитного поля. Это значит, что по результатам магнитной съемки установить положение очагов магматизма миусско-керчикского комплекса не представляется возможным, что может быть связано с расположением центров лампрофирового магматизма ниже поверхности Кюри. Исходя из данного предположения и в соответствии с рис. 2 очаги лампрофировой магмы должны располагаться на глубине более 50 км в мантии, без образования промежуточных очагов в земной коре.

С обоими типами скоплений магматических пород пространственно связаны проявления рудных минерализаций гидротермального происхождения [Парада, 2014]. Следовательно, оба типа магматизма создают условия для формирования гидротермальных рудных минерализаций, то есть, представляют рудно-магматические системы (РМС).

В соответствии с установленными особенностями проявления интрузивного магматизма нами предлагается разделить выявленные рудно-магматические системы Восточного Донбасса на два типа (рис. 3): 1) РМС центрального типа, связанные с определенными по геофизическим данными центрами внутрикорового магматизма несветаевского комплекса; 2) РМС ареального типа, связанные с рассредоточенными скоплениями даек лампрофиров, не совпадающие с какими-либо аномалиями потенциальных полей, источники магмы которых располагаются ниже поверхности Кюри, скорее всего в мантии.

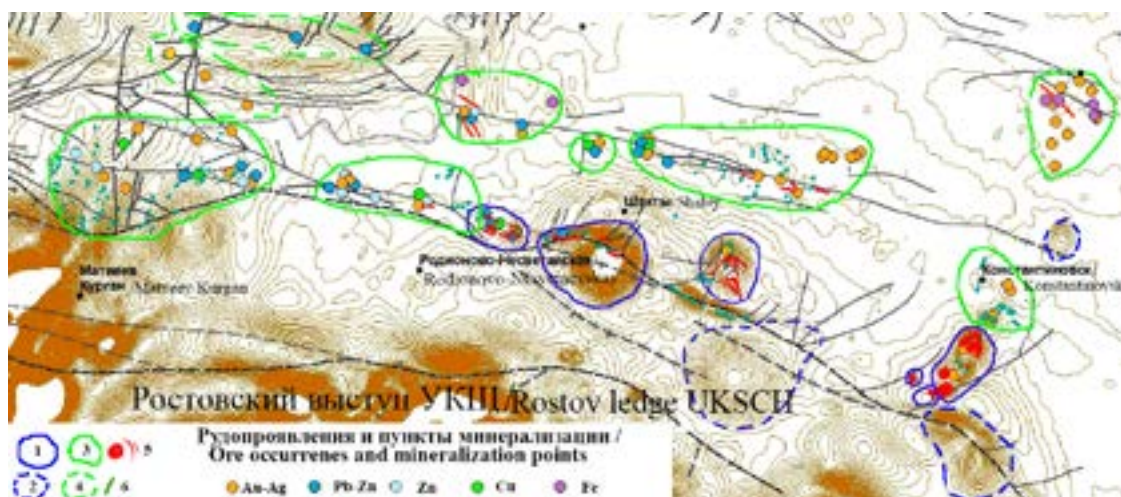


Рис. 3. Размещение рудно-магматических систем центрального (1, 2) и ареального (2, 3) типов относительно неоднородностей магнитного поля в Восточном Донбассе /

Fig. 3. Placement of ore-magmatic systems of central (1, 2) and areal (2, 3) types relative to magnetic field inhomogeneities in Eastern Donbass

Выводы

Впервые в Восточном Донбассе по геолого-геофизическим данным выделены рудно-магматические системы (РМС). Они подразделены на системы центрального и системы ареального типов. РМС центрального типа представлены скоплениями

малых интрузий несветаевского андезит-дацитового интрузивного комплекса, расположенными внутри изометричных высокоградиентных положительных аномалий магнитного поля. Такие аномалии обусловлены наличием центров внутрикорового магматизма основного состава, расположенных выше изотермы Кюри. РМС ареального типа представлены преимущественно дайками миусско-керчикского лампрофирового комплекса. Ареалы этих даек не находят отображения в магнитном поле, так как источники лампрофирового магматизма миусско-керчикского комплекса расположены ниже изотермы Кюри в мантии Земли.

Литература

1. Бутурлинов Н.В. Эволюция магматизма, минеральных ассоциаций и эндогенного рудообразования в Донецком бассейне. // Минералогия рудных месторождений Украины. – К.: Наукова думка, 1984. – С. 36–44.
2. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. Тепловое поле Донбасса. // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37. №6. – С. 3–23.
3. Гребенников А.В., Ханчук А.И. Геодинамика и магматизм трансформных окраин тихоокеанского типа: основные теоретические аспекты и дискриминантные диаграммы. // Тихоокеанская геология. – 2021. – Т. 40. №1. – С. 3–24. DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24
4. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О., Невский Л.Н., Ольховский Г.П., Тибилов С.М., Гогичев Р.Р. Оптимизация геофизических и геохимических критериев поисков месторождений известных рудных формаций горной части республики Северная Осетия-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – №3. – С. 28–62.
5. Зеленщиков Г.В., Курбанов Н.К., Кучеровский П.Г., Радаева Т.П. Перспективы золотоносности Припятско-Днепровско-Донецкого авлакогена. // Руды и металлы. – 2001. – №2. – С. 26–35.
6. Керимов И.А. Моделирование гравитационного поля систем разломов и зон трещиноватости. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 59–71. DOI: 10.46698/VNC.2022.44.93.005
7. Кузнецов М.В., Саватенков В.М., Шпакович Л.В., Ярмолюк В.В., Козловский А.М. Эволюция источников магматизма Восточно-Монгольской вулканической области: по данным геохимических и SR-ND-PB изотопных исследований. // Петрология. – 2022. – Т. 30. №5. – С. 457–479.
8. Лихачев В.А. Петрологические особенности магматических пород Восточного Донбасса в связи с вопросами его рудоносности. // В сб. «Геология и полезные ископаемые нижнего Дона». – 1983. – С. 13–17.
9. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д. Развитие модели верхнемантийной конвекции, сопряженной с зоной субдукции, с приложениями к мел-кайнозойской геодинамике Центрально-Восточной Азии и Арктики. // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т. 12. №3. – С. 455–470. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0533 EDN: ZLYENM
10. Невалённый Ю.В. Ресурсы металлических полезных ископаемых. // В кн.: Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. – Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2005. – С. 71–84.
11. Парада С.Г. Перспективные геолого-промышленные типы рудопроявлений золота в Ростовской области. // Вестник Южного научного центра РАН. – 2014. – Т. 10. №4. – С. 53–60.
12. Парада С.Г. Оценка потенциальной золотоносности Тырнаузского рудного узла на основе дистанционных геофизических данных (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 109–118. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.85.008
13. Ханчук А.И., Иванов В.В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и зо-

лотое оруденение Дальнего Востока России. // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. №11. – С. 1635–1645.

14. Ярмолюк В.В., Саватенков В.М., Козловский А.М., Ступак Ф.М., Кузнецов М.В., Шпакович Л.В. Условия формирования пород и источники магм позднекайнозойского Удоканского вулканического плато. // Петрология. – 2023. – Т. 31. №1. – С. 3–28.

15. Eirish L.V. Factors determining origination of gold ore systems in the Russian Far East. // *Geology of Ore Deposits*. – 2009. – Vol. 51. No.3. – pp. 223-232. DOI: 10.1134/S1075701509030040

16. Granovsky A. G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. // *Geotectonics*. – 2018. – Vol. 52. No.4. – pp. 485-498.

17. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia). // *Tectonophysics*. – 2003. – Vol. 373. – pp. 181-207.

18. Spichak V.V., Goidina A.G. A conceptual model of the copper-porphyry ore formation based on joint analysis of deep 3D geophysical models: Sorskoe complex (Russia) case study. // *Acta geophys.* – 2017. – No.7. – pp. 1133-1144. DOI: 10.1007/s11600-017-0100-2

19. Stupak F.M., Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A. Late Mesozoic volcanism in the Ust'-Kara basin (Eastern Transbaikalia) and its relationship with magmatism of the Great Xing'an and east Mongolian Volcanic Belts. // *Russian Geology and Geophysics*. – 2020. – Vol. 61. No.1. – pp. 14–25.

20. Zürcher L., Bookstrom A.A., Hammarstrom J.M., Mars J.C., Ludington S.D., Zientek M.L., Dunlap P., Wallis J.C. Tectono-magmatic evolution of porphyry belts in the Central Tethys region of Turkey, the Caucasus, Iran, Western Pakistan, and Southern Afghanistan. // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 111. – pp. 102849-102929. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.034

References

1. Buturlinov N.V. Evolution of magmatism, mineral associations and endogenous ore formation in the Donets Basin. *Mineralogy of ore deposits of Ukraine*. Kiev. Naukova Dumka, 1984. pp. 36–44. (In Russ.)

2. Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnyaya O.V. Thermal field of Donbass. *Geophysical journal*. 2015. Vol. 37. No. 6. pp. 3–23. (In Russ.)

3. Grebennikov A.V., Khanchuk A.I. Geodynamics and magmatism of Pacific-type transform margins: the main theoretical aspects and discriminant diagrams. *Pacific geology*. 2021. Vol. 40. No. 1. pp. 3–24. (In Russ.) DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24.

4. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Nevsky L.N., Olkhovsky G.P., Tibilov S.M., Gogichev R.R. Optimization of geophysical and geochemical criteria of the deposits' search of known ore formations of the mountain part of the Republic of North Ossetia-Alania. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2015. No. 3. pp. 28–62. (In Russ.)

5. Zelenshchikov G.V., Kurbanov N.K., Kucherevsky P.G., Radaeva T.P. Prospects for the gold potential of the Pripyat-Dnieper-Donets aulacogen. *Ores and metals*. 2001. No. 2. pp. 26–35. (In Russ.)

6. Kerimov I.A. Modeling the gravitational field fault systems and fracture zones. *Geologiya I Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.4. pp. 59–71. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.44.93.005

7. Kuznetsov M.V., Savatenkov V.M., Shpakovich L.V., Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M. The magmatic sources evolution of eastern mongolia volcanic area: evidence from geochemical and SR-ND-PB isotope data. *Petrology*. 2022. Vol. 30. No. 5. pp. 457–479. (In Russ.)

8. Likhachev V.A. Petrological features of igneous rocks of the Eastern Donbass in connection with the issues of its ore content. In: *Proc. Geology and Mineral Resources of the Lower Don*. 1983. pp. 13–17. (In Russ.)

9. Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M., Kotelkin V.D. Upper mantle convection related to sub-

duction zone and application of the model to investigate the Cretaceous-Cenozoic geodynamics of central East Asia and the Arctic. *Geodynamics and tectonophysics*. 2021. Vol. 12. No. 3. pp. 455–470. (In Russ.) DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0533.

10. Nevalenny Yu.V. Resources of metallic minerals. In: *Problems and prospects of the integrated development of the mineral resources of the Eastern Donbass*. Rostov-on-Don.SSC RAS, 2005. pp. 71–84. (In Russ.)

11. Parada S.G. Promising geological and industrial types of gold ore occurrences in the Rostov region. *Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Vol. 10. No. 4. pp. 53–60. (In Russ.)

12. Parada S.G. Assessment of the potential gold content of the Tyrnyauz ore node based on remote geophysical data (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 109–118. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.39.85.008.

13. Khanchuk A.I., Ivanov V.V. Meso-Cenozoic geodynamic settings and gold mineralization of Russian Far East. *Geology and geophysics*. 1999. Vol. 40. No. 11. pp. 1635–1645. (In Russ.)

14. Yarmolyuk V.V., Savatenkov V.M., Kozlovsky A.M., Stupak F.M., Kuznetsov M.V., Shpakovich L.V. Conditions of rock formation and magma sources of the late Cenozoic Udokan volcanic plateau. *Petrology*. 2023. Vol. 31. No. 1. pp. 3–28. (In Russ.)

15. Eirish L.V. Factors determining origination of gold ore systems in the Russian FarEast. *Geology of Ore Deposits*. 2009. Vol. 51. No.3. pp. 223–232. DOI: 10.1134/S1075701509030040.

16. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No.4. pp. 485-498.

17. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia). *Tectonophysics*. 2003. Vol. 373. pp. 181–207.

18. Spichak V.V., Goidina A.G. A conceptual model of the copper-porphyry ore formation based on joint analysis of deep 3D geophysical models: Sorskoe complex (Russia) case study. *Acta geophys.* 2017. No.7. pp. 1133–1144. DOI: 10.1007/s11600-017-0100-2.

19. Stupak F.M., Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A. Late Mesozoic volcanism in the Ust'-Kara basin (Eastern Transbaikalia) and its relationship with magmatism of the Great Xing'an and east Mongolian Volcanic Belts. *Russian Geology and Geophysics*. 2020. Vol. 61. No. 1. pp. 14–25.

20. Zürcher L., Bookstrom A.A., Hammarstrom J.M., Mars J.C., Ludington S.D., Zientek M.L., Dunlap P., Wallis J.C. Tectono-magmatic evolution of porphyry belts in the Central Tethys region of Turkey, the Caucasus, Iran, Western Pakistan, and Southern Afghanistan. *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 111. pp. 102849-102929. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.034

УДК: 552.578 (574.14)

DOI: [10.46698/VNC.2023.10.85.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.10.85.009)

Оригинальная статья

О сохранении поровых коллекторов в нижней части разреза нефтегазоносных отложений триаса Скифско-Туранской платформы

В.И. Попков , И.В. Попков 

Кубанский государственный университет, Россия, 350049, г. Краснодар, ул.
Ставропольская, 149, e-mail: geoskubsu@mail.ru

Статья поступила: 05.04.2023, доработана: 04.05.2023, одобрена к публикации: 12.05.2023

Резюме: Актуальность работы. Триасовые отложения Скифско-Туранской платформы, с которыми связаны основные перспективы открытия новых скоплений углеводородов, претерпели значительные постседиментационные преобразования. Их результатом явилась существенная утрата осадочными породами первичных емкостно-фильтрационных свойств. Современные коллекторы, содержащие скопления нефти и газа, имеют, как правило, эпигенетичный характер. В этой ситуации локализация залежей углеводородов контролируется участками развития вторичных коллекторов, а резервуары приобретают сложную морфологию. Однако, на отдельных площадях обнаружено сохранение первичной поровой емкости породами, залегающими в нижних горизонтах триасового разреза. Выяснение причин «консервации» первичного порового пространства в глубокопогруженных горизонтах триасового нефтегазоносного комплекса имеет не только научное, но и практическое значение. **Цель исследований.** Изучение литологического состава, условий образования терригенных пород триасовой продуктивной формации, выявление факторов, способствующих сохранению ими первичных емкостно-фильтрационных свойств на значительных глубинах. **Методы исследования.** Проведено макроописание кернов скважин, микроскопическое изучение шлифов. Для изучения емкостно-фильтрационных свойств пород проанализированы данные петрофизики, каротажные диаграммы. Выполнено литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция разрезов скважин с использованием данных всех видов каротажа, палеонтологических определений органических остатков. Детально исследованы особенности строения отдельных месторождений нефти и газа. **Результаты работы.** Установлено, что пласты-коллекторы, сохранившие первичные емкостно-фильтрационные свойства, приурочены к карбонатно-терригенной толще нижнего триаса. Такими свойствами обладают, прежде всего, аркозовые песчаники, являющиеся продуктом разрушения гранитоидных интрузий палеозойского фундамента. Выявлено неизвестное ранее крупное погребенное поднятие, являвшееся областью размыва в позднем палеозое-раннем триасе, на периферии которого накапливался грубообломочный материал. Полученные результаты могут быть использованы при изучении геологического строения других менее изученных районов молодой платформы.

Ключевые слова: литология, область размыва, осадконакопление, катагенез, коллекторы, пористость, проницаемость.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-27-00037.

Для цитирования: 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. 13(2): 106-117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009.

DOI: [10.46698/VNC.2023.10.85.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.10.85.009)

Original paper

On the preservation of pore reservoirs in the lower part of the section of oil and gas deposits of the Triassic Scythian-Turanian platform

V.I. Popkov^{id}, I.V. Popkov^{id}

Kuban State University, 149 Stavropol str., Krasnodar 350059, Russia,
e-mail: geoskubsu@mail.ru

Received: 05.04.2023, revised: 04.05.2023, accepted: 12.05.2023

Abstract: Relevance. The Triassic deposits of the Scythian-Turanian platform, which are associated with the main prospects for the discovery of new accumulations of hydrocarbons, have undergone significant post-sedimentation transformations. Their result was a significant loss of primary reservoir filtration properties by sedimentary rocks. Modern reservoirs containing accumulations of oil and gas are, as a rule, epigenetic in nature. In this situation, the localization of hydrocarbon deposits is controlled by the development sites of secondary reservoirs, and reservoirs acquire a complex morphology. However, in some areas, the preservation of the primary pore capacity by rocks lying in the lower horizons of the Triassic section was found. Finding out the reasons for the “conservation” of the primary pore space in the deep-submerged horizons of the Triassic oil and gas complex has not only scientific, but also practical significance. **Aim.** Study of the lithological composition, conditions of formation of terrigenous rocks of the Triassic productive formation, identification of factors contributing to the preservation of their primary reservoir-filtration properties at considerable depths. **Methods.** A macro description of the borehole cores, microscopic study of the sections was carried out. Petrophysics data and logging diagrams were analyzed to study the reservoir-filtration properties of rocks. Lithological and stratigraphic dissection and correlation of well sections were performed using data from all types of logging, paleontological definitions of organic residues. The structural features of individual oil and gas fields are studied in detail. **Results.** It has been established that reservoir layers that have retained their primary reservoir-filtration properties are confined to the carbonate-terrigenous thickness of the Lower Triassic. These properties are primarily possessed by arkose sandstones, which are the product of the destruction of granitoid intrusions of the Paleozoic basement. A previously unknown large buried uplift was revealed, which was an area of erosion in the Late Paleozoic – Early Triassic, on the periphery of which coarse-grained material accumulated. The results obtained can be used to study the geological structure of other less studied areas of the young platform.

Keywords: lithology, erosion area, sedimentation, catagenesis, reservoirs, porosity, permeability.

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. On the preservation of pore reservoirs in the lower part of the section of oil and gas deposits of the Triassic Scythian-Turanian platform. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(2): 106-117. DOI: 10.46698/VNC.2023.10.85.009.

Введение

Отложения платформенного чехла Скифско-Туранской платформы на протяжении многих лет служили основным объектом геологоразведочных работ на нефть и газ. По мере истощения фонда традиционных объектов поиска в мезозойско-кайнозойских плитных комплексах в семидесятых годах прошлого века в разведку были вовлечены подстилающие триасовые отложения, имеющие гораздо более сложное

строение. К настоящему времени в триасовых отложениях Скифско-Туранской платформы открыты десятки месторождений нефти и газа, прежде всего в пределах Восточного Предкавказья и Южного Мангышлака. Несмотря на достаточно высокую степень изученности, доюрские отложения продолжают оставаться одним из важнейших направлений поисково-разведочных работ в регионе [Вобликов и др., 1999; Хасанов и др., 2020; Харченко и др., 2022, Шарафутдинов и др., 1978].

Триасовые отложения погружены на глубины 4 и более километров, в ряде случаев подверглись существенным деформациям, стресс-метаморфизму и уплотнению. В такой обстановке в результате прогрессирующих катагенетических преобразований осадочные породы в значительной степени утрачивают первичные пористость и проницаемость. Их коллекторские свойства обусловлены, главным образом, вторичными преобразованиями [Коростышевский, 1979; Плотников и др., 1978; Hasanov et al., 2017; Jourdon et al., 2020; Nelepov et al., 2021; Ruchko, Kurgansky, 2015]. Латеральная флюидопроводимость порового пространства с глубиной постепенно переходит сначала в условия порово-трещинной, а затем фактически трещинной, что сопровождается формированием обстановок стагнационного (квазизастойного) режима водообмена [Borderie et al., 2019; Li et al., 2012; Lichtne, 1988; Lichtne et al., 1996; Jiang et al., 2011; Pang et al., 2020; Rachinsky, Kerimov, 2015]. В этих условиях локализация скоплений углеводородов в значительной мере контролируется участками развития вторичных коллекторов.

Это заключение убедительно подтверждается практикой поисково-разведочных работ как в Западном, Восточном Предкавказье, так и на Мангышлаке [Коростышевский, Кузнецов, 1979; Кузнецов и др., 1978; Хасанов, Эльжаев, 2010; Чепак и др., 1980]. Однако, на отдельных площадях наблюдается сохранение первичной поровой емкости в нижних горизонтах триасового разреза. Одним из таких примеров может служить информация, полученная при бурении на некоторых структурах Южно-Мангышлакской нефтегазоносной области. Считаем, что изложенные ниже данные могут быть актуальны и для других районов Скифско-Туранской платформы.

Методы исследований

Для решения поставленной задачи был произведен комплексный анализ геолого-геофизической информации по строению триасовых отложений Южно-Мангышлакской нефтегазоносной области. Проводилось макроописание кернов скважин, микроскопическое изучение шлифов. Для изучения емкостно-фильтрационных свойств пород проанализированы данные петрофизики, каротажные диаграммы. Произведены литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция разрезов скважин с использованием данных всех видов каротажа, палеонтологических определений органических остатков. Детально исследованы особенности строения отдельных месторождений нефти и газа. Критически рассмотрены материалы по подсчету запасов углеводородов триасовых месторождений. Основные полученные результаты следующие.

Результаты работы и их обсуждение

Южно-Мангышлакский нефтегазоносный осадочный бассейн располагается в западной части молодой Туранской плиты. Эпигерцинский складчатый фундамент осадочного бассейна сложен преимущественно первично осадочными породами,

испытывшими метаморфизм зеленосланцевых фаций и складчатость в конце карбона-ранней перми. В пределах выступов он прорван гранитоидами каменноугольного возраста. Вследствие значительных постседиментационных преобразований входящие в его состав породы полностью утратили свой первичный коллекторский потенциал. На площади Оймаша Песчаномысско-Ракушечной зоны поднятий открыто промышленное скопление нефти в гранитной интрузии.

Доюрский (доплитный) вулканогенно-осадочный комплекс в пределах рассматриваемой территории представлен лишь отложениями триаса, залегающими на разновозрастных породах палеозоя. Разрез триаса северного борта Южно-Мангышлакского платформенного прогиба начинается пестроцветными преимущественно континентальными отложениями нижнего триаса (нижний оленёк). В нижней его части залегает песчаниково-алевролитовая толща (вскрытая мощность 200 м), сменяемая вверх по разрезу алевролитно-аргиллитовой (мощность 250–1567 м) толщей.

В составе залегающей выше вулканогенно-карбонатной нефтегазоносной формации (рис. 1) выделяется четыре литологических толщи (снизу вверх): карбонатно-терригенная (мощность от нуля до 1043 м), вулканогенно-доломитовая (80–230 м), известняково-вулканогенная (50–107 м) и вулканогенно-известняковая (до 300 м). Возраст карбонатно-терригенной толщи уверенно определен как позднеоленинский, остальные толщи принадлежат к среднему триасу [Алексеева и др., 1991; Липатова, 1984].

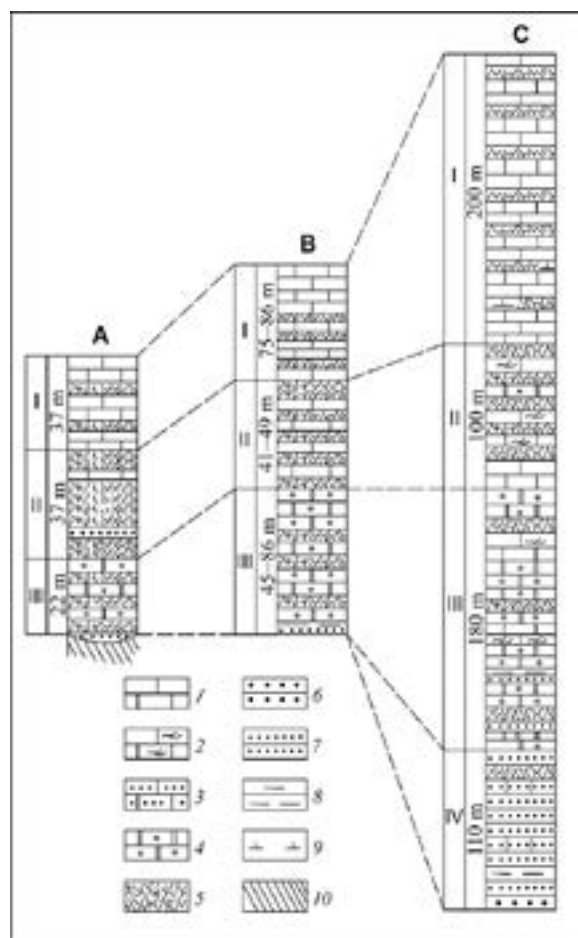


Рис. 1. Схема корреляции вулканогенно-карбонатной нефтегазоносной формации Южного Мангышлака.

Месторождения: А – Оймаша, В – Северо-Ракушечное, С – Южный Жетыбай. Литологические толщи: I – вулканогенно-известняковая, II – известняково-вулканогенная, III – вулканогенно-доломитовая, IV – карбонатно-терригенная.

Известняки: 1 – органогенно-детритовые и иламовые, 2 – обломочно-полидетритовые, 3 – песчанистые известняки и известковистые песчаники; 4 – оолитово-комковатые и оолитово-обломочные доломиты;

5 – туфы кристалло- и витрокластические, пепловые; 6 – гравелиты, грубозернистые песчаники; 7 – песчаники; 8 – аргиллиты; 9 – карбонизация; 10 – метаморфические и магматические породы фундамента /

Fig. 1. Correlation diagram of the volcanogenic-carbonate oil and gas bearing formation of the Southern Mangyshlak. Deposits: A – Oymasha, B – Severo-Rakushechnoye, C – Yuzhny Zhetybai. Lithological strata: I – volcanogenic-limestone, II – limestone-volcanogenic, III – volcanogenic-dolomitic,

IV – carbonate-terrigenous. Limestones: 1 – organogenic-detritus and sludge, 2 – clastic-polydetrite, 3 – sandy limestones and calcareous sandstones; 4 – oolitic-lumpy and oolitic-clastic dolomites; 5 – crystal and vitroclastic tuffs, ash; 6 – gravelites, coarse-grained sandstones; 7 – sandstones;

8 – mudstones; 9 – carbonation; 10 – metamorphic and igneous basement rocks

Завершается разрез среднего триаса северного борта Южно-Мангышлакского прогиба вулканогенно-аргиллитовой толщей (80–160 м), являющейся достаточно надежной региональной покрывкой.

В составе трансгрессивно налегающих отложений верхнего триаса выделяются три толщи (снизу вверх): туфогенно-терригенная (200–380 м), песчаниково-аргиллитовая (280–440 м) и аргиллито-песчаниковая (до 286 м). Наиболее важное значение в нефтегазоносном отношении играет песчано-гравелитовая пачка мощностью 20–70 м, залегающая в основании верхнетриасового разреза.

Несколько иное строение имеет разрез триасовых отложений в пределах Сегендыкской депрессии, Карагинской седловины и Песчаномыско-Ракушечной зоны сводовых поднятий. Здесь разрез обычно начинается пестроцветной алевролито-аргиллитовой толщей (0–204 м) нижнего триаса. В ее основании залегает пласт мощностью до 20–25 м, содержащий плохо окатанные обломки подстилающих магматических и метаморфических палеозойских пород, погруженных в красноцветную глинистую массу. На Оймашинской площади на породах фундамента залегает вулканогенно-доломитовая толща среднего триаса. Строение вышележащей части триасового разреза в литологическом отношении близко разрезу Жетыбай Узеньской ступени. Выделенные литологические толщи легко идентифицируются в разрезе. Главное отличие заключается в сокращении мощности всех толщ при изменении процентного соотношения осадочных и вулканогенных разностей в сторону увеличения туфогенной составляющей.

Лабораторные исследования керна показали, что в продуктивной вулканогенно-карбонатной толще триаса присутствуют трещинные, порово-трещинные и каверново-поровые типы коллекторов [Коростышевский, Кузнецов, 1979; Кузнецов и др., 1978; Чербянова и др., 1984]. Матрицей трещинных коллекторов являются участки породы, лишенные трещин. Проницаемость водонасыщенной матрицы имеет крайне низкие значения, не превышающие 0.01×10^{-3} мкм². Емкостью порово-трещинных коллекторов служат первичные и вторичные пустоты. Вторичные коллекторы приурочены к участкам наложенной доломитизации и имеют метасоматическую природу. Аналогичного происхождения и каверново-поровые коллекторы, связанные с кавернозными доломитами. За пределами контура нефтегазоносности залежей породы не затронуты процессами вторичных преобразований, а их пористость не превышает 3%.

Иная ситуация наблюдается в карбонатно-терригенной толще, залегающей в основании вулканогенно-карбонатной формации. Сложена она переслаивающимися песчаниками, алевролитами, аргиллитами и известняками, чередующимися с многочисленными прослоями туфов. Отсутствует в разрезе на юге и западе Жетыбай-Узеньской ступени, достигая максимальной мощности в северной ее части. Продуктивность карбонатно-терригенной толщи доказана в пределах Южно-Жетыбайско-Тенгинской антиклинальной зоны (месторождения Южный Жетыбай, Тасбулат и др.).

Как показали лабораторные исследования [Чербянова и др., 1984], коллекторскими свойствами в ее составе обладают, прежде всего, аркозовые песчаники мелко- и среднезернистые, реже крупнозернистые. Последние иногда визуальнo пористые.

Обломочный материал песчаников имеет среднюю сортировку при очень слабой степени окатанности. В его составе присутствуют кварц, кислые плагиоклазы,

калиевые полевые шпаты, зачастую измененные. Цемент типа соприкосновения, поровый, реже инкорпорационный, повсеместно пропитан желтым и коричневым битумоидом. Поры, наблюдаемые в шлифах, размером от 0,005–0,070 до 0,1 мм, в крупнозернистых песчаниках – до 0,6 мм. Поры неправильной формы, приурочены к стыку между зернами.

Для аркозовых песчаников характерно развитие вторичных аутигенных каемок кварца и альбита вокруг кластических компонентов. Толщина каемок от 0,005–0,035 мм до 0,05 мм. Окружает она обычно только часть зерна, снижая размеры первичных пор. Но при этом аутигенные каемки создают формирование жесткого каркаса, способствующего сохранению первичных пустот, препятствуя дальнейшему уплотнению зерен. Сообщаемость между порами осуществляется разнонаправленными микротрещинами с раскрытостью от 10 до 20 мкм. Трещинная емкость составляет не более 0,1 %, проницаемость – от 0,0001 до 0,013 мкм². Открытая (межзерновая) пористость аркозовых песчаников изменяется от 3 до 13 %, а поровая проницаемость от 0,0001 до 0,007 мкм². Очевидно, что основной емкостью пород является межзерновая пористость, а величина трещинной проницаемости по своим значениям близка к поровой проницаемости.

Присутствующие в составе карбонатно-терригенной толщи олигомиктовые и полимиктовые песчаники [Чербянова и др., 1984] отличаются от аркозовых плохой сортировкой обломочного материала, увеличением до 35% количества цемента (обычно гидрослюдистого, кварцевого), появлением обломков (до 15–30%) микрокварцитов, слюдистых кварцитов, кислых и средних эффузивов. В низах толщи в песчаниках фиксируется примесь грубообломочного известковистого органогенного и водорослевого детрита, встречаются обломки пелитоморфного доломита. Песчаники претерпели значительные катагенетические изменения, сопровождающиеся интенсивным аутигенным минералообразованием, формированием регенерационно-кварцевого цемента. Коллекторские свойства пород низкие, открытая пористость не превышает 4%.

К карбонатно-терригенной толще приурочены газоконденсатная залежь на Южно-Жетыбайском месторождении, нефтяная и газоконденсатная залежи – на Тасбулатском. Дебиты газа и конденсата в скважине №25 Южно-Жетыбайская достигали 560 тыс. м³/сут и 72 м³/сут, соответственно. На Тасбулатском месторождении в скважине №10 получены притоки нефти (121 м³/сут) и газа (156 тыс. м³/сут). В скважине №1 площади Каменистая дебит нефти из этой части разреза составил 16,8 м³/сут.

Изложенные выше материалы указывают на присутствие в разрезе триасовых отложений терригенных пород, сохранивших свою первичную пористость и проницаемость, содержащих промышленные скопления углеводородов. Литологический анализ показал, что такими свойствами обладают, прежде всего, аркозовые песчаники, являющиеся продуктом разрушения гранитоидных интрузий палеозойского фундамента. Значительный процент кварца в их составе, формирование аутигенных каемок кварца и альбита вокруг кластитов, образуют тот жесткий минеральный каркас, который создает благоприятные условия для сохранения первичных емкостно-фильтрационных свойств песчаников.

Низкая степень окатанности и сортировки обломочного материала аркозовых и полимиктовых песчаников, присутствие в их составе продуктов разрушения гранитоидов и метаморфических пород свидетельствует о близости его источника, где

на поверхность размыва выходили породы палеозойского фундамента. Можно с уверенностью предполагать, что по периметру раннетриасовой палеосуши могли сформироваться аналогичные по составу и генезису отложения. Учитывая доказанную продуктивность толщ, определение местоположения и границ области размыва представляет нефтегазопромысловый интерес.

Решению этой задачи может способствовать формационный анализ палеозойских отложений фундамента запада Туранской плиты, вскрытых глубокими скважинами. На основании проведенных нами исследований в составе складчатого основания платформы были выделены два структурно-формационных комплекса [Попков, Попков, 2019]: 1) нижний интенсивно дислоцированный досреднекаменноугольный (?) комплекс, породы которого испытали метаморфогенные преобразования, соответствующие зеленосланцевой стадии регионального метаморфизма, а также были прорваны гранитоидными интрузиями каменноугольного возраста; 2) верхний менее дислоцированный и метаморфизованный комплекс, отнесенный к нижней молассе.

Нижний палеозойский комплекс вскрыт бурением на площадях Песчаномыско-Ракушечной зоны поднятий, Сегендыкской депрессии, Карагинской седловины (рис. 2). Сложен он первично-терригенными, иногда карбонатно-терригенными отложениями, преобразованными в метаморфические сланцы хлорит-мусковитовой субфации зеленых сланцев регионального метаморфизма. В пределах выступов гранитоиды выведены эрозией непосредственно на поверхность фундамента (Оймаца, Бортовое, Жага и др.).

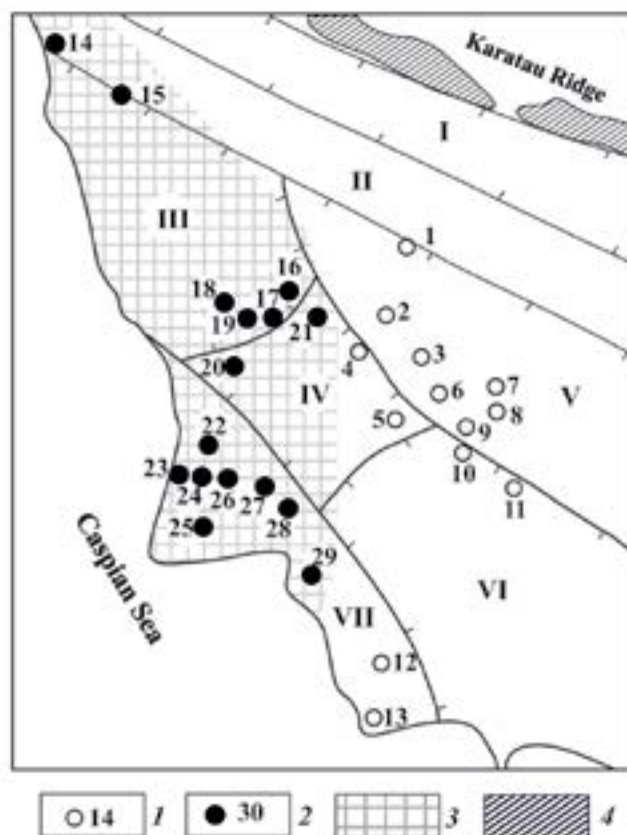


Рис. 2. Западная часть Южно-Мангышлакского прогиба. Местоположение позднепалеозойско-раннетриасового палеоподнятия. 1 – площади, на которых на поверхность фундамента выходят отложения верхнего структурно-формационного комплекса палеозоя: (14 – Сегенды, 15 – Саура-

Сегенды, 16 – Северное Карагие, 17 – Сартюбе, 18 – Атамбай, 19 – Алатюбе, 20 – Бортовое, 21 – Ащиагар, 22 – Жантанат, 23 – Жага, 24 – Оймаша, 25 – Ащисор, 26 – Северный Ащисор, 27 – Северный Ташкум, 28 – Ташкум, 29 – Жиланды). 2 – площади, на которых на поверхность фундамента выходят отложения нижнего структурно-формационного комплекса палеозоя (1 – Тортюбе, 2 – Северо-Западный Жетыбай, 3 – Западный Жетыбай, 4 – Тарлы-Куйжак, 5 – Кенестюбе, 6 – Придорожная, 7 – Жетыбай, 8 – Бектурлы, 9 – Южный Жетыбай, 10 – Саукудук, 11 – Баканд, 12 – Северо-Ракушечная, 13 – Ракушечномысская). 3 – позднепалеозойско-раннетриасовое палеоподнятия, 4 – выход на дневную поверхность пермотриаса. Тектонические элементы платформенного чехла: I – Чакырганский прогиб, II – Беке-Башкудукский вал, III – Сегендыкская депрессия, IV – Карагинская седловина, V – Жетыбай-Узенская ступень, VI – Жазгурлинская депрессия, VII – Песчаномыско-Ракушечная зона поднятий /

Fig. 2. The western part of the South Mangyshlak trough. Location of the Late Paleozoic-Early Triassic Paleopodion. 1 – areas where deposits of the upper Paleozoic structural-formation complex come to the surface of the foundation: (14 – Segends, 15 – Saura-Segends, 16 – Northern Karagie, 17 – Sartyube, 18 – Atambay, 19 – Alatube, 20 – Borovoye, 21 – Aschiagar, 22 – Zhantanat, 23 – Zhaga, 24 – Oymasha, 25 – Aschisor, 26 – Northern Aschisor, 27 – Northern Tashkent, 28 – Tashkent, 29 – Zhilandy). 2 – the areas where the sediments of the lower Paleozoic structural-formation complex come to the surface of the foundation (1 – Tortobe, 2 – Northwestern Zhetybai, 3 – Western Zhetybai, 4 – Tarly-Kuizhak, 5 – Kenestube, 6 – Roadside, 7 – Zhetybai, 8 – Bekturly, 9 – Yuzhny Zhetybai, 10 – Saukuduk, 11 – Bakand, 12 – Severo-Rakushechnaya, 13 – Rakushechnomysskaya). 3 – late Paleozoic-Early Triassic paleopodion, 4 – access to the daytime surface of the Permo-Triassic. Tectonic elements of the platform cover: I – Chakyrkan trough, II – Beke-Bashkuduksky shaft, III – Segendyk depression, IV – Karagiinskaya saddle, V – Zhetybai-Uzen stage, VI – the Zhazgurlinsky depression, VII – the Peschanomyssk-Rakushechnaya uplift zone

Более молодые отложения верхнего палеозоя вскрыты скважинами в западной и северо-западной частях Жетыбай-Узенской тектонической ступени, прилегающих к ней с юга районах Жазгурлинской депрессии и в юго-восточной части Песчаномыско-Ракушечной зоны поднятий (см. рис. 2). В разрезе ведущая роль принадлежит грубообломочному материалу грауваккового и граувакко-аркозового состава [Попков, Попков, 2019]. Литокластические граувакки под микроскопом имеют вид микробрекции, состоящей из щепковидных обломков серицит-хлоритовых, серицитовых и кварцево-сланцевых сланцев, кварцитов. Присутствуют зерна кварца остроугольной формы, полевых шпатов. Иногда наблюдаются обломки кремнистых пород, диабазов, криноидей. Все обломки погружены в тонкодисперсный агрегат глинисто-кварцевого состава (матрикс), достигающий 30–40% объема породы. Субаркозовые и аркозовые песчаники, как правило, крупнозернистые, временами с примесью гравийной фракции. Окатанность и сортировка обломков очень плохая. На максимальную мощность верхний комплекс палеозоя (781 м) вскрыт скважиной №25-П Жетыбай.

В районах отсутствия в разрезе отложений верхнего структурного яруса на более древних породах фундамента залегают с резко выраженным угловым и большим стратиграфическим несогласием разновозрастные отложения триаса. Пестроцветные континентальные отложения нижнего триаса, если они присутствуют в разрезе, уменьшаются в мощности до первых десятков метров. В их основании находится базальная пачка с грубообломочным материалом подстилающих магматических и метаморфических пород.

Таким образом, полученные материалы указывают на то, что на западе Южно-Мангышлакского прогиба существовало неизвестное ранее крупное погребенное поднятие, служившее источником обломочного материала в конце карбона – пер-

ми. Очевидно, что часть палеоподнятия продолжала оставаться областью размыва и в более позднее время, что привело к накоплению по ее периферии карбонатно-терригенной толщи, содержащей аркозовые, олигомиктовые и полимиктовые песчаники. Полное отсутствие на некоторых площадях (Оймаша, Жага, Жантанат) нижнетриасовых отложений указывает на то, что палеосуша в отдельных местах существовала вплоть до момента накопления среднетриасовой вулканогенно-доломитовой толщи. Примечательно, что эта территория испытывала более медленное погружение по сравнению со смежными районами на протяжении длительного времени – вплоть до олигоцена, во время которого была сформирована близкая к современной платформенная структура Южно-Мангышлакского прогиба [Дмитриев и др., 1979], в том числе наложенная на нее Сегендыкская депрессия.

Выводы

В составе триасовой вулканогенно-карбонатной нефтегазоносной формации Южно-Мангышлакского прогиба, в которой нефтегазовые коллекторы имеют вторичный (эпигенетичный) характер, присутствует карбонатно-терригенная толща, сохранившая первичные емкостно-фильтрационные свойства пород. Этому способствовало присутствие в ее составе пластов аркозовых песчаников. Жесткий минеральный каркас песчаников, обусловленный высоким процентным содержанием кварцевых зерен, а также спецификой аутигенных минералообразований, создали благоприятные условия для сохранения первичных пор.

К горизонтам аркозовых песчаников приурочены промышленные залежи углеводородов, что обусловило необходимость восстановления условий их образования и прогноза площадного распространения. Установлено, что в позднем палеозое – раннем триасе в западной части современного Южно-Мангышлакского прогиба существовало обширное палеоподнятие, являвшееся поставщиком обломочного материала, включая аркозы. Периферические районы древней суши, где происходило его накопление, заслуживают повышенное внимание при проведении геологоразведочных работ на нефть и газ.

Полученные материалы могут представлять интерес при определении условий формирования коллекторов и скоплений углеводородов в триасовых отложениях и в других районах Скифско-Туранской платформы.

Литература

1. Алексеева Л.В., Виноградова К.В., Цатурова А.А. Стратиграфическое расчленение триасовых отложений Южного Мангышлака. // Бюл. МОИП. Отд. геол. – 1991. – Т. 66. Вып. 4. – С. 37–43.
2. 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. // Теория и практика добычи, транспорта и переработки газоконденсата. – Сборник научных трудов. Выпуск 1. – Астрахань. – 1999. – С. 39–45.
3. Дмитриев Л.П., Паламарь В.П., Попков В.И., Рабинович А.А. История формирования структуры Южного Мангышлака. // Геология нефти и газа. – 1979. – №1. – С. 17–22.
4. Коростышевский М.Н. Особенности определения продуктивных объемов по залежам в триасовых отложениях на Южном Мангышлаке. // Разведка нефтяных месторождений Мангышлака. – Грозный: СевКавНИПИнефть, 1979. – С. 14–16.
5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Плотников М.С., Полосин Г.А., Бурлаков И.А. Петрофизические свойства карбонатных пород триаса и верхнего мела Ставрополя. // Оценка параметров карбонатных коллекторов и геометризация залежей нефти в различных геотектонических условиях на территории СССР. – Пермь, 1978. – С. 33–35.

9. Попков В.И., Попков И.В. Структурно-формационная характеристика верхнепалеозойских отложений запада Туранской плиты. // Геология, география и глобальная энергия. – 2019. – №4(75). – С. 9–17.

10. 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

11. Хасанов М.А., Эльжаев А.С. Особенности емкостно-фильтрационной характеристики нижне-триасового природного резервуара Восточного Предкавказья. // Вестник Академии наук Чеченской Республики. – 2010. – №1 (12). – С. 84–88.

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. Чепак Г.Н., Полосин Б.А., Плотников М.С. Коллекторские свойства пород триаса и верхнего мела Восточного Ставрополя. // Нефтегазовая геология и геофизика. – 1980. – №12. – С. 6–9.

14. Чербянова Л.Ф., Попков В.И., Проняков В.А. Литологические особенности и коллекторские свойства триасового вулканогенно-карбонатного комплекса Южного Мангышлака. // Геология нефти и газа. – 1984. – №11. – С. 55–59.

15. Шарафутдинов Ф.Г., Мирзоев Д.А., Гасанусейнов Г.Г. Геология и нефтегазоносность доюрских образований Восточного Предкавказья. // Институт геологии, Дагфилиал АН СССР. – 1978. – №2 (16). – 120 с.

16. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporitesfloored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. // Journal of Structural Geology. – 2019. – Vol. 123. – pp. 1–17.

17. 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 Conf. Series: Earth and Environmental Science, IPDME. – 2017. – №87. – pp. 052008.

18. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. // Tectonics. – 2020. – Vol. 39. – pp. 45–57. DOI:10.1029/2019TC005903 EDN: XEUTPL

19. Li S., Wang X., Suppe J. Compressional salt tectonics and syn-kinematic strata of the western Kuqa foreland basin, Southern Tian Shan, China. // Basin Research. – 2012. – №24. – pp. 475–497. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00531.x

20. Lichtner P.C. The quasi-stationary state approximation to coupled mass transport and fluid-rock interaction in a porous media. // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1988. – Vol. 52. – №56. – pp. 143–165.

21. Lichtner P.C., Steefel C.I., Oelkers E.H. Reactive transport in porous media. // *Rev. Mineral.* – 1996. – №34. – pp. 105–115.
22. 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/e3sconf/202124403020
23. Jiang X.W., Wang X.S., Wan L., Ge S. An analytical study on stagnant points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity. // *Water Resour. Res.* – 2011. – Vol. 47. – pp. 45–56. DOI: 10.1029/2010WR009346.
24. Pang X., Jia C., Zhang K., Li M., Wang Y., Peng J., Li B., Chen J. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction. // *Earth Syst. Sci.* – 2020. – No.12. – pp. 577–590. DOI: 10.5194/essd-12-577-2020.
25. Rachinsky M.Z., Kerimov V.Yu. Fluid dynamics of oil and gas reservoirs. – Washington. USA: Scrivener Publ. Wiley. – 2015. – 599 p.
26. Ruchko K., Kurgansky V.M. The results of interpretation the data of electric and pulsed neutron-neutron logging methods for the study of low-resistivity reservoirs, example is terrigenous sediments of the Dnieper-Donets basin. // *Conference Proceedings, 14th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, May 2015.* – pp. 1–5.

References

1. Alekseeva L.V., Vinogradova K.V., Tsaturova A.A. Stratigraphic dissection of Triassic deposits of Southern Mangyshlak. *Byul. MOIP.Ed. geol.* 1991. Vol. 66. Issue 4. pp. 37-43.
2. 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. Theory and practice of extraction, transportation and processing of gas condensate. Collection of scientific papers. Issue 1. Astrakhan. 1999. pp. 39-45.
3. Dmitriev L.P., Palamar V.P., Popkov V.I., Rabinovich A.A. The history of the formation of the structure of the Southern Mangyshlak. *Geology of oil and gas.* 1979. No.1. pp. 17-22.
4. Korostyshevsky M.N. Features of determining productive volumes by deposits in Triassic deposits in the Southern Mangyshlak. *Exploration of Mangyshlak oil fields. Grozny. Sevkavniptneft,* 1979. pp. 14-16.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Plotnikov M.S., Polosin G.A., Burlakov I.A. Petrophysical properties of carbonate rocks of the Triassic and Upper Cretaceous of Stavropol. Estimation of parameters of carbonate reservoirs and geometrization of oil deposits in various geotectonic conditions on the territory of the USSR. Perm. 1978. pp. 33-35.
9. Popkov V.I., Popkov I.V. Structural and formational characteristics of Upper Paleozoic deposits of the west of the Turan plate. *Geology, geography and global energy.* 2019. No.4(75). pp. 9-17.
10. 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 the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No.3. pp. 133-145. DOI: 10.46698/VNC. 2022.80.35.009

11. Khasanov M.A., Elzhaev A.S. Features of the reservoir filtration characteristics of the Lower Triassic natural reservoir of the Eastern Caucasus. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic*. 2010. No.1(12). pp. 84-88.

12. Khasanov M.A., Ezirbaev T.B., Elzhaev A.S. Spatial distribution of Permo-Triassic deposits of the Eastern Caucasus and their oil and gas potential. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2020. Vol. 10. No.2. pp. 113-126. DOI: 10.46698/VNC. 2020

13. Chepak G.N., Polosin B.A., Plotnikov M.S. Reservoir properties of Triassic and Upper Cretaceous rocks of Eastern Stavropol. *Oil and gas geology and Geophysics*. – 1980. – No.12. – pp. 6-9.

14. Cherbyanova L.F., Popkov V.I., Pronyakov V.A. Lithological features and reservoir properties of the Triassic volcanogenic-carbonate complex of Southern Mangyshlak. *Geology of oil and gas*. 1984. No.11. pp. 55-59.

15. Sharafutdinov F.G., Mirzoev D.A., Hasanuseynov G.G. *Geology and oil and gas industry of the Pre-Jurassic formations of the Eastern Caucasus*. Institute of Geology, Dagphillial of the USSR Academy of Sciences. 1978. No.2(16). 120 p.

16. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporitesfloored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 123. pp. 1–17.

17. 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 Conf. Series: Earth and Environmental Science, IPDME*. 2017. No.87. pp. 052008.

18. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903. EDN: XEUTPL

19. Li S., Wang X., Suppe J. Compressional salt tectonics and syn-kinematic strata of the western Kuqa foreland basin, Southern Tian Shan, China. *Basin Research*. 2012. No.24. pp. 475–497. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00531.x

20. Lichtner P.C. The quasi-stationary state approximation to coupled mass transport and fluid-rock interaction in a porous media. *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1988. Vol.52. No.56. pp. 143–165.

21. Lichtner P.C., Steefel C.I., Oelkers E.H. Reactive transport in porous media. *Rev. Mineral*. 1996. No.34. pp. 105–115.

22. 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/e3sconf/202124403020

23. Jiang X. W., Wang X. S., Wan L, Ge S. An analytical study on stagnant points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity. *Water Resour. Res.* – 2011. Vol.47. pp. 45–56. DOI: 10.1029/2010WR009346.

24. Pang X., Jia C., Zhang K., Li M., Wang Y., Peng J., Li B., Chen J. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction. *Earth Syst. Sci.* 2020. No.12. pp. 577–590. DOI: 10.5194/essd-12-577-2020.

25. Rachinsky M.Z., Kerimov V.Yu. *Fluid dynamics of oil and gas reservoirs*. Washington. USA. Scrivener Publ. Wiley, 2015. 599 p.

26. Ruchko K., Kurgansky V.M. The results of interpretation the data of electric and pulsed neutron-neutron logging methods for the study of low-resistivity reservoirs, example is terrigenous sediments of the Dnieper-Donets basin. *Conference Proceedings, 14th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, May 2015. pp. 1–5.

УДК 551.583, 504.062.2

DOI: [10.46698/VNC.2023.54.85.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.54.85.010)

Оригинальная статья

Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа

Н.А. Яицкая¹, Л.М. Дзагания², В.С. Бригада^{1, 2}

¹Субтропический научный центр Российской академии наук, Россия, 354002, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 2/28, e-mail: yaitskayan@mail.ru;

²Российский университет дружбы народов, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, e-mail: 1z011@inbox.ru

Статья поступила: 19.04.2023, доработана: 17.05.2023, принята к публикации: 24.05.2023

Резюме: Актуальность работы. Несовершенство правового и организационного характера, а также мер по предупреждению и предотвращению опасных воздействий приводит к ежегодным проявлениям оползневых и селевых процессов в субтропической зоне Кавказа (Черноморском побережье Краснодарского края). Повышение качества прогнозирования региональных климатических изменений позволит разработать пути снижения опасностей для общества и экономики России. Необходимость выявления баланса интересов общества и бизнеса является одним из путей обеспечения экологической устойчивости государства. При этом одним из передовых научных направлений в данной области является встраивание элементов экономики замкнутого цикла («circular economy») в стратегию развития регионов рекреационно-туристской специализации. В связи с этим данная работа направлена на решение проблемы смягчения последствий глобальных климатических изменений в Субтропической зоне Кавказа. **Цель исследований** – выявление возможностей развития геоэкологических опасностей в условиях климатических изменений при обеспечении устойчивого развития территорий Субтропической зоны Кавказа. **Методика исследований** заключалась в обобщении данных из открытых источников о климатических параметрах субтропической зоны Кавказа, анализе пространственных закономерностей, сухого и влажного климата с использованием детерминированных методов пространственной интерполяции рассеянных данных, а также использовании ПО «gnuplot» для графического отображения трехмерных моделей. **Результатами исследования** стало установление температурного режима атмосферного воздуха и количества осадков за 11-тилетний и 3-хлетние периоды (2011–2022 гг.), который показывают, что в субтропической зоне происходило повышение среднегодовой температуры в среднем на +0,6°C/год, повышение суммы годового количества осадков в среднем на +24 мм/год. Выявлены особенности характеров взаимосвязей 11-тилетних и 3-хлетних временных рядов («стабильный», «циклический», «аномально циклический»). Наиболее интенсивный рост суммы осадков происходил на побережье Черного моря (до +39 мм/год в Сочи) в областях и влажного, и сухого климата.

Ключевые слова: изменения климата, пространственная интерполяция, трехмерные задачи геоэкологии, математическое моделирование, временные ряды данных.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СНЦ РАН FGRW-2021-0015, № госрегистрации 122032300363-3 (Яицкая Н.А., методология трехмерного моделирования климатических данных и общее руководство ходом исследований; Бригада В.С., подготовка и валидация рассеянных данных, графическая визуализация полученных результатов).

Для цитирования: Яицкая Н.А., Дзагания Л.М., Бригада В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 118–132. DOI: [10.46698/VNC.2023.54.85.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.54.85.010).

DOI: [10.46698/VNC.2023.54.85.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.54.85.010)

Original paper

Geoecological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone

N.A. Yaitskaya¹, L.M. Dzaganii², V.S. Brigida^{1, 2}

¹Subtropical Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabriciusa, Sochi
354002, Russian Federation, e-mail: yaitskayan@mail.ru

²RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation,
e-mail: 1z011@inbox.ru

Received: 19.04.2023, revised: 17.05.2023, accepted: 24.05.2023

Abstract: Relevance. The imperfection of legal and organizational regulation, as well as actions to predict and prevent hazardous impacts, leads to annual manifestations of landslide and mudflow processes in Caucasus subtropical zone (the Black Sea coast of Krasnodar Territory). Improving the quality of forecasting regional climate change will make it possible to reduce develop ways the dangers for society and the Russian economy. The need to identify a balance between the interests of society and business is one of ways to ensure the state environmental sustainability. At the same time, one of advanced scientific directions in this area is integration of circular economy elements into the regions development strategy of recreation and tourism specialization. In this regard, this work aims at problem solving of mitigating the consequences of global climate change in the Caucasus subtropical zone. **The Aim** of the study is identification of opportunities for geoecological hazards development in the context of climate change while ensuring the sustainable development of subtropical zone territories of Caucasus. **The methods** consisted in a consisted in summarizing data from open sources on the climatic parameters of Caucasus subtropical zone, analyzing spatial patterns, dry and humid climate using deterministic methods of scattered data spatial interpolation (R. Renka), as well as using the “gnuplot” software for graphical display of three-dimensional models. **Results** was the establishment of atmospheric air temperature regime and the amount of precipitation for 11-year and 3-year periods (2011-2022) show that in subtropical zone there was an increase in average annual temperature by an average of 0.6°C/year, an increase the sum of annual precipitation on average by 24 mm/year. Features of relationships nature between 11-year and 3-year time series (“stable”, “cyclical”, “abnormally cyclical”) are revealed. The most intensive increase in amount of precipitation occurred on Black Sea coast (up to 39 mm/year in Sochi) in areas of both humid and dry climates.

Keywords: climate change, spatial interpolation, three-dimensional problems of geoecology, mathematical modeling, data time series.

Acknowledgments: the study was funded by the state assignment research of FRC SSC RAS FGRW-2021-0015, project no. 122032300363-3 (Yaitskaya N.A., methodology of three-dimensional modeling by climate data and research general management; Brigida V., preparation and scattered data validation, graphical visualization of results).

For citation: Yaitskaya N.A., Dzaganii L.M., Brigida V.S. Geoecological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(2): 118-132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.

Введение

Глобальные климатические изменения на планете Земля приводят к росту интенсивности проявлений опасных геоэкологических процессов [Shutaleva et al.,

2022]. Меняются режимы температуры атмосферного воздуха, почв, водных объектов, абсолютные значения интенсивности осадков, циркуляция турбулентных слоев атмосферы и другие климатические параметры. Степень трансформации исследуемых процессов воздействует на перенос крупномасштабных атмосферных вихрей, обуславливая увеличение частоты и мощности опасных гидрометеорологических явлений. Это, наряду с деградацией почв и растительного покрова активизирует экзогенные опасные процессы (оползни, обвалы, осыпи, русловую эрозию, сели, лавины [Чотчаев и др., 2021; Kalantari et al., 2023; Акопян и др., 2023]). Совокупные проявления опасных геоэкологических процессов обуславливают так называемые «мультиопасные ситуации», которые усиливают вероятность наступления техногенных аварий и катастроф [Сурков 2013]. Сложно выявить взаимосвязи климатических факторов с некоторыми опасными эндогенными процессами (землетрясения [Pkhovelishvili et al., 2023], последствия добычи природных ресурсов [Хулелидзе и др., 2016; Yu et al., 2023]), но в то же время их совместное воздействие на окружающую среду приводит к более тяжелым последствиям [Батхиев, 2008]. Отдельные сложности создает фактор антропогенного влияния при добыче георесурсов, их обогащения и переработки [Kongar-Syuryun et al., 2023; Al-Shawabkeh et al., 2022; Li et al., 2022]. Отвалы способствуют появлению в почвах кислотных флюидов, что ускоряет эрозионные процессы и создает угрозу биоценозам [Baker et al., 2022; Vergnano et al., 2022]. По данным исследования [Арефьева, Крапухин 2022], за период 2014-2020 гг., Краснодарский край был лидером регионов России по количеству крупномасштабных чрезвычайных ситуаций. В то же время субтропическая зона Кавказа является перспективной курортной, рекреационной и туристской территорией с мягким климатом и богатым биоразнообразием. Наводнения, обвально-оползневые, и прорывные сели с гибелью людей и материальным ущербом в субтропической зоне Кавказа происходят ежегодно. Это свидетельствует о недостаточности мер по предупреждению и предотвращению опасных воздействий, а также мероприятий инженерной защиты при осуществлении хозяйственной и рекреационной деятельности [Стогний и др. 2021]. Прогнозирование региональных изменений климата, анализ природных и техногенных катастроф и аварий прошлых лет позволят разработать пути снижения опасностей для общества экономики и России.

Важность поиска баланса интересов общества, бизнеса, а также сохранения ресурсообеспеченности в глобальном масштабе порождает необходимость обеспечения экологической устойчивости государства [Zhanbayev et al., 2022]. Обеспечение устойчивого развития одна из самых важных проблем, которая предполагает существенные преобразования в обществе, потреблении ресурсов, энергетике (энергетический переход), а также переход к экономике замкнутого цикла (когда ресурсы циркулируют без «конца жизненного цикла») [Xu, Yan, 2021; Wang et al., 2021]. Использование элементов «circular economy» для достижения устойчивости социально-экономических систем является перспективным и быстроразвивающимся направлением исследований [Marinina et al., 2022; Singh et al., 2022; Khan et al., 2022]. Данные факты подтверждают актуальность проблемы смягчения последствий глобальных климатических изменений при обеспечении устойчивого развития территорий Субтропической зоны Кавказа.

Моделирование рассеянных данных для выявления общих закономерностей исследуемых процессов применяется в различных областях знаний [Chiampono et al.,

2023; Rakishev et al., 2022; Magkoev et al., 2022]. При геостатистических методах обработки данных чаще всего используется ГИС технологии, в которых реализован и чаще других применяется метод крикинга [Скрипчинский и др., 2022; Липилин, Евтушенко, 2022; Xu et al., 2022]. Довольно перспективными являются реализация в ГИС алгоритмов машинного обучения (например, обучение без учителя «scikit-learn» с использования нейросетей или «глубокого обучения») [Yang et al., 2023; Horry et al., 2023; Naveen et al., 2022]. Для большинства областей знаний характерен переход от детерминированных методов трехмерной интерполяции к методам машинного обучения с представлением топографии поверхности отклика в трехмерном виде [Trzepieciński, Najm, 2022; Sirjani et al., 2022]. Основным недостатком данного подхода является то, что данные алгоритмы при малом периоде временного ряда генерируют большую величину абсолютных ошибок. Поэтому часть исследователей продолжают использовать двумерные регрессионные модели [Mottahedi et al., 2021; Zhang et al., 2023]. Для некоторых случаев, довольно представительно сочетать аналитические расчеты с численными методами (конечных элементов) [Zhao et al., 2023; Shahbazi et al., 2022] или совершенствовать отдельные аналитические приемы (например, при повышении надежности прогнозирования краткосрочных временных рядов) [Залишвили и др., 2022]. Относительно мало используется пока метод «системной динамики» (для имитации динамических изменений различных классов переменных факторов) [Zhong et al., 2022], а также вариации Аллана для анализа стохастических процессов [Кубрин и др., 2022]. К основным их недостаткам стоит отметить их малую апробированность.

Для «подгонки» функции, заданной в неявном виде, эффективно применяют фильтр Савицкого-Голея (который применим только при наличии большого количества точек данных и избыточен при их недостатке) [Massaoudi et al., 2020]. При графическом отображении моделей используют, как цветную трехмерную визуализацию [Zaalishvili et al., 2023; Bosikov et al., 2023] или ее проекции на двумерные плоскости [Khosravifardshirazi et al., 2022], так и ни в чем ей не уступающие черно белые 3D модели [Golik et al., 2020; Джиеова, 2022]. Из приведённого анализа следует, что вопросы совершенствования пространственно-временного моделирования природных процессов нуждаются в совершенствовании. *Целью данной работы* является выявление возможностей развития геоэкологических опасностей в условиях климатических изменений при обеспечении устойчивого развития территорий Субтропической зоны Кавказа. Для ее достижения решались следующие задачи: выявление пространственных особенностей климатических изменений в субтропической зоне Кавказа; совершенствование методологии пространственно-временного моделирования микроклиматических особенностей в различном масштабе временных рядов.

Методы исследования

Объектом исследования являются климат и природные комплексы субтропической зоны Кавказа, занимающей южные предгорья Большого Кавказа, а также, низменности и низкогорья Закавказья. Границы объекта исследования соответствует границам субтропической зоны в пределах Кавказа. В горной местности они зависят от высотной поясности, орографии и экспозиции склонов. Следует понимать, что в условиях глобальных климатических изменений границы субтропической зоны, а также высотное положение субтропического пояса также могут изменяться.

Горная система Кавказ занимает перешеек между Черным и Каспийским морями. Она расположена от $38^{\circ}25' - 47^{\circ}15'$ с. ш. до $36^{\circ}37' - 50^{\circ}22'$ в. д. В Закавказье выделяют влажно-субтропическую зону (Черноморское побережье, Колхидская низменность, Ленкоранская низменность, и зону сухих субтропиков (от Анапы до Туапсе, Куринская низменность, Западное побережье Каспийского моря, река Аракс и Ереванская котловина) [Gura et al., 2023]. Для решения поставленных задач применялся комплексный метод исследования, заключающийся в обобщении данных из открытых источников о климатических параметрах субтропической зоны Кавказа, анализе пространственных закономерностей, сухого и влажного климата; использования детерминированных методов пространственной интерполяции рассеянных данных для графического отображения моделей поверхности отклика исследуемых процессов. Критерием достоверности трехмерных моделей был выбран коэффициент детерминации (R^2).

Результаты работы и их обсуждение

Пространственные особенности климатических изменений в субтропической зоне Кавказа. Горная система Кавказа является естественной границей поясов умеренного и субтропического климата. Количественные значения климатических параметров за период 2011–2022 гг. представлены в таблице 1 и рисунке 1. Как следует из таблицы 1 и рисунка 1, в исследуемой зоне температуры воздуха в пунктах наблюдений за последние 11 лет (2011–2022 гг.) составляли по поясу от $+13,7$ до $+16,0^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура ($+16,0^{\circ}\text{C}$) наблюдалась в условиях влажного климата в Кутаиси (Колхидская область).

Таблица 1 / Table 1

**Параметры температуры воздуха и количества осадков^{1,2} /
Parameters of atmospheric air temperature and precipitation**

S	Станция / Station	Показатели среднегодовой температуры воздуха / Indicators average annual air temperature, °C			Показатели количества осадков за год, мм / Rainfall indicators for the year, mm			Среднегодовые значения температуры воздуха (°C) за период (t) / Average annual air temperature (°C) for the period (t)				
		Средняя за год / Average per year	Тренд за период, °C / trend during the period, °C	Тренд за 1 год, °C / 1 year trend, °C	Средняя за год / Average per year	Тренд за период, °C / trend during the period, °C	Тренд за 1 год, °C / 1 year trend, °C	2011 – 2022	2020 – 2022	2017 – 2019	2014 – 2016	2011 – 2013
	t							1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Зона влажного субтропического климата / Humid subtropical climate zone												
1	Туапсе / Tuapse	15,2	0,6	0,1	1312	656	60	15,2	15,3	15,7	15,3	14,7
2	Сочи / Sochi	14,9	1,1	0,1	1285	719	72	15,2	15,2	15,6	14,7	14,5
3	Кутаиси / Kutaisi	16,0	0,0	0,0	1299	111	10	15,9	15,8	16,4	16,0	15,3
4	Ленкорань / Lankaran	15,7	0,4	0,0	1602	264	24	15,4	15,5	15,7	15,2	15,2

¹ Интернет-ресурс <https://rp5.ru/> Copyright © ООО «Расписание Погоды», 2004-2023/

² Разуваев В.Н., Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Клещенко Л.К., Кузнецова В.Н., Трофименко Л.Т., Шерстюков А.Б., Швець Н.В., Давлетшин С.Г., Зверева Г.Н. Научно-прикладной справочник «Климат России». Свидетельство о государственной регистрации № 2020621470 от 18 августа 2020 г. Объем: 4,3 Мб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Зона сухого субтропического климата / Dry subtropical climate zone												
1	Анапа / Anapa	13,7	0,3	0,0	613	396	36	13,8	14,0	14,1	13,7	13,2
2	Новороссийск / Novorossiysk	14,2	0,6	0,1	663	485	44	14,4	14,9	14,0	15,3	13,2
3	Геленджик / Gelendzhik	14,5	1,8	0,2	570	318	29	14,6	15,0	15,4	14,3	13,6
4	Тбилиси / Tbilisi	14,4	1,0	0,1	392	218	20	14,4	14,6	14,9	14,3	13,6
5	Ыгдыр / Ygdyr	15,7	0,4	0,0	232	-65	-8	16,4	15,5	16,7	16,9	15,6
6	Махачкала / Makhachkala	13,7	-0,3	0,0	408	89	8	13,7	13,8	13,3	14,1	13,9
7	Дербент / Derbent	14,5	0,5	0,1	397	145	13	14,5	14,8	14,8	14,3	14,0
8	Баку / Baku	15,6	0,9	0,1	487	-281	-26	15,7	16,1	15,9	15,3	15,4

Максимальная температура ($+16,0^{\circ}\text{C}$) наблюдалась в условиях влажного климата в Кутаиси (Колхидская область). Минимальные температуры наблюдались на северной границе субтропического пояса Кавказа в условиях сухого климата в Анапе ($+13,7^{\circ}\text{C}$) на Черноморском побережье ($44^{\circ} 54' \text{ с. ш.}$) и в Махачкале ($+13,7^{\circ}\text{C}$) на Каспийском побережье, $42^{\circ} 58' \text{ с. ш.}$). В субтропической зоне наблюдался преимущественно рост среднегодовой температуры в среднем на $+0,1^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Максимальный рост среднегодовой температуры ежегодно на $0,2^{\circ}\text{C}$ наблюдался в Геленджике.

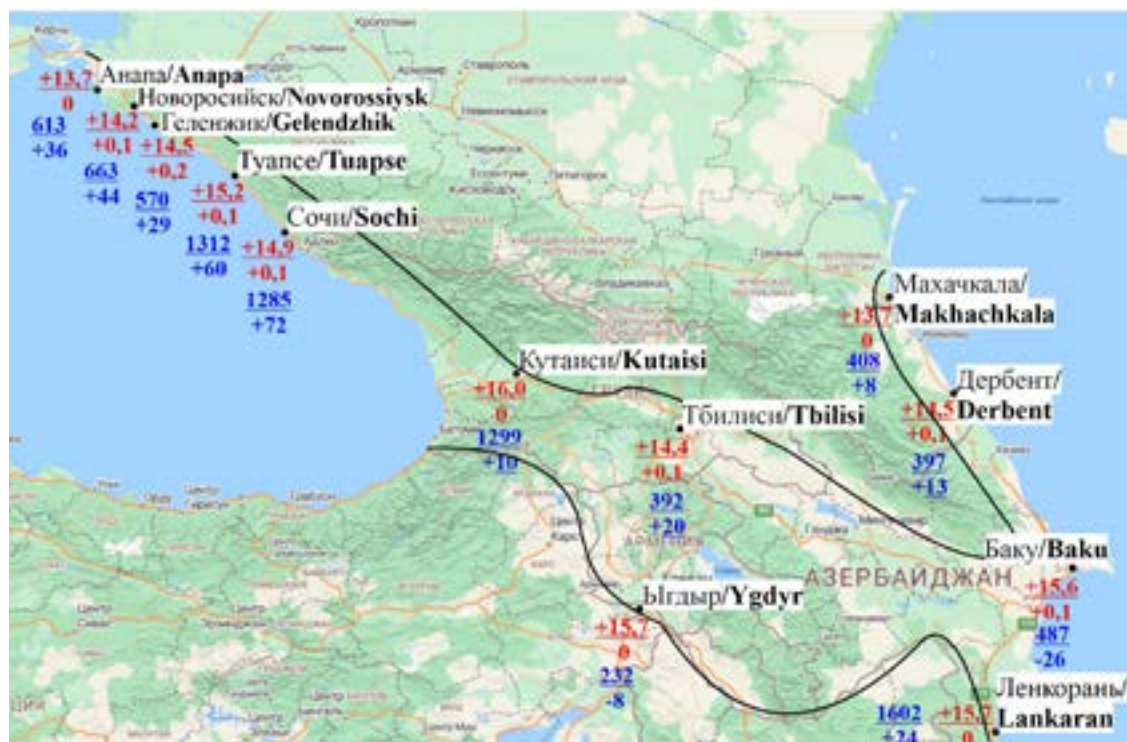
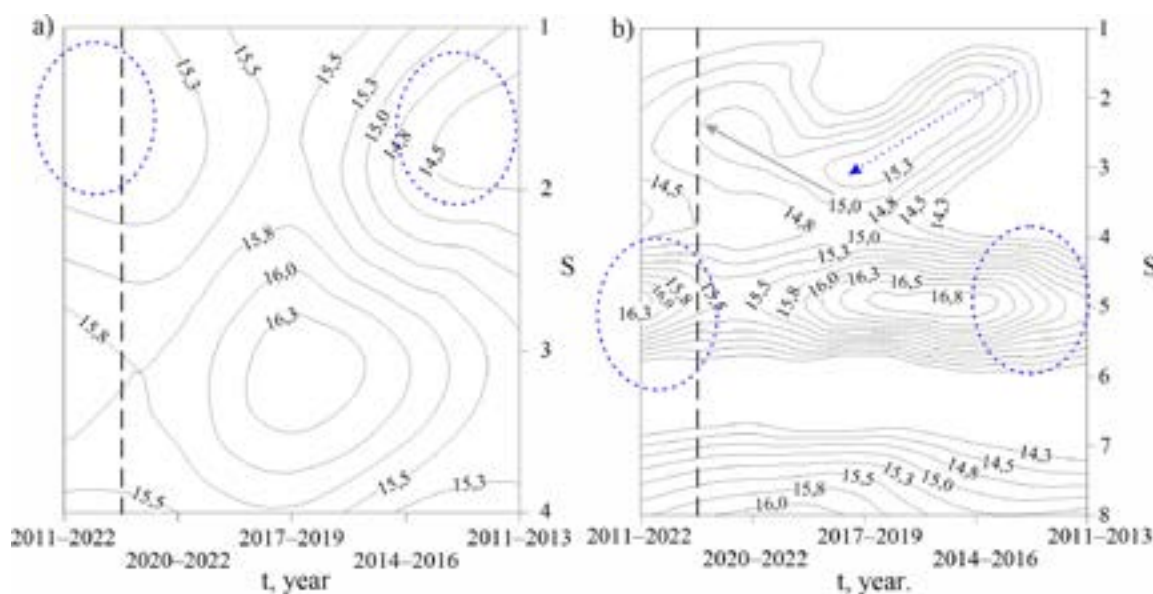


Рис. 1. Распределение среднегодовых температур (красным в числителе) и ее изменение за 1 год (в знаменателе), ($^{\circ}\text{C}$), а также суммы осадков за год (синим в числителе) их изменений (в знаменателе), в мм /

Fig. 1. Average annual temperature (in the numerator) and its change for 1 year (in the denominator), degrees Celsius ($^{\circ}\text{C}$) for the period 2011-2022

Незначительное понижение ($-0,3^{\circ}\text{C}$ за 12 лет) отмечено в Махачкале. Из табл. 1 следует, что в субтропической зоне Кавказа количество осадков в теплый период года (апрель–октябрь) незначительно превышает количество осадков в холодный период года (ноябрь–март), их соотношение примерно 55% к 45%, за исключением Баку и Сочи, где их количество примерно одинаковое. Абсолютные значения суммы осадков за теплый период года меняются от 155 мм (Ыгдыр, область сухих субтропиков долины реки Аракс) до 974 мм в Ленкорани (область влажных субтропиков Ленкоранской низменности). Среднее значение количества осадков за теплый период за исследуемый период для влажных субтропиков – 750 мм, для зоны сухих субтропиков – 258 мм. Как следует из таблицы 2 и рисунка 1 (смотри значения, окрашенные синим цветом), в субтропической зоне Кавказа наблюдается весьма неоднородное увлажнение. Величина годовой суммы осадков за последние 12 лет наблюдений (2011–2022 гг.) составляла по поясу от 232 мм (Ыгдыр) до +1602 мм (Ленкорань). В областях влажного субтропического климата средняя сумма осадков составила 1375 мм (от 1285 мм до 1602 мм), в областях сухого субтропического климата – 470 мм (от 232 мм до 663 мм). При этом повсеместно, за исключением юго-восточной части пояса (в Баку – минус 26 мм/год, в Игдыре – минус 8 мм/год) наблюдается прирост среднегодовой суммы осадков в среднем на 24 мм/год (от 8 мм в Махачкале до 72 мм – в Сочи). Средний прирост сумм осадков за год для влажной зоны составил +41 мм/год, для сухой зоны – +14,5 мм/год.

Пространственно-временное моделирование микроклиматических особенностей в различном масштабе временных рядов. Согласно методике исследования по оси абсцисс откладывали ось времени (t), с трёхлетними периодами и общий-средний за 11 лет для сопоставления общих закономерностей в различных временных рядах данных по аналогии с работами [Бригада и др., 2019; Hosseini, Najafi, 2022] и образцу [Golik et al., 2023]), но без фильтра LOESS (из-за малого объема выборки). Полученные результаты для влажного и сухого климата приведены на рисунке 2.



Из анализа рисунка 2а) следует, что прослеживается явно выраженный локальный максимум ($16,3^{\circ}\text{C}$) характерный для Кутаиси, который локализован в трехлетнем периоде 2017–2019 гг. Первый и второй минимумы с температурами $14,5^{\circ}\text{C}$ и $15,3^{\circ}\text{C}$ – г. Сочи, причем прослеживается схожесть динамики обоих минимумов. Первый с более сильным спадом характерен для середины между периодами 2011–2013 г и 2014–2016 гг., а второй – расположен вблизи границы сравнения трехлетних и 11-тилетних периодов (2020–2022 гг. и 11-тилетний – 2011–2022 гг.). Это указывает на наличие общих закономерностей в среднегодовых температурах воздуха для 11-летних и 3-хлетних (для начала 11-тилетнего периода) временных рядов данных в зоне влажного климата (пространство между Туапсе и г. Сочи). Из анализа рисунка 4b) следует, что прослеживается явно выраженные три области с различным характером взаимосвязей 11-тилетних и 3-хлетних временных рядов данных. Первый – «стабильный» в районе точек Дербент-Баку указывает на равномерное увеличение средней температуры для всех 3-летних периодов и с похожим на начало периода (2011–2013 гг.) общего характера 11-тилетнего цикла. Вторая область («циклический») локальных максимумов сопряжена с точками Тбилиси-Ыгдыр-Махачкала, характеризуется общими закономерностями с поведением повторяющихся локальных минимумов (рис. 4а). Третий тип связи – «аномально циклический» характерной чертой которого является диаметрально противоположная смена направления общего тренда (смотри направления синей и серой стрелочек на рисунке 4b). Для пространства Анапа-Новороссийск-Геленджик общий тренд роста средней температуры до уровня $15,3^{\circ}\text{C}$ характерен для 3-хлетних интервалов от 2011–2013 гг и 2017–2019 гг., после этой точки перегиба (2017–2019 гг.) тренд резко меняет направление (под прямым углом) со снижением своего значения до $15,0^{\circ}\text{C}$.

Выводы

Достижение устойчивого развития в субтропической зоне Кавказа должно обеспечиваться формированием соответствующих долгосрочных мероприятий и стратегий (в том числе с применением элементов «circular economy») с учетом региональных типов цикличности климатических изменений различной протяженности временных рядов данных. Выполненное авторами исследование изменения режима температуры атмосферного воздуха и количества осадков за период предшествующих 12 лет (2011–2022 гг.) показывает, что в субтропической зоне Кавказа происходило повышение среднегодовой температуры в среднем на $+0,6^{\circ}\text{C}/\text{год}$, повышение суммы годового количества осадков в среднем на $+24$ мм/год. Наибольший рост среднегодовых температур зафиксирован на Черноморском побережье, средних температур января в областях сухого климата. Наиболее интенсивный рост суммы осадков происходил на побережье Черного моря (до $+39$ мм/год в Сочи) в областях и влажного, и сухого климата. Одновременное активное хозяйственное освоение этих территорий, деградация и гибель широколиственных лесов, в условиях горного рельефа, приводят к нарушению почвенного покрова, активизации оползней, селепроваждений, росту склоновых оврагов и увеличению площади и количества эродированных участков.

Литература

1. Акопян В.Ф., Языев Б.М., Чепурненко А.С. Расчет устойчивости грунтовых откосов при помощи методов нелинейной оптимизации. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №1). – С. 150–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.69.79.011

2. Арефьева Е.В., Крапухин В.В. Оценка климатических рисков для разработки отраслевого плана адаптации к изменениям климата. // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Железнодорожск, 22 апреля 2022 года. – Железнодорожск: ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий». – 2022. – С. 88–91. EDN: OAGKRS.
3. Батхиев А.М. Своеобразие физико-географических условий Кавказа как основа дифференциации природных экосистем. // Рефлексия. – 2008. – №2. – С. 3–13. – EDN: WFRZQJ.
4. Бригада В.С., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Голик В.И. Использование разгрузочного бурения для обеспечения безопасности отработки газоносных угольных пластов Донбасса. // Безопасность Труда в Промышленности. – 2019. – №3(747). – С. 7–11. DOI 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11.
5. Джигоева А.К. Перспективы экологизации горного производства для снижения вредных выбросов в атмосферу. // Уголь. – 2022. – №10. – С. 29–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32
6. 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.
7. Кубрин С.С., Тайлаков О.В., Соболев В.В. и др. Использование вариации Аллана при обработке измеренных параметров метановоздушной смеси при дегазации выемочных участков. // Уголь. – 2022. – №12. – С. 60–66. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-60-66.
8. Липилин Д.А., Евтушенко Д.Д. Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере микрорайонов города Краснодар. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №3. – С. 195–210. DOI: 10.46698/VNC. 2022.72.93.013.
9. Скрипчинский А.В., Бадов А.Д., Бадов О.А., Борисов Д.Д. Анализ состояния водоохраной зоны городского округа Дербент на основе ГИС-технологий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 180–182. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.75.014.
10. Стогний В.В., Стогний Г.А., Любимова Т.В. Геоэкологические риски территории Краснодарского края: проблема интегральной оценки степени геологических опасностей. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 121–133. DOI: 10.46698/VNC. 2021.40.95.010.
11. Сурков В.В., Виноградова Н.Н., Крыленко И.В., Тарбеева А.М. Формирование и развитие пойм горных рек в условиях активной селевой деятельности (на примере долины реки Баксан). // ГеоРиск. – 2013. – №4. – С. 48–55. EDN: SSZMHT.
12. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
13. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
14. Al-Shawabkeh A.F., Thalji M.O., Al-Rousan T.M. Using recycled plastic waste to improve the performance of hot-mix asphalt. // Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management. – 2022. DOI:10.1680/jwarm.21.00013.
15. Baker C.B., Cosh M., Bolten J., Brusberg M., Caldwell T., Connolly S., Dobrev I., Edwards N., Goble P.E., Ochsner T.E., Quiring S.M., Robotham M., Skumanich M., White M.S., Woloszyn W.A. Working toward a National Coordinated Soil Moisture Monitoring Network Vi-

sion, Progress, and Future Directions. // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2022. – Vol. 103(12). – pp. E2719–E2732. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0178.1.

16. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Savchenko I.A., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A. Modeling and Complex Analysis of the Topology Parameters of Ventilation Networks When Ensuring Fire Safety While Developing Coal and Gas Deposits. // *Fire*. – 2023. – Vol. 6(95). DOI: 10.3390/fire6030095.

17. Chiampo F., Shanthakumar S., Ricky R., Pattukandan Ganapathy G. Tannery: Environmental impacts and sustainable technologies. // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.025.

18. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – Vol. 5. – pp. 47–54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.

19. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V.S., Efremkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – Article No 726. DOI: 10.3390/ma16020726.

20. Gura D.A., Volkova T.A., Lipilin D.A. Paleogeography of the Black and Azov Seas and Their Coasts in Pleistocene and Holocene (Within the Krasnodar Region of Russia). // S.G. Maximova et al. (eds.) *Advances in Natural Human-Made and Coupled Human-Natural Systems Research Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 252. – pp. 19–38. DOI: 10.1007/978-3-030-78105-7_3.

21. Horry M.J., Chakraborty S., Pradhan B. et al. Two-Speed Deep-Learning Ensemble for Classification of Incremental Land-Cover Satellite Image Patches. // *Earth Systems and Environment*. – 2023. DOI: 10.1007/s41748-023-00343-3.

22. Hosseini A., Najafi M., Hossein Morshedy A. Determination of suitable distance between methane drainage stations in Tabas mechanized coal mine (Iran) based on theoretical calculations and field investigation. // *Journal of Mining Institute*. – 2022. – Vol. 258. – pp. 1050–1060. DOI: 10.31897/PMI.2022.106.

23. Kalantari A.R., Johari A., Zandpour M., Kalantari M. Effect of spatial variability of soil properties and geostatistical conditional simulation on reliability characteristics and critical slip surfaces of soil slopes. // *Transportation Geotechnics*. – 2023. – Vol. 39. – Article No.100933. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100933.

24. Khan S., Ali S.S., Singh R. Determinants of Remanufacturing Adoption for Circular Economy: A Causal Relationship Evaluation Framework. // *Applied System Innovation*. – 2022. – Vol. 5. – Article No.62. DOI: 10.3390/asi5040062.

25. Khosravifardshirazi A., Johari A., Javadi A.A., Khanjanpour M.H., Khosravifardshirazi B., Akrami M. Role of Subgrade Reaction Modulus in Soil-Foundation-Structure Interaction in Concrete Buildings. // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – Article No 540. DOI: 10.3390/buildings12050540.

26. Kongar-Syuryun C.B., Aleksakhin A.V., Eliseeva E.N., Zhaglovskaya A.V., Klyuev R.V., Petrushevich D.A. Modern Technologies Providing a Full Cycle of Geo-Resources Development. // *Resources*. – 2023. – Vol. 12. – Article No.50. DOI: 10.3390/resources12040050.

27. Li S., Yu Z., Yu H., Wang X. The Recent Progress China Has Made in High-Concentration Backfill. // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – Article No.2758. DOI: 10.3390/su14052758.

28. Magkoev T.T., Mustafaeva D.G., Zaalishvili V.B., Ashkhotov O.G., Sozaev Z.T. Preparation of Aluminum–Molybdenum Alloy Thin Film Oxide and Study of Molecular CO + NO Conversion on Its Surface. // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – Article No 2245. DOI: 10.3390/ma15062245.

29. Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M. Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – Article No.9376. DOI: 10.3390/en15249376.

30. Massaoudi M.S., Refaat S., Abu-Rub H., Chihi I., Oueslati F.S. PLS-CNN-BiLSTM: An

End-to-End Algorithm-Based Savitzky–Golay Smoothing and Evolution Strategy for Load Forecasting. // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – Article No.5464. DOI: 10.3390/en13205464.

31. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Barabadi A., Qarahasanlou A.N. Resilience estimation of the mining fleet (Case study: Sungun copper mine). // *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. – 2021. – Vol. 55(2). – pp. 151–156. DOI: 10.22059/ijmge.2021.290468.594828.

32. Naveen N.S., Kishore P.S., Pujari S., Silas Kumar M.D., Jogi K. Optimization through Taguchi and Artificial Neural Networks on Thermal Performance of a Radiator using Graphene based Coolant. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy*. – 2022. – Vol. 236(8). – pp. 1680–1693. DOI: 10.1177/09576509221097476.

33. Pkhovelishvili M.G., Archvadze N.N., Nikoleishvili M.M. Analysis of earthquake prediction models to obtain the best model. // *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. – Vol. 13. No. 1. – pp. 162–172. DOI: 10.46698/VNC.2023.61.18.012.

34. Rakishev B., Kenzhetaev Z., Mataev M., Togizov K. Improving the Efficiency of Downhole Uranium Production Using Oxygen as an Oxidizer. // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12. – Article No.1005. DOI: 10.3390/min12081005.

35. Shahbazi M., Najafi M., Marji M.F., Abdollahipour A. Cavity Growth in Underground Coal Gasification Method by Considering Cleat Length and Inclination of Coal with Elasto-Brittle Behavior. // *Journal of Mining and Environment*. – 2022. – Vol. 13(2). – pp. 607–625. DOI: 10.22044/jme.2022.11906.2183.

36. Shutaleva A., Martyushev N., Nikonova Z., Savchenko I., Abramova S., Lubimova V., Novgorodtseva A. Environmental Behavior of Youth and Sustainable Development. // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – Article No.250. DOI: 10.3390/su14010250.

37. Singh R., Khan S., Centobelli P. Investigating the Interplay between Social Performance and Organisational Factors Supporting Circular Economy Practices. // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – Article No.16781. DOI: 10.3390/su142416781.

38. Sirjani A.K., Sereshki F., Ataei M., Hosseini M.A. Prediction of Backbreak in the Blasting Operations using Artificial Neural Network (ANN) Model and Statistical Models (Case study: Gole-Gohar Iron Ore Mine No.1). // *Archives of Mining Sciences*. – 2022. – Vol. 67(1). – pp. 107–121. DOI:10.24425/ams.2022.140705.

39. Trzepieciński T., Najm S.M. Application of Artificial Neural Networks to the Analysis of Friction Behaviour in a Drawbead Profile in Sheet Metal Forming. // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – Article No.9022. DOI: 10.3390/ma15249022.

40. Vergnano A., Raffa C.M., Godio A., Chiampo F. Electromagnetic Properties Monitoring to Detect Different Biodegradation Kinetics in Hydrocarbon-Contaminated Soil. // *Soil Systems*. – 2022. – Vol. 6(2). – Article No.48. DOI: 10.3390/soilsystems6020048.

41. Wang J.N., Yu F., Ma G.X., Peng F., Zhou X.F., Wu C.S., Yang W.S., Wang C.Y., Cao D., Jiang H.Q., Jing H., Qu S., Xu M. Gross economic-ecological product as an integrated measure for ecological service and economic products. // *Resources Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 174. – Article No.105566. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105566.

42. Xu M., Yan J. Energy and circular economy in sustainability transitions. // *Resources Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 169. – Article No.105471. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105471.

43. Xu P., Jiang T., Zhang C., Shi K., Li W. Recovering Regional Groundwater Storage Anomalies by Combining GNSS and Surface Mass Load Data: A Case Study in Western Yunnan. // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. – Article No.4032. DOI: 10.3390/rs14164032.

44. Yang P., Esmaceli K., Goodfellow S., Ordóñez Calderón J.C. Mine Pit Wall Geological Mapping Using UAV-Based RGB Imaging and Unsupervised Learning. // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – Article No.1641. DOI: 10.3390/rs15061641.

45. Yu H. Mining waste: curb risks to people and the environment. // *Nature*. – 2023. – Vol. 615. – Article No.586. DOI: 10.1038/d41586-023-00844-1.

46. Zaalishvili V.B., Hasanov A.B., Abbasov E.Y., Mammadova D.N. Detailing the Pore

Structure of Productive Intervals of Oil Wells Using the Color 3D Imaging. // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – Article No.217. DOI: 10.3390/en16010217.

47. Zhanbayev R.A., Yerkin A.Y., Shutaleva A.V., Irfan M., Gabelashvili K., Temirbaeva G.R., Chazova I.Y., Abdykadyrkyzy R. State asset management paradigm in the quasi-public sector and environmental sustainability: Insights from the Republic of Kazakhstan. // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10. – Article No.1037023. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1037023.

48. Zhang F., Wang G., Wang B. Study and Application of High-Level Directional Extraction Borehole Based on Mining Fracture Evolution Law of Overburden Strata. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Article No.2806. DOI: 10.3390/su15032806.

49. Zhao P., An X., Li S., Kang X., Huang Y., Yang J., Jin S. Study on the Pseudo-Slope Length Effect of Buried Pipe Extraction in Fully Mechanized Caving Area on Gas Migration Law in Goaf. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Article No.6628. DOI: 10.3390/su15086628.

50. Zhong S., Lin D. Evaluation of the Coordination Degree of Coal and Gas Co-Mining System Based on System Dynamics. // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – Article No.16434. DOI: 10.3390/su142416434.

References

1. Akopyan V.F., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. Calculation of soil slope stability using nonlinear optimization methods. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No.1. pp. 150–161. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2023.69.79.011

2. Arefieva E.V., Krapukhin V.V. Assessment of climate risks for the development of a sectoral plan for adaptation to climate change Actual problems of ensuring fire safety and protection from emergencies: Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Zheleznogorsk, April 22, 2022. Zheleznogorsk. Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Management, 2022. pp. 88-91. (In Russ.) EDN: OAGKRS.

3. Batkhiev A.M. The peculiarity of the physical and geographical conditions of the Caucasus as the basis for the differentiation of natural ecosystems. *Refleksija*. 2008. No.2. pp. 3–13. (In Russ.) EDN: WFRZQJ

4. Brigida V.S., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Golik V.I. Use of destressing drilling to ensure safety of Donbass gas-bearing coal seams extraction. *Occupational Safety in Industry*. 2019. Vol. 3. pp. 7–11. (In Russ.) DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11

5. Dzhioeva A.K. Prospects for mining ecologization to reduce harmful emissions into the atmosphere. *Ugol'*. 2022. No10. pp. 29–32. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32

6. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 75–88. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006

7. Kubrin S.S., Tailakov O.V., Sobolev V.V., Zakharov V.N. The use of the Allan variation in the processing of the measured parameters of the methane-air mixture during the degassing of excavation sites. *Ugol'*. 2022. No.12. pp. 60–66. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-60-66

8. Lipilin D.A., Evtushenko D.D. Assessment of the urban environment quality using geo-information systems by the example of microdistricts of the city of Krasnodar. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.3. pp. 195–210. (In Russian) DOI: 10.46698/VNC. 2022.72.93.013

9. Skripchinsky A. V., Badov A. D., Badov O. A., Borisov D. D. Water protection zone state analysis of the Derbent city district on the basis of GIS technologies. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.4. pp. 180–182. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.39.75.014

10. Stogniy V.V., Stogniy G.A., Lyubimova T.V. Geoecological risks of the territory of the Krasnodar Territory: the problem of integral assessment of the degree of geological hazards.

Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 121–133. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.40.95.010

11. Surkov V.V., Vinogradova N.N., Krylenko I.V., Tarbeeva A.M. Formation and development of floodplains of mountain rivers in conditions of active mudflow activity (on the example of the Baksan river valley). *GeoRisk*. 2013. No.4. pp. 48–55. (In Russ.). EDN: SSZMHT

12. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)

13. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

14. Al-Shawabkeh A.F., Thalji M.O., Al-Rousan T.M. Using recycled plastic waste to improve the performance of hot-mix asphalt. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*. 2022. DOI: 10.1680/jwarm.21.00013

15. Baker C.B., Cosh M., Bolten J., Brusberg M., Caldwell T., Connolly S., Dobrev I., Edwards N., Goble P.E., Ochsner T.E., Quiring S.M., Robotham M., Skumanich M., White M.S., Woloszyn W.A. Working toward a National Coordinated Soil Moisture Monitoring Network Vision, Progress, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2022. Vol. 103(12). pp. E2719–E2732. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0178.1

16. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Savchenko I.A., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A. Modeling and Complex Analysis of the Topology Parameters of Ventilation Networks When Ensuring Fire Safety While Developing Coal and Gas Deposits. *Fire*. 2023. Vol. 6(95). DOI: 10.3390/fire6030095

17. Chiampo F., Shanthakumar S., Ricky R. Pattukandan Ganapathy G. Tannery: Environmental impacts and sustainable technologies. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.025.

18. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Scientific Bulletin of the National Gorniche University*. 2020. Vol. 5. pp. 47–54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047

19. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremenkova E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. *Materials*. 2023. Vol. 16. Article No 726. DOI: 10.3390/ma16020726

20. Gura D.A., Volkova T.A., Lipilin D.A., Paleogeography of the Black and Azov Seas and Their Coasts in Pleistocene and Holocene (Within the Krasnodar Region of Russia). *Advances in Natural Human-Made and Coupled Human-Natural Systems Research Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 252. pp. 19–38. DOI: 10.1007/978-3-030-78105-7_3.

21. Horry M.J., Chakraborty S., Pradhan B. et al. Two-Speed Deep-Learning Ensemble for Classification of Incremental Land-Cover Satellite Image Patches. *Earth Systems and Environment*. 2023. DOI: 10.1007/s41748-023-00343-3

22. Hosseini A., Najafi M., Hossein Morshedy A. Determination of suitable distance between methane drainage stations in Tabas mechanized coal mine (Iran) based on theoretical calculations and field investigation. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. pp. 1050–1060. DOI: 10.31897/PMI.2022.106

23. Kalantari A.R., Johari A., Zandpour M., Kalantari M. Effect of spatial variability of soil properties and geostatistical conditional simulation on reliability characteristics and critical slip surfaces of soil slopes. *Transportation Geotechnics*. 2023. Vol. 39. Article No 100933. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100933

24. Khan S., Ali S.S., Singh R. Determinants of Remanufacturing Adoption for Circular Economy: A Causal Relationship Evaluation Framework. *Applied System Innovation*. 2022. Vol. 5. Article No 62. DOI: 10.3390/asi5040062.

25. Khosravifardshirazi A., Johari A., Javadi A.A., Khanjanpour M.H., Khosravifardshirazi

B., Akrami M. Role of Subgrade Reaction Modulus in Soil-Foundation-Structure Interaction in Concrete Buildings. *Buildings*. 2022. Vol. 12. Article No 540. DOI: 10.3390/buildings12050540.

26. Kongar-Syuryun C.B., Aleksakhin A.V., Eliseeva E.N., Zhaglovskaya A.V., Klyuev R.V., Petrusevich D.A. Modern Technologies Providing a Full Cycle of Geo-Resources Development. *Resources*. 2023. Vol. 12. Article No 50. DOI: 10.3390/resources12040050.

27. Li S., Yu Z., Yu H., Wang X. The Recent Progress China Has Made in High-Concentration Backfill. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article No 2758. DOI: 10.3390/su14052758.

28. Magkoev T.T., Mustafaeva D.G., Zaalishvili V.B., Ashkhotov O.G., Sozaev Z.T. Preparation of Aluminum Molybdenum Alloy Thin Film Oxide and Study of Molecular CO + NO Conversion on Its Surface. *Materials*. 2022. Vol. 15. Article No 2245. DOI: 10.3390/ma15062245.

29. Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M. Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework. *Energies*. 2022. Vol. 15. Article No 9376. DOI: 10.3390/en15249376.

30. Massaoudi M.S., Refaat S., Abu-Rub H., Chihi I., Oueslati F.S. PLS-CNN-BiLSTM: An End-to-End Algorithm-Based SavitzkyGolay Smoothing and Evolution Strategy for Load Forecasting. *Energies*. 2020. Vol. 13. Article No 5464. DOI: 10.3390/en13205464.

31. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Barabadi A., Qarahasanlou A.N. Resilience estimation of the mining fleet (Case study: Sungun copper mine). *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2021. Vol. 55(2). pp. 151–156. DOI: 10.22059/ijmge.2021.290468.594828.

32. Naveen N.S., Kishore P.S., Pujari S., Silas Kumar M.D., Jogi K. Optimization through Taguchi and Artificial Neural Networks on Thermal Performance of a Radiator using Graphene based Coolant. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy*. 2022. Vol. 236(8). pp. 1680–1693. DOI: 10.1177/09576509221097476.

33. Pkhovelishvili M.G., Archvadze N.N., Nikoleishvili M.M. Analysis of earthquake prediction models to obtain the best model. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No.1. pp. 162–172. DOI: 10.46698/VNC.2023.61.18.012

34. Rakishev B., Kenzhetaev Z., Mataev M., Togizov K. Improving the Efficiency of Downhole Uranium Production Using Oxygen as an Oxidizer. *Minerals*. 2022. Vol. 12. Article No 1005. DOI: 10.3390/min12081005

35. Shahbazi M., Najafi M., Marji M.F., Abdollahipour A. Cavity Growth in Underground Coal Gasification Method by Considering Cleat Length and Inclination of Coal with Elasto-Brittle Behavior. *Journal of Mining and Environment*. 2022. Vol. 13(2). pp. 607–625. DOI: 10.22044/jme.2022.11906.2183.

36. Shutaleva A., Martyushev N., Nikonova Z., Savchenko I., Abramova S., Lubimova V., Novgorodtseva A. Environmental Behavior of Youth and Sustainable Development. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article No 250. DOI: 10.3390/su14010250

37. Singh R., Khan S., Centobelli P. Investigating the Interplay between Social Performance and Organisational Factors Supporting Circular Economy Practices. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article No 16781. DOI: 10.3390/su142416781

38. Sirjani A.K., Sereshki F., Ataei M., Hosseini M.A., Prediction of Backbreak in the Blasting Operations using Artificial Neural Network (ANN) Model and Statistical Models (Case study: Gole-Gohar Iron Ore Mine No. 1). *Archives of Mining Sciences*. 2022. Vol. 67(1). pp. 107–121. DOI: 10.24425/ams.2022.140705

39. Trzepieciński T., Najm S.M. Application of Artificial Neural Networks to the Analysis of Friction Behaviour in a Drawbead Profile in Sheet Metal Forming. *Materials*. 2022. Vol. 15. Article No 9022. DOI: 10.3390/ma15249022

40. Vergnano A., Raffa C.M., Godio A., Chiampo F. Electromagnetic Properties Monitoring to Detect Different Biodegradation Kinetics in Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Soil Systems*. 2022. Vol. 6(2). Article No 48. DOI: 10.3390/soilsystems6020048

41. Wang J.N., Yu F., Ma G.X., Peng F., Zhou X.F., Wu C.S., Yang W.S., Wang C.Y., Cao D., Jiang H.Q., Jing H., Qu S., Xu M. Gross economic-ecological product as an integrated measure

for ecological service and economic products. *Resources Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 174. Article No 105566. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105566

42. Xu M., Yan J. Energy and circular economy in sustainability transitions. *Resources Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 169. Article No 105471. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105471

43. Xu P., Jiang T., Zhang C., Shi K., Li W. Recovering Regional Groundwater Storage Anomalies by Combining GNSS and Surface Mass Load Data: A Case Study in Western Yunnan. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article No 4032. DOI: 10.3390/rs14164032

44. Yang P., Esmacili K., Goodfellow S., OrdóñezCalderón J.C. Mine Pit Wall Geological Mapping Using UAV-Based RGB Imaging and Unsupervised Learning. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Article No 1641. DOI: 10.3390/rs15061641

45. Yu H. Mining waste: curb risks to people and the environment. *Nature*. 2023. Vol. 615. Article No 586. DOI: 10.1038/d41586-023-00844-1

46. Zaalishvili V.B., Hasanov A.B., Abbasov E.Y., Mammadova D.N. Detailing the Pore Structure of Productive Intervals of Oil Wells Using the Color 3D Imaging. *Energies*. 2023. Vol. 16. Article No 217. DOI: 10.3390/en16010217

47. Zhanbayev R.A., Yerkin A.Y., Shutaleva A.V., Irfan M., Gabelashvili K., Temirbaeva G.R., Chazova I.Y., Abdykadyrkyzy R. State asset management paradigm in the quasi-public sector and environmental sustainability: Insights from the Republic of Kazakhstan. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. Article No 1037023. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1037023

48. Zhang F., Wang G., Wang B. Study and Application of High-Level Directional Extraction Borehole Based on Mining Fracture Evolution Law of Overburden Strata. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Article No 2806. DOI: 10.3390/su15032806

49. Zhao P., An X., Li S., Kang X., Huang Y., Yang J., Jin S. Study on the Pseudo-Slope Length Effect of Buried Pipe Extraction in Fully Mechanized Caving Area on Gas Migration Law in Goaf. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Article No 6628. DOI: 10.3390/su15086628

50. Zhong S., Lin D. Evaluation of the Coordination Degree of Coal and Gas Co-Mining System Based on System Dynamics. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article No 16434. DOI: 10.3390/su142416434

УДК: 504.75

DOI: [10.46698/VNC.2023.76.91.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.76.91.011)

Оригинальная статья

Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом

В.Б. Заалишвили , А.С. Кануков , К.В. Корбесова , М.В. Майсурадзе 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

Статья поступила: 27.04.2021, доработана: 22.05.2021, принята к публикации: 30.05.2021

Резюме: Актуальность работы. В связи с растущим антропогенным воздействием охрана природной среды превратилась в глобальную проблему. Важнейшей составной частью современной жизни является транспорт. Экономическое развитие всех регионов основано на доступе людей к товарам и услугам, которые обеспечиваются современной транспортной инфраструктурой. Автомобильный транспорт является основным способом транспортировки грузов и населения. В то же время положительные аспекты использования транспорта тесно связаны с загрязнением природной среды. Исследования, проводимые в последние десятилетия, указывают на то, что загрязнение воздуха оказывает значительное негативное влияние на здоровье, и транспорт является при этом одним из важнейших источников загрязнения. Дорожное движение представляет собой крупнейший источник выбросов многих вредных для здоровья загрязнителей воздуха, таких как оксид углерода, оксиды азота, бензол и первичные РМ10. Несмотря на большой объем научных исследований, проводимых в последние десятилетия, все еще открытым остается вопрос интегральной оценки уровня загрязнения природной среды от различных источников. При этом в целях разработки действенных мер по снижению уровня загрязнения необходимым представляется разработка карт загрязнения территории на основе подобного интегрального показателя. Построение карт предполагает использование значительного количества исходных данных, и разработку специальной методики для расчёта уровня загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом. **Методы исследования.** В ходе настоящей работы были проанализированы имеющиеся методики измерения концентраций поллютантов, производимых автотранспортом, в атмосферном воздухе. Установлено, что принятые подходы предполагают проведение длительных наблюдений, сбор и обработку большого количества исходных данных, а также наличие значительного количества специального оборудования. В этой связи разработана собственная методика проведения экспериментальных исследований. **Результаты работы.** В результате проведенных исследований разработана экспресс методика измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, что позволяет в короткий срок и с помощью одного газоанализатора оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом. Данный метод использован при расчёте предложенного авторами показателя загрязнения $Z_{\text{атм}}$.

Ключевые слова: урбанизированная территория, экология, загрязнения, окружающая среда, автомобильный транспорт, вредные выбросы, атмосферный воздух, показатель загрязнения.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-35-90090.

Для цитирования: 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. 13(2): 133-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.

[DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.76.91.011)

Original paper

Determination of air pollution levels caused by the road transport in urbanized areas

V.B. Zaalishvili^{id}, A.S. Kanukov^{id}, K.V. Korbesova^{id}, M.V. Maisuradze^{id}

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

Received: 27.04.2021, revised: 22.05.2021, accepted: 30.05.2021

Abstract: Relevance. Due to increasing anthropogenic impact, environmental protection has become a global problem. Transportation is an essential component of modern life. The economic development in all regions is based on people's access to goods and services provided by modern transportation infrastructure. The road transport is the primary means of transporting goods and people, but its positive aspects are closely linked to environmental pollution. Research conducted over the past decade indicates that air pollution has a significant negative impact on health, and transportation is one of the most important sources of pollution. Road traffic is the largest source of emissions of many harmful air pollutants, such as carbon monoxide, nitrogen oxides, benzene, and primary PM10. Despite the large volume of scientific research conducted in recent decades, the question of an integrated assessment of environmental pollution levels from various sources remains open. To develop effective measures to reduce pollution levels, it is necessary to develop pollution maps based on such an integrated indicator. The construction of maps involves the use of a significant amount of data and the development of a special methodology for calculating the level of air pollution caused by automobile transportation. **Research Methods:** In this study, existing methods for measuring pollutant concentrations produced by vehicles in the atmosphere were analyzed. It was found that the adopted approaches involve conducting long-term observations, collecting and processing a large amount of raw data, as well as having a significant amount of specialized equipment. In this regard, our own methodology for conducting experimental research has been developed. **Results:** As a result of the research, an express method for measuring pollutant concentrations in the atmosphere has been developed, which allows for a quick assessment of air pollution levels caused by automobile transportation using only one gas analyzer. This method was used in calculating the proposed pollution indicator *Zatm*.

Keywords: urbanized area, ecology, pollution, environment, road transport, harmful emissions, atmospheric air, pollution indicator.

Acknowledgments: *This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) under project number 20-35-90090.*

For citation: 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. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 133-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.

Введение

В связи с растущим антропогенным воздействием охрана природной среды превратилась в глобальную проблему. Важнейшей составной частью современной жизни является транспорт. Экономическое развитие всех регионов основано на доступе людей к товарам и услугам, которые обеспечиваются современной транспортной инфраструктурой. Автомобильный транспорт является основным способом транспортировки грузов и населения. В то же время положительные аспекты использования транспорта тесно связаны с загрязнением природной среды. Исследования, проводимые в последние десятилетия, указывают на то, что загрязне-

ние воздуха оказывает значительное негативное влияние на здоровье, и транспорт является при этом одним из важнейших источников загрязнения. Дорожное движение является крупнейшим источником выбросов многих вредных для здоровья загрязнителей воздуха, таких как оксид углерода, оксиды азота, бензол и первичные PM₁₀ (частицы различных веществ диаметром 10 мкм и менее). Несмотря на большой объем научных исследований, проводимых в последние десятилетия, все еще открытым остается вопрос интегральной оценки уровня загрязнения природной среды от различных источников. При этом в целях разработки действенных мер по снижению уровня загрязнения необходимым представляется разработка карт загрязнения территории на основе подобного интегрального показателя. Построение карт предполагает использование значительного количества исходных данных, и разработку специальной методики для расчёта уровня загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом.

Большое число воздушных загрязнителей различной токсичности поступает в природную среду при движении или работе автомобильного транспорта. Попадают загрязнители в природную среду из транспортных средств, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, а также их элементов (тормоза, диски сцепления, шины и топливные баки), и, кроме того, от продуктов износа дорожного покрытия. Исследования влияния движения транспорта на качество природной среды в городских районах начаты за рубежом относительно недавно [Wheeler, Rolfe 1979; Elwood, 1983; Elwood, Gallacher 1984; McClellan 1986]. В большинстве исследований основное внимание уделяется загрязнению воздуха автомобильными выбросами и их воздействию на здоровье человека [Chamberlain, 1983; Elwood, 1986; Schroeder et al., 1987]. Подобные исследования достаточно активно проводятся и в России [Вигдорович и др., 2005; Кобрин, 2016; Каташинская, Суппес, 2016; Сонов и др., 2016; Шулепова, Сидоров, 2018; Сокол, Жердев, 2018].

В связи с тем, что большую часть исследуемой территории Северной Осетии занимают горные и предгорные районы, автомобильный транспорт служит основным видом транспорта во внутривоздушных связях Республики. Характерным для Республики является расширение сферы рационального применения автомобильного транспорта. Автотранспорт принял на себя перевозки мелких партий высокоценных и скоропортящихся грузов на дальние расстояния, значительную долю перевозок на средние расстояния (300–1000 км) и практически все перевозки на короткие расстояния (до 100–150 км). В структуре пассажирооборота перевозка пассажиров автомобильным транспортом составляет 64,9%.

Уровень загрязнения воздуха варьируется во времени и пространстве, в зависимости от различных особенностей, таких как близость к дорогам, состав автопарка, транспортного потока и наличия других источников загрязнения. В современных работах исследуется пространственное распределение загрязнения на основе геоинформационных технологий [Zhang, 2006; Sutherland, Tolosa, 2000; Wang et al., 2012], проводится факторный анализ [Zalakeviciute et al., 2020]. Для оценки и моделирования загрязнения воздуха используется видеофиксация транспортных потоков [Ситников, 2016, 2017]. Содержание тяжелых металлов исследуется не только в грунтах, но и в различных растениях [Jankowski et al., 2014; Самолдина и др., 2016; Turkyilmaz et al., 2018; Степанова и др., 2019; Бекузарова и др., 2020]. В силу особенностей корневой системы для оценки загрязнения воздуха может быть использован анализ содержания металлов во мхах и лишайниках [Garty, 2001; Kosta, Liiv,

2011]. Загрязнение природной среды твердыми частицами в отработанных газах может быть самой большой потенциальной угрозой здоровью населения [Hoek et al., 2002]. Многочисленные исследования указывают на то, что некоторые заболевания прямо связаны с уровнем загрязнения воздуха, вызванным влиянием большого числа автомобильного транспорта [Künzli et al., 2000]. Эффекты от воздействия вредных веществ на организм человека могут иметь различные последствия: от краткосрочного ухудшения и появления респираторных симптомов до сокращения продолжительности жизни.

Количество выбросов вредных веществ, а также их химический состав напрямую влияют на уровень загрязнения атмосферы. Кроме того, существенными факторами являются высота, на которой происходят выбросы, а также климатические условия местности, которыми определяется перенос, превращение и рассеивание выбрасываемых вредных веществ. За загрязнением атмосферного воздуха в Республике Северная Осетия-Алания осуществляются регулярные наблюдения, проводимые в рамках части системы государственного мониторинга за атмосферным воздухом в единой системе государственного экологического мониторинга Российской Федерации.

Методы работы

Традиционно моделирование рассеяния выхлопных газов транспортных средств можно разделить на эмпирическую модель Гаусса, статистическую модель и численную модель. Модель Гаусса, основанная на аналитическом решении переноса загрязняющих веществ, широко используется для прогнозирования рассеивания загрязняющих веществ от транспортных средств. Типичная гауссовская модель включает HIWAY [Zimmerman, Thompson, 1975] и ее обновленную версию HIWAY-2 [Petersen, 1980], GM [Chock, 1978] и серию моделей CALINE [Benson, 1992]. Хотя модель Гаусса можно легко использовать, коэффициенты диффузии необходимо эмпирически сопоставлять с различными местными атмосферными условиями. Кроме того, точность гауссовской модели вызывает сомнения в области ближнего следа за транспортным средством, поскольку постоянная рециркуляция и вихри в этой конкретной области приводят к тому, что дисперсия загрязняющих веществ больше не соответствует гауссовскому распределению. С другой стороны, большинство статистических моделей, по-видимому, связаны с краткосрочными прогнозами загрязняющих веществ в городских районах в режиме реального времени [Sharma, Khare, 2001]. Различные подходы к моделированию, такие как моделирование Монте-Карло [Liu et al., 1994], стохастический метод [Karim et al., 1998] и метод регрессии [Fomunung et al., 1999], использовались для описания изменчивости свойств загрязняющих веществ в процессе диспергирования загрязнителя. Однако применение статистических моделей для рассеивания загрязняющих веществ, выбрасываемых транспортными средствами, особенно в ближней зоне движения транспортных средств, имеет относительно ограниченное применение. Численная модель, которая численно интегрирует уравнения сохранения массы, импульса и энергии потока жидкости, недавно была использована для процесса рассеивания загрязняющих веществ от дорожных транспортных средств вблизи дороги, уличного каньона и городских масштабов. Эскридж и Хант [Eskridge, Hunt, 1979] разработали теорию следа транспортного средства, основанную на подходе пограничного слоя, для изучения дефицита скорости и масштаба длины следа.

Чан и др. [Chan et al., 2002] и Ридл и др. [Riddle et al., 2004] использовали усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) для моделирования структуры турбулентности, сохранения энергии и переноса частиц для сложного потока жидкости. На сегодняшний день большинство прогнозов рассеивания и переноса загрязняющих веществ из транспортных средств с помощью подхода RANS справились со сложной городской местностью, например, с уличным каньоном [Vardoulakis et al., 2003]. Чан и др. [Chan et al., 2001] разработали двумерную численную модель рассеивания загрязняющих веществ, основанную на объединенном подходе скалярной функции плотности вероятности (PDF) в сочетании с моделью турбулентности *k- ϵ* , для моделирования начального процесса рассеивания оксидов азота, распределения температуры и скорости потока из выхлопного шлейфа транспортного средства. Ким и др. [Kim et al., 2001] разработали трехмерную численную модель в сочетании с турбулентностью для прогнозирования рассеивания углекислого газа из выхлопных газов большегрузных грузовиков. Хотя RANS позволяет рассчитывать сложные геометрии потока и турбулентность, она ограничена стационарными задачами. Моделирование больших вихрей (LES) кажется более привлекательным подходом к пониманию динамики структур потока и нестационарного процесса рассеивания загрязняющих веществ. Точное численное моделирование структур течения и рассеивания загрязняющих веществ (скалярного переноса) в ближней кильватерной зоне транспортного средства должно учитывать эффекты турбулентной диффузии, вихревой рециркуляции, теплопереноса и переноса частиц и т.д. Хотя подход LES также использовался для прогнозирования рассеивания загрязняющих веществ в каньоне городских улиц [Chabni et al., 1998; Walton et al., 2002; Liu, Barth, 2002; Liu et al., 2005] и на обочинах [Laatar et al., 2002], по всей видимости, подход LES не применяется для рассеивания загрязняющих веществ в зоне ближнего следа транспортных средств.

Крайне важно, что структура потока не только оказывает непосредственное влияние на здоровье человека, особенно на водителей, велосипедистов, пешеходов, людей, работающих поблизости, и пассажиров транспортных средств [Chan et al., 2001], но также составляет основную часть общего рассеивания загрязняющих веществ [Venkatram et al., 1999].

Приказом от 27 ноября 2019 г. N 804 Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации утверждена методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха.

Согласно данной методике для организации натурных обследований потоков автотранспорта производится анализ их территориального распределения, изучаются данные по размерам изучаемой территории, количеству проживающего на ней населения, схемы организации дорожного движения, собирается информация по расположению объектов, которые оказывают отрицательное воздействие на природную среду, а также изучается зависимость интенсивности дорожного движения от времени суток, дней недели, сезонов и годовые изменения в целом.

При проведении натурных обследований по установлению интенсивности движения и его структуры применяются следующие способы:

- фиксация движения автотранспортных средств визуальными методами
- использование видеозаписей для видеофиксации
- использование данных по непрерывному автоматическому учёту для видеофиксации

В качестве визуального способа обследования используется фиксация количества автотранспорта, которые проезжают по исследуемому участку автомобильной дороги.

Использование видеозаписей для видеофиксации осуществляется в два этапа:

- производится видеофиксация с сохранением видеоматериала, по которому можно идентифицировать типы, технические и конструктивные особенности автотранспортных средств, осуществляющих движение в потоке трафика;

- по видеофайлам визуально определяется интенсивность движения

В случае, когда используется способ по использованию видеозаписей для видеофиксации, в точке наблюдения за участком дороги на штативе устанавливается камера. В течение каждого часа от одного до двух раз производится 20-минутная запись.

При использовании данных по непрерывному автоматическому учёту для видеофиксации требуется наличие данных не менее чем за двухлетний период.

Значение удельного пробегового выброса выбросов i -го загрязнителя (г/с) от движущегося потока трафика на обследуемом участке автодороги с установленной протяженностью L (км) определяется согласно следующему выражению (2.1):

$$M_{M,i} = \frac{L}{1200} \sum_1^k M_{k,i}^L * G_k(G_{kn}) * r_{V_{k,j}} \quad (1)$$

где L (км) – протяженность участка автомобильной дороги;

$M_{k,i}^L$ (г/км) – удельный пробеговой выброс i -го загрязнителя для k -го типа автотранспортного средства (определяется по данным таблицы 2.1);

G_k – параметр, определяющий наибольшую интенсивность движения транспортного потока, который определяется как максимальное количество автотранспортных средств для каждой k -ой группы, прошедших через установленное сечение определенного участка автомобильной дороги за 20-минутный интервал времени в обоих направлениях движения и по всем полосам;

G_{kn} – число автотранспортных средств для каждого k типа, которые находились в «пробке» на всём обследуемом участке автомобильной дороги в 20 минутный интервал времени. Данный параметр используется вместо G_k в случае наличия на исследуемом участке «пробки».

k – количество групп всех транспортных средств, движущихся по обследуемому участку;

$r_{V_{k,j}}$ – поправочный коэффициент, с помощью которого учитывается зависимость изменения объема поступающих загрязняющих веществ в зависимости от средней скорости потока трафика ($V_{k,j}$ (км/час) на выбранном участке автодороги (всей автодороги), который определяется по таблице 2.2. Наименьшая скорость движения транспортного потока в «пробке» принимается равной 5 км/час. Для выбросов оксидов азота используется поправочный коэффициент $r_{V_{k,1}}(NO_x)$.

Таким образом, для того, чтобы оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха требуются трудоемкие наблюдения, проводимые не один год. Кроме того, в данном подходе используются усредненные значения объемов выбросов автотранспортом, без учёта технического состояния автомобильного парка, без учёта фактического содержания загрязнителей в атмосферном воздухе.

Результаты работы и их обсуждение

Для изучения фактического содержания некоторых вредных веществ (оксид углерода, углеводороды и диоксиды азота и серы) в атмосферном воздухе города Владикавказа нами были проведены измерения с помощью газоанализатора «Эко-лаб».

На рисунке 1 приведена зависимость концентрации оксида углерода и диоксидов азота и серы от удаления до автодороги. На графиках приведены рассчитанные регрессионные выражения связи уровня загрязнения атмосферного воздуха от удаления до дороги. Вычисляя по формуле (1) концентрацию оксида углерода в атмосферном воздухе на расстоянии 10 метров от края дорожного полотна, мы получили среднее значение $C_{CO}=0,0165$ мг/м³. Аналогично при экспериментальных наблюдениях, при удалении от дороги на расстояние 10 метров и более, концентрация CO и SO₂ снижалась практически до нуля.

Кроме того было установлено, что при установке газоанализатора на высоту 1 метр от уровня проезжей части концентрация оксида углерода уменьшается в 1,5 раза, углеводороды на такой высоте не фиксировались, а концентрация диоксида серы снизилась на 2 порядка. Не изменялась лишь концентрация диоксида азота.

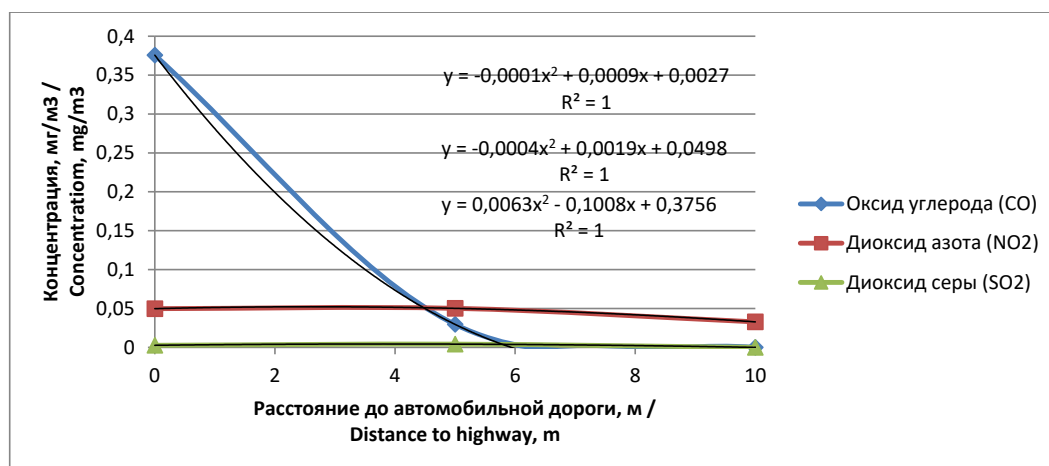


Рис. 1. Зависимость концентрации оксида углерода и диоксидов азота и серы от удаления до автодороги. Точка наблюдений «ул. Московская, Асик» /

Fig. 1. Dependence of the concentration of carbon monoxide and nitrogen and sulfur dioxides on the distance to the road. Observation point «st. Moscovskaya, Asik»

Для изучения влияния остановки и начала движения автотранспорта на уровень выбросов в атмосферу газоанализатор устанавливался непосредственно возле светофора. Пики концентраций изучаемых веществ совпадали со временем включения красного сигнала светофора, при этом ширина данных пиков зависела от количества остановившихся автомашин. В отсутствии автомашин концентрация всех измеряемых газов, за исключением диоксида азота, падала до нуля (рис. 2). При этом во время большей загруженности, когда двигался непрерывный поток автомашин, нулевые значения концентраций загрязнителей практически не регистрировались (рис. 3).

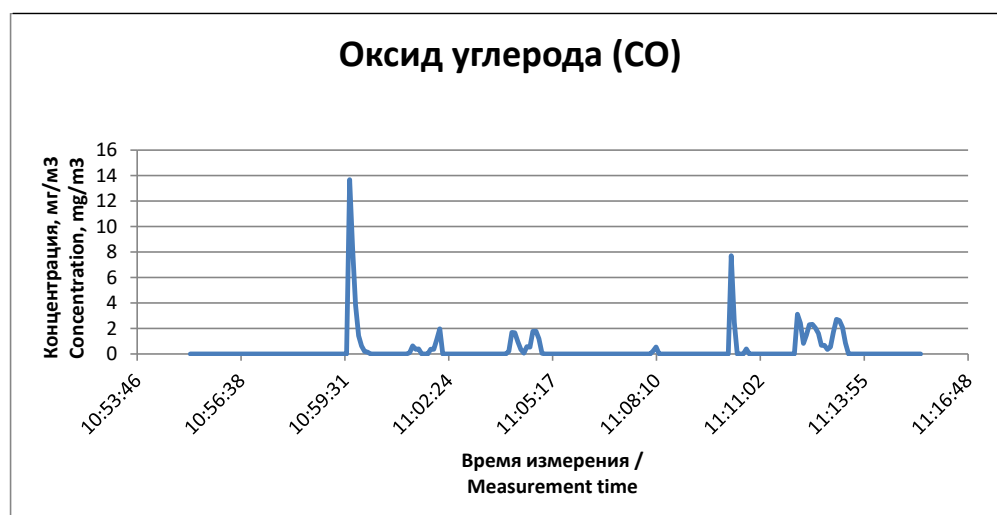


Рис. 2. Измерения концентрации оксида углерода возле светофора. Большая концентрация фиксировалась в моменты остановки большого количества автотранспорта /
Fig. 2. Measurements of carbon monoxide concentration near traffic lights. A greater concentration was recorded at the moments when a larger number of vehicles stopped

Таким образом, можно заключить, что учёт только ненулевых значений при расчёте средних значений концентраций позволяет смоделировать ситуацию полной загруженности автодороги, проводя измерения в любое дневное время и приводить эти значения к моментам максимальной загруженности. Данный подход позволяет получать значения более адекватные в сравнении с максимально измеренными концентрациями, т.к. подобные значения могут быть связаны с единственным транспортным средством, проезжающим мимо точки установки газоанализатора и выбрасывающим в атмосферу большое количество загрязняющих веществ.

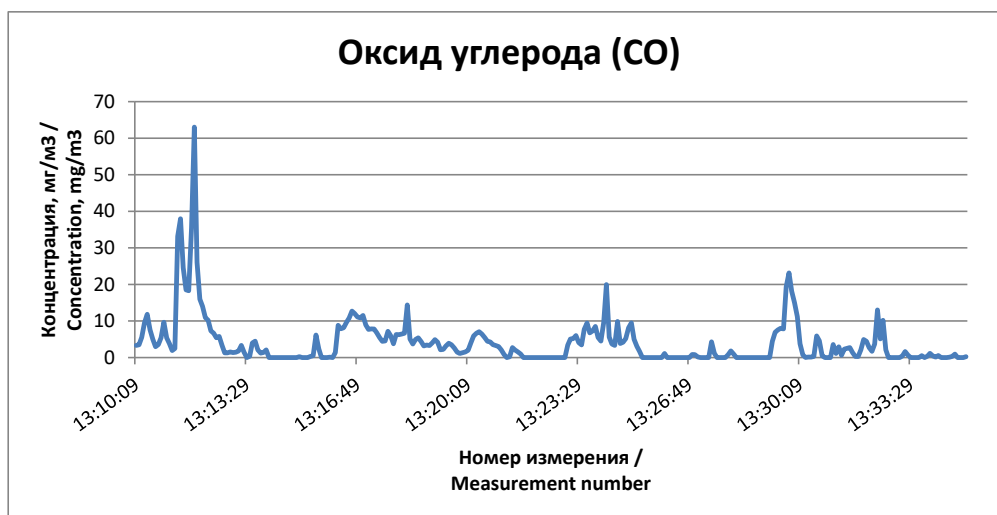


Рис. 3. Измерения концентрации оксида углерода во время большей загруженности автодороги /
Fig. 3. Measurements of carbon monoxide concentration during high traffic congestion

На основе приведенных выше исследований разработана собственная оригинальная методика экспериментальных исследований загрязненности атмосферного воздуха. Помимо определения мест установки прибора и длительности наблюде-

ний, сформирован подход к расчёту средней концентрации изучаемого вещества. Установлено, что в отсутствии автомобильного транспорта концентрации большинства изучаемых веществ снижаются до нуля, максимальные же концентрации достигаются в случае остановки, например при запрещающем сигнале светофора или при создании «пробок» на дороге, работающих транспортных средств вблизи установки прибора. При таком сценарии, когда наблюдается остановка транспортного потока, концентрации изучаемых веществ падают до нуля в единичных случаях, в целом же средний уровень становится ненулевым. Как известно, уровень транспортного потока очень сильно зависит от времени, так, к примеру существуют часы «пик», в которые уровень максимален и связан с перемещением людей с или на места работы, учёбы и т.д. В ночные же часы движение транспорта, как правило, минимально. Таким образом, измеряемые концентрации загрязняющих веществ будут достаточно сильно зависеть от времени экспериментальных наблюдений. В этой связи предлагается при расчётах средних концентраций не учитывать зафиксированные нулевые значения, моделирую ситуацию условного часа «пик» или случай возникновения затора. При таком подходе отпадает необходимость проведения экспериментальных исследований в одно и то же время для различных точек наблюдения. При учете, в том числе, и нулевых значений, сравнивать уровни загрязнения атмосферного воздуха в различных точках не представляется возможным, т.к. может наблюдаться значительная разница между величинами транспортного потока. При этом наиболее информативными являются данные полученные в моменты наибольшей загруженности автодорог. В данном случае величина концентраций вредных веществ будет уже зависеть от таких параметров, как ширина проезжей части и, как следствие, количество автотранспорта на автомобильной дороге, режимы работы светофоров, направление и скорость ветра и др.

Таким образом, разработанная методика проведения измерения концентраций загрязняющих веществ сводится к следующему. Установку прибора необходимо производить непосредственно возле края проезжей части, высота установки прибора не должна превышать 0,5 м от уровня дорожного полотна. Измерения проводятся в течение 25 минут. Для приведения полученных значений к среднему значению, необходимо учитывать только ненулевые концентрации, тем самым моделируя ситуацию измерения во время максимальной загруженности данного участка дороги.

На рисунке 4 приведена карта пространственного распределения значений предложенного авторами [Заалишвили и др., 2021] показателя загрязнения атмосферного воздуха $Z_{\text{атм}}$ для территории г. Владикавказа, расчет которого выполнен по данным, полученным согласно разработанной методике.

Хотя большинство зон представляются допустимыми по уровню воздействия на человека, тем не менее, данный подход позволил выделить наиболее неблагоприятные места. Для уточнения значений суммарного показателя необходимо провести дополнительные исследования по содержанию других загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. На построенной карте выделяются следующие участки дорог, подвергающиеся наибольшему загрязнению: основные въезды/выезды с города со стороны ст. Архонская, с. Гизель, Черменского круга, а также центральная (историческая) часть города. Загрязнение центральной части связано, очевидно, с невысокой шириной проезжих частей в исторической части, плохой проветриваемостью и высоким уровнем трафика на дорогах.

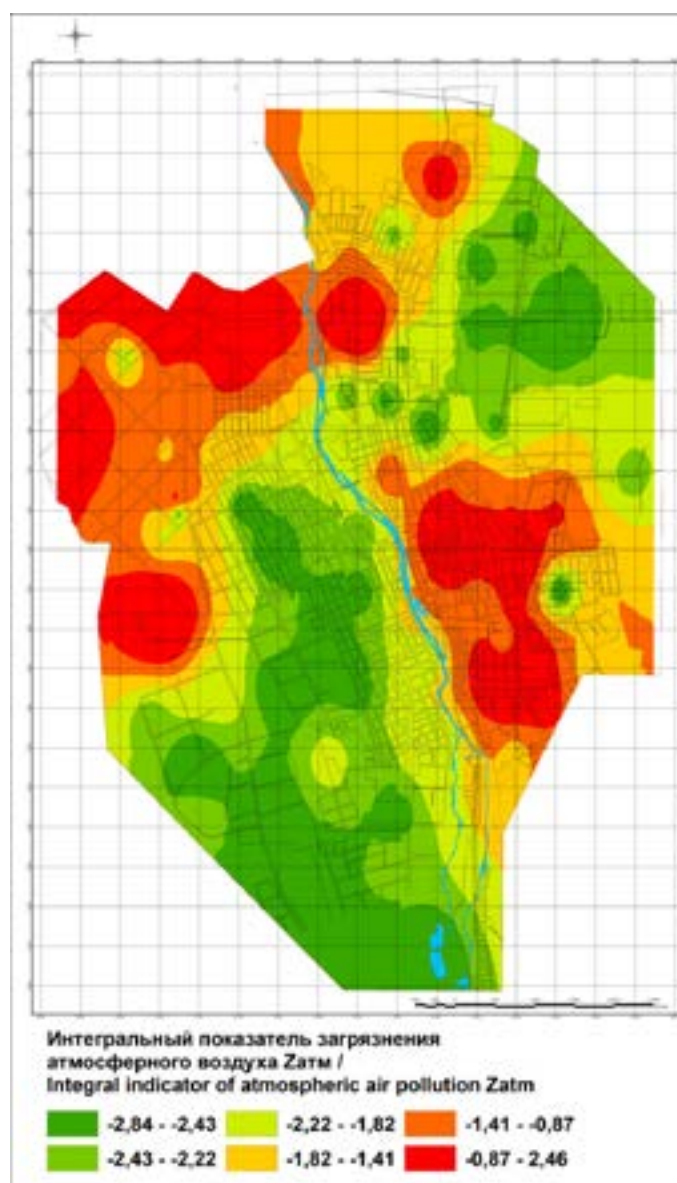


Рис. 4. Карта значений интегрального показателя загрязнения атмосферного воздуха $Z_{атм}$
г. Владикавказ /

Fig. 4. Map of values of the integral indicator of atmospheric air pollution Z_{atm} in Vladikavkaz

Выводы

Экономическое развитие всех регионов основано на доступе людей к товарам и услугам, которые обеспечиваются современной транспортной инфраструктурой. Автомобильный транспорт является основным способом транспортировки грузов и населения. В то же время положительные аспекты использования транспорта тесно связаны с загрязнением природной среды.

Установлено, что существующая методика оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха предполагает проведение многолетних трудоемких наблюдений. Кроме того, в данном подходе используются усредненные значения объемов выбросов автотранспортом, без учёта технического состояния автомобильного парка и без учёта фактического содержания загрязнителей в атмосферном воздухе.

Для изучения фактического содержания некоторых вредных веществ (оксид углерода, углеводороды и диоксиды азота и серы) в атмосферном воздухе города Владикавказа нами были проведены измерения с помощью газоанализатора «Эко-лаб».

Выполнены экспериментальные исследования зависимости концентраций изучаемых веществ в зависимости от таких параметров, как удаление прибора от автодороги, от высоты его установки, величины транспотного потока, режимов работы светодора.

На основе проведенных исследований разработана методика проведения измерения концентраций загрязняющих веществ.

Впервые для территории г. Владикавказа с использованием предложенного показателя $Z_{\text{атм}}$ построены карты загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом с выделением наиболее неблагоприятных зон.

Литература

1. Бекузарова С.А., Тебиева Д.И., Бекмурзов А.Д., Кебалова Л.А., Корбесова К.В. Фиторемедиация токсичности воздуха автомобильных дорог. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №2. – С. 127–135. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009
2. Вигдорович В. И., Габелко Н. В., Спасский Р. В. Загрязнение воздуха города Тамбова выхлопными газами. // Вестн. Удм. ун-та. 2005. № 8. С. 79–86.
3. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В. Оценка влияния автомобильного движения транспорта на загрязнение урбанизированных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 135–146. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011
4. Каташинская Л.И., Суппес Н.Е. Анализ источников загрязнения атмосферного воздуха в городе Ишиме и влияние химического загрязнения атмосферы на здоровье населения. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. №2-3. – С. 697–701.
5. Кобрин Н.В. Системы мониторинга загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом. // Экология и промышленность. – 2016. – №2(47). – С. 97–102.
6. Самолдина С.В., Медведева Ж.В., Дорохова Н.Д. Влияние атмосферного загрязнения на состояние хвои сосны обыкновенной села Дмитро-Титово Кытмановского района Алтайского края. // Новое слово в науке: перспективы развития. – 2016. – №1-1(7). – С. 35–39.
7. Ситников А.И., Толстых А.А., Власов В.А. Анализ моделей загрязнения воздуха для построения вычислительной системы мониторинга выбросов автотранспорта. / Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: Сб. ст. по матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2017. – С. 467–468.
8. Ситников А.И., Толстых А.А., Власов В.А. О возможности оценки загрязнения воздуха городской территории выхлопами автотранспорта на основании данных видеофиксации. / Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных обстоятельств: Сб. ст. по матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч., 28-29 апр. 2016 г. – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2016. – С. 488–489.
9. Сокол П.А., Жердев А.В. Анализ воздействия отработанных газов двигателя внутреннего сгорания на экологическую безопасность. // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2018. – Т. 1. – С. 605–607.
10. Сонов А.А., Ажахова Л.С., Теунова Ф.А. Экспериментальное исследование химического состава атмосферных осадков и определение степени загрязнения атмосферы выхлопными газами. // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – №3-1. – С. 27–30.

11. Степанова Л.П. Оценка изменения почвенной биоты в условиях воздействия различных уровней поллютантов. / Степанова Л.П., Писарева А.В., Яковлева Е.В., Раскатов В.А. // Труды Карадагской научной станции им. Т.И.Вяземского – природного заповедника РАН. – 2019. – №2(10). – С. 30–41.
12. Шулепова О.В., Сидоров П.Т. О влиянии автотранспорта на окружающую среду на примере города Тюмени. // Агропродовольственная политика России. – 2018. – №3(75). – С. 45–47.
13. Benson P.E., A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models. // *Atmospheric Environment*. – 1992. – 26B. – pp. 379–390.
14. Chabni A. Modelling of pollutant dispersion in urban street canyons by means of a large-eddy simulation approach. / Chabni A., LeQue' re' P., Tenaud C. Laatar H. // *International Journal Vehicle Design*. – 1998. – Vol. 20. – pp. 88–95.
15. Chamberlain A.C. Effect of airborne lead on blood lead. // *Atmos Environ*. – 1983. – Vol. 17. – pp. 677–692.
16. Chan T.L. Monte Carlo simulation of nitrogen oxides dispersion from a vehicular exhaust plume and its sensitivity studies. / Chan T.L., Dong G., Cheung C.S., Leung C.W., Wong C.P., Hung W.T. // *Atmospheric Environment*. – 2001. – Vol. 35. – pp. 6117–6127.
17. Chan T.L. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. / Chan T.L., Dong G., Leung C.W., Cheung C.S., Hung W.T. // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36. – pp. 861–872.
18. Chock D.P. A simple line-source model for dispersion near roadways. // *Atmospheric Environment*. – 1978. – Vol. 12. – pp. 823–829.
19. Elwood P.C. The sources of lead in blood. // *Sci. Total Environ*. – 1986. – Vol. 52. – pp. 1–23.
20. Elwood P.C., Gallacher J.E.J. Lead in petrol and levels of lead in blood: scientific evidence and social policy. // *J. Epidemiol and Community Health*. – 1984. – Vol. 38. – pp.315–318.
21. Elwood P.C. Blood lead and petrol lead. *Br. Med. j.* – 1983. – Vol. 286. – pp. 1515.
22. Eskridge R.E., Hunt J.C.R. Highway modeling. Part I: prediction of velocity and turbulence fields in the wake of vehicles. // *Journal of Applied Meteorology*. – 1979. – Vol. 18. – pp. 387–400.
23. Fomunung I., Washington S., Guensler R. A statistical model for estimating oxides of nitrogen emissions from light duty motor vehicles. // *Transportation Research Part*. – 1999. – D4. – pp. 333–352.
24. Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: Theory and application [Review]. // *Critical reviews in plant sciences*. – 2001. – Vol. 20(4). – pp. 309–371. DOI: 10.1016/s0735-2689(01)80040-x
25. Hoek G. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the netherlands: a cohort study. // *Lancet*. – 2002. – Vol. 360(9341). – pp. 1203–1209.
26. Jankowski K. Lead and cadmium content in some grasses along expressway areas/ / Jankowski K., Jankowska J., Ciepiela G. A., Sosnowski J., Wisniewska-Kadzajan B., Kolczarek R., Deska J. // *Journal of Elementology*. – 2014. – Vol. 19(1). – pp. 119–128. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.1.591
27. Karim M.M., Mastsui H., Guensler R. A mathematical model of wind flow, vehicle wake, and pollution concentration in urban road microenvironments. Part II: Model results. // *Transportation Research*. – 1998. – Part D 3. – pp. 171–191.
28. Kim D.H., Gautam M., Gera D. On the prediction of concentration variations in a dispersing heavy-duty truck exhaust plume using k ϵ turbulent closure. // *Atmospheric Environment*. – 2001. – Vol. 35. – pp. 5267–5275.
29. Kosta H., Liiv S. Spatial and temporal trends of heavy metal accumulation in mosses in Estonia. // *Ecosystems and Sustainable Development Viii*. – 2011. – Vol. 133. DOI: 10.2495/eco110121

30. Künzli N et al. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. // *Lancet*. – 2000. – Vol. 356(9232). – pp. 795–801.
31. Laatar A.H. 2D large eddy simulation of pollutant dispersion around a covered roadway. / Laatar A.H., Benahmed M., Belghith A., LeQue're' P. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2002. – Vol. 90. – pp.617–637.
32. Liu C.H., Barth M.C. Large-eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon. // *Journal of Applied Meteorology*. – 2002. – Vol. 41. – pp. 660–673.
33. Liu C.H., Leung D.Y.C., Barth M.C. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39. – pp. 1567–1574.
34. Liu J.J., Chan C.C., Jeng F.T. Predicting personal exposure levels to carbon monoxide (CO) in Taipei, based on the actual CO measurements in microenvironments and a Monte Carlo simulation methods. // *Atmospheric Environment*. – 1994. – Vol. 28. – pp. 2361–2368.
35. McClellan RO Health effects of diesel exhaust: a case study in risk assessment. // *Am. Ind. Hyg. Assoc.* – 1986. – Vol. 47. – pp. 1-13.
36. Petersen W.B. User's guide for HIWAY-2, highway air pollutant model. / EPA-600/8-80-018. – 1980.
37. Riddle A. Comparisons between the FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling. / Riddle A., Carruthers D., Sharpe A., McHugh C., Stocker J. // *Atmospheric Environment*. – 2004. – Vol. 38. – pp. 1029–1038.
38. Schroeder WH. Toxic trace elements associated with airborne particulate matter: a review. / Schroeder WH., Dobson M., Kane DM., Johnson ND. // *JAPCA*. – 1987. – Vol. 37. – pp. 1267-1285.
39. Sharma P., Khare M. Modelling of vehicular exhausts—a review. // *Transportation Research*. – 2001. – Part D 6. – pp. 179–198.
40. Sutherland R.A., Tolosa C.A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. // *Environmental Pollution*. – 2000. – Vol. 110(3). – pp. 483-495. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00311-5.
41. Turkyilmaz A. Changes in heavy metal accumulation depending on traffic density in some landscape plants. / Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin, M., Saleh E.A.A. // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2018. – Vol. 27(5). – pp. 2277-2284. DOI: 10.15244/pjoes/78620.
42. Venkatram A. Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved road. / Venkatram A., Fitz D., Bumiller K., Du S., Boeck M., Ganguly C. // *Atmospheric Environment*. – 1999. – Vol. 33. – pp. 1093–1102.
43. Walton A., Cheng A.Y.S., Yeung W.C. Large-eddy simulation of pollutant dispersion in an urban street canyon—Part I: comparison with filed data. // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36. – pp. 3601–3613.
44. Wang M.E. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China. / Wang M.E., Bai Y.Y., Chen W.P., Markert B., Peng C., Ouyang Z.Y. // *Environmental Pollution*. – 2012. – Vol. 161. – pp. 235-242. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.030.
45. Wheeler G.L., Rolfe G.L. The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and vegetation. // *Environ. Pollut.* – 1979. – Vol. 18. – pp. 265-274.
46. Zalakeviciute R. Chemical characterization of urban pm10 in the tropical Andes. / Zalakeviciute R., Rybarczyk Y., Granda-Albuja M.G., Suarez M.V.D., Alexandrino K. // *Atmospheric Pollution Research*. – 2020. – Vol. 11(2). – pp. 343-356. DOI: 10.1016/j.apr.2019.11.007.
47. Zhang C.S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. // *Environmental Pollution*. – 2006. – Vol. 142(3). – pp. 501-511. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.10.028.
48. Zimmerman J.R., Thompson R.S. User's guide for HIWAY, a highway air pollutant model. – 1975. – EPA-650/4-74-008.

References

1. Bekuzarova S. A., Tebieva D. I., Bekmurzov A. D., Kebalova L. A., Korbesova K. V. Phytoremediation of air toxicity of roads. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No.2. pp. 127–135. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009.
2. Vigdorovich V.I., Gabelko N.V., Spassky R.V. Air pollution in the city of Tambov by exhaust gases. *Bulletin of Udmurt University*. 2005. No.8. pp. 79–86. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V. Assessment of the Impact of Road Traffic on the Pollution of Urbanized Territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.4. 135–146. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
4. Katashinskaya L.I., Suppes N.E. Analysis of sources of atmospheric pollution in the city of Ishim and the impact of chemical pollution on the health of the population. In: *Proc. of the Samara Scientific Center of RAS*. 2016. Vol. 18. No.2–3. pp. 697–701. (In Russ.)
5. Kobrina N.V. Environmental monitoring systems for road transport pollution. *Ecology and Industry*. 2016. No.2. Issue 47. pp. 97–102. (In Russ.)
6. Samoldina S.V., Medvedeva Zh.V., Dorokhova N.D. Influence of atmospheric pollution on the condition of the needles of ordinary pine in the village of Dmitro-Titovo, Kytmanovsky district, Altai Territory. *New Word in Science, Prospects for Development*. 2016. No.1-1. Issue 7. pp. 35–39. (In Russ.)
7. Sitnikov A.I., Tolstykh A.A., Vlasov V.A. Analysis of air pollution models for building a computational monitoring system for vehicle emissions. In: *Proc. of the All-Russian Scientific Conference Fire Safety, Problems and Prospects. Voronezh. VI GPS EMERCOM of Russia, 2017*. pp. 467–468. (In Russ.)
8. Sitnikov A.I., Tolstykh A.A., Vlasov V.A. On the possibility of assessing air pollution of urban areas by vehicle exhaust emissions based on video recording data. In: *Proc. of the All-Russian Scientific Conference Modern Technologies for Civil Defense and Emergency Response. April 28–29, 2016, Voronezh. VI GPS EMERCOM of Russia. 2016*. pp. 488–489. (In Russ.)
9. Sokol P.A., Zherdev A.V. Analysis of the impact of internal combustion engine exhaust gases on environmental safety. *Problems of Ensuring Safety in Emergency Situations*. 2018. Vol. 1. pp. 605–607. (In Russ.)
10. Sonov A.A., Azhakhova L.S., Teunova F.A. Experimental study of the chemical composition of atmospheric precipitation and determination of the degree of air pollution by exhaust gases. *Modern Trends in Science and Technology*. 2016. No.3–1. pp. 27–30. (In Russ.)
11. Stepanova L.P., Pisareva A.V., Yakovleva E.V., Raskatov V.A. Assessment of changes in soil biota under the influence of various levels of pollutants. In: *Proc. of the Karadag Scientific Station named after T. I. Vyazemsky – Nature Reserve of RAS*. 2019. No.2(10). pp. 30–41. (In Russ.)
12. Shulepova O.V., Sidorov P.T. On the impact of transportation on the environment using the example of the city of Tyumen. *Agro-Food Policy of Russia*. 2018. No. 3. Issue 75. pp. 45–47. (In Russ.)
13. Benson P.E., A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models. *Atmospheric Environment*. 1992. 26B. pp. 379–390.
14. Chabni A. Modelling of pollutant dispersion in urban street canyons by means of a large-eddy simulation approach. Chabni A., LeQue' re' P., Tenaud C. Laatar H. *International Journal Vehicle Design*. 1998. Vol. 20. pp. 88–95.
15. Chamberlain A.C. Effect of airborne lead on blood lead. *Atmos Environ*. 1983. Vol. 17. pp. 677–692.
16. Chan T.L., Dong G., Cheung C.S., Leung C.W., Wong C.P., Hung W.T. Monte Carlo simulation of nitrogen oxides dispersion from a vehicular exhaust plume and its sensitivity studies. *Atmospheric Environment*. 2001. Vol. 35. pp. 6117–6127.
17. Chan T.L. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street

canyon. Chan T.L., Dong G., Leung C.W., Cheung C.S., Hung W.T. *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. pp. 861–872.

18. Chock D.P. A simple line-source model for dispersion near roadways. *Atmospheric Environment*. 1978. Vol. 12. pp. 823–829.

19. Elwood P.C. The sources of lead in blood. *Sci. Total Environ*. 1986. Vol. 52. pp. 1–23.

20. Elwood P.C., Gallacher J.E.J. Lead in petrol and levels of lead in blood: scientific evidence and social policy. *J. Epidemiol and Community Health*. 1984. Vol. 38. pp. 315–318.

21. Elwood P.C. Blood lead and petrol lead. *Br. Med. j.* 1983. Vol. 286. pp. 1515.

22. Eskridge R.E., Hunt J.C.R. Highway modeling. Part I: prediction of velocity and turbulence fields in the wake of vehicles. *Journal of Applied Meteorology*. 1979. Vol. 18. pp. 387–400.

23. Fomunung I., Washington S., Guensler R. A statistical model for estimating oxides of nitrogen emissions from light duty motor vehicles. *Transportation Research Part*. 1999. D4. pp. 333–352.

24. Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: Theory and application [Review]. *Critical reviews in plant sciences*. 2001. Vol. 20(4). pp. 309–371. DOI: 10.1016/s0735-2689(01)80040-x

25. Hoek G. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet*. 2002. Vol. 360(9341). pp. 1203–1209.

26. Jankowski K., Jankowska J., Ciepiela G. A., Sosnowski J., Wisniewska-Kadzaj B., Kolczarek R., Deska J. Lead and cadmium content in some grasses along expressway areas. *Journal of Elementology*. 2014. Vol. 19. No. 1. pp. 119–128. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.1.591

27. Karim M.M., Mastui H., Guensler R. A mathematical model of wind flow, vehicle wake, and pollution concentration in urban road microenvironments. Part II: Model results. *Transportation Research*. 1998. Part D 3. pp. 171–191.

28. Kim D.H., Gautam M., Gera D. On the prediction of concentration variations in a dispersing heavy-duty truck exhaust plume using k-ε turbulent closure. *Atmospheric Environment*. 2001. Vol. 35. pp. 5267–5275.

29. Kosta H., Liiv S. Spatial and temporal trends of heavy metal accumulation in mosses in Estonia. *Ecosystems and Sustainable Development* VIII. 2011. Vol. 133. DOI: 10.2495/eco110121

30. Künzli N et al. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*. 2000. Vol. 356(9232). pp. 795–801.

31. Laatar A.H. 2D large eddy simulation of pollutant dispersion around a covered roadway. Laatar A.H., Benahmed M., Belghith A., LeQue' re' P. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002. Vol. 90. pp. 617–637.

32. Liu C.H., Barth M.C. Large-eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon. *Journal of Applied Meteorology*. 2002. Vol. 41. pp. 660–673.

33. Liu C.H., Leung D.Y.C., Barth M.C. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. *Atmospheric Environment*. 2005. Vol. 39. pp. 1567–1574.

34. Liu J.J., Chan C.C., Jeng F.T. Predicting personal exposure levels to carbon monoxide (CO) in Taipei, based on the actual CO measurements in microenvironments and a Monte Carlo simulation methods. *Atmospheric Environment*. 1994. Vol. 28. pp. 2361–2368.

35. McClellan R.O. Health effects of diesel exhaust: a case study in risk assessment. *Am. Ind. Hyg. Assoc*. 1986. Vol. 47. pp. 1–13.

36. Petersen W.B. User's guide for HIWAY-2, highway air pollutant model. EPA-600/8-80-018. 1980.

37. Riddle A. Comparisons between the FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling. Riddle A., Carruthers D., Sharpe A., McHugh C., Stocker J. *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. pp. 1029–1038.

38. Schroeder W.H. Toxic trace elements associated with airborne particulate matter: a review. Schroeder W.H., Dobson M., Kane D.M., Johnson N.D. *JAPCA*. 1987. Vol. 37. pp. 1267–1285.

39. Sharma P., Khare M. Modelling of vehicular exhausts - a review. *Transportation Research*. 2001. Part D 6. pp. 179–198.
40. Sutherland R.A., Tolosa C.A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. *Environmental Pollution*. 2000. Vol. 110(3). pp. 483–495. DOI: 10.1016/S0269-7491(99)00311-5.
41. Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin, M., Saleh E.A.A. Changes in heavy metal accumulation depending on traffic density in some landscape plants. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2018. Vol. 27. No. 5. pp. 2277–2284. DOI: 10.15244/pjoes/78620.
42. Venkatram A., Fitz D., Bumiller K., Du S., Boeck M., Ganguly C. Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved road. *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33. pp. 1093–1102.
43. Walton A., Cheng A.Y.S., Yeung W.C. Large-eddy simulation of pollutant dispersion in an urban street canyon. Part I: comparison with filed data. *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. pp. 3601–3613.
44. Wang M.E., Bai Y.Y., Chen W.P., Markert B., Peng, C., Ouyang Z.Y. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China. *Environmental Pollution*. 2012. Vol. 161. pp. 235–242. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.030.
45. Wheeler G.L., Rolfe G.L. The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and vegetation. *Environ. Pollut.* 1979. Vol. 18. pp. 265-274.
46. Zalakeviciute R., Rybarczyk Y., Granda-Albuja M.G., Suarez M.V.D., Alexandrino K. Chemical characterization of urban pm10 in the tropical Andes. *Atmospheric Pollution Research*. 2020. Vol. 11. No. 2. pp. 343-356. DOI: 10.1016/j.apr.2019.11.007.
47. Zhang C.S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental Pollution*. 2006. Vol. 142(3). pp. 501-511. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.10.028.
48. Zimmerman J.R., Thompson R.S. User's guide for HIWAY, a highway air pollutant model. 1975. EPA-650/4-74-008.

УДК 551.1:379.85+392

DOI: [10.46698/VNC.2023.14.67.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.14.67.012)

Оригинальная статья

Геологический и этнокультурный туризм: перспективы сопряженного развития на Северо-Восточном Кавказе

Х.Ш. Забураева^{ID}, Ч.Ш. Забураев^{ID}, М.Б. Седиева^{ID}

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,
Россия, 364051, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а, e-mail: eveggne@mail.ru

Статья поступила: 27.04.2023, доработана: 25.05.2023, одобрена к публикации: 01.06.2023

Резюме: Актуальность работы. Проблема сохранения природного и этнокультурного наследия, самобытности и многонациональной культуры за последние десятилетия начала приобретать глобальный характер. Рост этнического самосознания усиливает внимание к проблемам сохранения самобытности, культурного разнообразия, этнического и природного наследия. В условиях глобализации познание и популяризация объектов природно-культурного наследия и сохранение культурной памяти становятся важным средством защиты этнических культур и развития культурного разнообразия. **Цель работы** – исследование особенностей геологического, этнокультурного и экологического туризма, выявление перспектив их сопряженно-параллельного развития на Северо-Восточном Кавказе. **Методы работы:** анализ и синтез, обобщение, контент-анализ, метод экспертных оценок, сравнительно-географический, системный и геоситуационный подходы. **Результаты работы.** Обоснована возможность и целесообразность сопряженно-параллельного развития геологического и этнокультурного направлений туризма как экологически более безопасных форм рекреационного природопользования. Выявлены предпосылки развития таких разновидностей геологического туризма, как спелеотуризм, геммотуризм, биогеологический туризм и др. Раскрыты зарубежные аналоги обсуждаемых понятий. Эволюция содержания этих понятий свидетельствует о переходе от введения в проблематику к развитию идей и глобализации геологического туризма. Контент-анализ зарубежных источников выявил переход от анализа сегмента культурного туризма, с делением туристов на обычных и специфических, к более расширенной и углубленной его трактовке. На примерах развития туризма в горных регионах Северо-Восточного Кавказа выявлены географические особенности распространения природных и историко-культурных объектов и видов рекреации. Перспективы дальнейшего развития экологически ориентированных направлений рекреационного природопользования в горных регионах связываются с их активизацией в условиях особо охраняемых природных комплексов (заповедников, заказников, природных парков и других объектов). Особое внимание уделено брендированию рекреационных проектов с учетом национальных особенностей гастрономии, художественно-культурного дизайна, литературы и искусства. Среди высокобрендовых объектов культурного наследия ЮНЕСКО исторический город-крепость Дербент (Дагестан), город-Герой Грозный (Чечня) и высокогорный природный заповедник Эрзи (Ингушетия).

Ключевые слова: геотуризм, экотуризм, этнотуризм, анализ понятий, традиции и инновации, географические особенности, перспективы сопряженного развития.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-17-00218 «Экологический туризм и рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе».

Для цитирования: Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Геологический и этнокультурный туризм: перспективы сопряженного развития на Северо-Восточном Кавказе. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 149-160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012.

DOI: [10.46698/VNC.2023.14.67.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.14.67.012)

Original paper

Geological and ethnocultural tourism: prospects for interrelated development in the North-Eastern Caucasus

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

Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences, 21a V. Alieva Str., Grozny
364051, Russian Federation, e-mail: eveggne@mail.ru

Received: 27.04.2023, revised: 25.05.2023, accepted: 01.06.2023

Abstract: Relevance. The problem of preserving natural and ethnocultural heritage, identity and multinational culture over the past decades has begun to take on a global character. The rise of ethnic identity reinforces attention to issues of identity preservation, cultural diversity, ethnic and natural heritage. In the context of globalization, the cognition and popularization of objects of natural and cultural heritage and the preservation of cultural memory become an important means of protecting ethnic cultures and developing cultural diversity. **The aim** of the work is to study the features of geological, ethnocultural and ecological tourism, to identify the prospects for their conjugate-parallel development in the Northeast Caucasus. **Methods** of analysis and synthesis, generalization, content analysis, expert assessments, a comparative geographical method, systemic and geosituational approaches were used. **Results.** The possibility and feasibility of concurrent development of geological and ethnocultural directions of tourism as environmentally safer forms of recreational nature management is justified. The prerequisites for the development of such varieties of geological tourism as speleotourism, gemotourism, biogeological tourism, etc. have been identified. Foreign analogues of the discussed concepts are disclosed. The evolution of the content of these concepts indicates a transition from introduction into issues to the development of ideas and globalization of geological tourism. Content analysis of foreign sources revealed a transition from the analysis of the cultural tourism segment, with the division of tourists into ordinary and specific to a more expanded and in-depth interpretation of it. Using examples of tourism development in the mountainous regions of the Northeast Caucasus, geographical features of the distribution of natural and historical and cultural objects and types of recreation were identified. Prospects for the further development of environmentally oriented areas of recreational nature management in mountain regions are associated with their activation in the conditions of specially protected natural complexes (reserves, reserves, natural parks, etc.). Particular attention is paid to the branding of recreational projects, taking into account the national characteristics of gastronomy, artistic and cultural design, literature and art. Among the high-brand UNESCO cultural heritage sites are the historic fortress city of Derbent (Dagestan), the Hero city of Grozny (Chechnya) and the highland natural reserve Erzi (Ingushetia).

Keywords: geotourism, ecotourism, ethnotourism, concept analysis, traditions and innovations, geographical features, prospects for associated development.

Acknowledgments: *The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00218 "Ecological tourism and recreational nature management in the North-East Caucasus").*

For citation: Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Geological and ethnocultural tourism: prospects for interrelated development in the North-Eastern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 149-160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012.

Введение

Актуальность проблемы сохранения природного, этнокультурного наследия, самобытности и многонациональной культуры подтверждается тем, что за последние десятилетия она начала приобретать глобальный характер. Поездки с позна-

вательной, этнокультурной мотивацией становятся массовыми и широко распространенными. Рост этнического самосознания усиливает внимание к проблемам сохранения самобытности, культурного разнообразия, этнического и природного наследия. Особую актуальность данная проблема обретает в условиях горных регионов, поскольку рекреационная деятельность здесь остается приоритетной [Бадов и др., 2022].

Для геотуристов особый интерес представляют геоморфологические, геологические и тектонические структуры (скалы, ущелья, пещеры, озера и др.), специфичность геологических процессов той или иной территории (морские приливы, землетрясения и др.), трансформированные ландшафты (шахты, карьеры и др.) и многое другое [Гордеева, 2020; Хулелидзе, 2016; Чотчаев и др., 2021].

Туризм зачастую интерпретируется в качестве ключевого фактора в деле сохранения материальных и нематериальных элементов культурного наследия коренных народов, включая языки, истории, песни, искусство, танцы, методы охоты, ритуалы и обычаи [Ruhanen et al., 2019]. В условиях глобализации познание и популяризация объектов культурного наследия и сохранение культурной памяти становятся важным средством защиты этнических культур и развития культурного разнообразия.

Целью работы является исследование особенностей геологического, этнокультурного и экологического туризма, выявление перспектив их сопряженно-параллельного развития на Северо-Восточном Кавказе.

Методы исследований

В работе применялись методы анализа и синтеза, обобщения, контент-анализа, экспертных оценок, сравнительно-географический метод, системный и геоситуационный подходы.

Результаты работы и их обсуждение

Геологический туризм – относительно новое направление туристско-рекреационной деятельности [Gordon, 2012; Dowling, 2014]. Исследования публикаций, посвященных вопросам геотуризма в международной базе цитирования (Scopus) за период 1984–2019 гг., выявили эволюцию взглядов на содержание этого понятия [Herrera-Franco et al., 2020]. Так, в период 1984–2005 гг. публикации были связаны с определением геотуризма, в 2006–2012 гг. – с теоретическим развитием, а с 2012 г. резко увеличилось количество исследований в практической сфере геотуризма и это понятие обрело глобальный характер.

В России геотуризм лишь начинает развиваться как самостоятельное направление [Сапего и др., 2023]. По некоторым представлениям, разделяемым авторами данной статьи, геотуризм находится на стыке экологии, геологии, географии и геохимии [Herrera-Franco et al., 2020] и интерпретируется как направление экологического и научного туризма [Абалаков, 2022]. Ряд зарубежных исследователей определяет его как многоцелевой вид туризма, использующий природные объекты и ландшафты, не только в рекреационных целях, но и для получения знаний об интересных научных фактах, касающихся строения Земли [Pralong, 2006; Gordon, 2018]. В частности, получение геологических знаний в таких областях как петрография, минералогия, стратиграфия, тектоника, палеонтология и др. Геологический туризм

тесно связан с природопользованием, поскольку туристы могут участвовать в процессах коллекционирования определенных минералов и горных пород [Гордеева, 2020].

Геотуризм охватывает целый ряд посетителей – от специалистов до обычных любителей и наряду с геоконсервацией предполагает учет социальных, культурных, экономических и геоэкологических интересов [Gordon, 2018]. Зачастую этот вид туризма связывают с формированием геопарков [Farsani et al., 2014; Newsom et al., 2012]. В структуре геологического туризма выделяют: историко-геологический, геолого-минералогический, разведочный (золотоискательский) и спелеотуризм [Сапего, 2023]. Полагаем, что эту классификацию следует дополнить биогеологическим направлением туризма, связанным с посещением древних биогенных построек, коралловых построек, рифов и др.

Достаточно сложное и разнообразное геологическое строение и тектоническая эволюция Северо-Восточного Кавказа обусловили формирование основных макроформ современного рельефа и их морфологический облик. Основные черты современного рельефа Большого Кавказа были заложены в конце миоцена (в плейстоцене) [Головлев, 2007]. Основу геологического туризма формируют геологические памятники. Северо-Восточный Кавказ относится к орографическому комплексу Большого Кавказа, который является частью Крымско-Кавказской складчатой страны. Здесь выделяют семь типов геологических памятников: стратиграфический и геохронологический; минералого-петрографический; палеонтологический; тектонический; геоморфологический; гидрологические и гидроминеральные объекты; живописные [Юсупов и др., 2020]. К примеру, зона разрывного нарушения в верхнеюрских отложениях (рис. 1).



Рис. 1. Зона разрывного нарушения в верхнеюрских отложениях Горной Чечни, 2022 г.
(фото Х.Ш. Забуровой) /

Fig. 1. The zone of rupture in the Upper Jurassic deposits of Mountain Chechnya, 2022
(photo by Kh.Sh. Zaburaeva)

Определенные перспективы в горных регионах Кавказа связывают с развитием *гемотуризма*, поскольку Большой Кавказ характеризуется наличием в недрах горного хрусталя, раухтопаза, опала, халцедона, яшм, барита, целестина, кальцита, ониксов, агатов, турмалина, граната, жадеита, нефрита и других цветных камней [Гусев, 2021]. К примеру, в Дагестане гемотуристские маршруты могут быть проложены на месторождениях целестина (Ихинское, Зуримахинское, Ханцкаркамахинское, Кхиутское и др.), который встречается в виде кристаллов светло-голубого и небесно-голубого цветов или их друзовидных агрегатов. Наиболее концентрированная полоса развития месторождений и проявлений горного хрусталя приурочена к водораздельной части Бокового хребта Восточного Кавказа и проходит по территориям Дагестана, Чечни, Ингушетии и Северной Осетии [Гусев, 2021]. Для гемотуристских маршрутов наиболее перспективны Приказбекский и Восточно-Кавказский хрусталеносные пояса (например, Шандонское месторождение в верховьях р. Шандон в Ингушетии). В верховьях р. Тюалой (Чеченская Республика) отмечены проявления медно-полиметаллических руд.

Этнокультурный туризм зачастую интерпретируется в качестве туристской поездки в места проживания исторически сложившейся общности людей, характеризующейся собственной, неповторимой структурой и стереотипом поведения, уникальной и самобытной духовной и материальной культурой, природным и культурным наследием [Бутузов, 2009]. Он базируется на интересе туристов к подлинной жизни народов, к их традициям, обычаям, ремеслам, фольклору и иным видам творчества [Kumar, Dhir, 2020; McKercher, 2020].

В качестве самостоятельного направления этот вид туризма сформировался относительно недавно. Согласно исследованиям В.И. Хоменко с соавтором [Хоменко, 2019], этнокультурный туризм находится на стадии первоначального становления как отдельного вида туристской индустрии. Зачастую проводятся параллели между этнокультурным и экологическим (научно-познавательным) туризмом, поскольку первый вид требует от путешественников особой культуры поведения, особого уважения к местным обычаям и традициям [Милинчук, 2021].

В зарубежной литературе в качестве синонима обсуждаемого понятия используется англоязычный термин «cultural tourism» [Noonan, Rizzo, 2017; Seyfi et al., 2019; Cros et al., 2020]. Он подразумевает познание истории и культуры страны, знакомство с особенностями архитектуры, живописи, музыки, народных промыслов и в целом с укладом жизни людей. К важнейшим неоспоримым преимуществам культурного туризма относят отсутствие сезонного характера [Vergori et al., 2020]. В исследовании [Richards, 2018] выявлены некоторые тенденции в интерпретации данного понятия в научной литературе. Так, ранние дискуссии преимущественно были нацелены на сегмент культурного туризма, с делением туристов на обычных и специфических. В последующих исследованиях прослеживается более широкая и углубленная трактовка содержания данного понятия.

Россия обладает богатейшим ресурсным потенциалом для развития этнокультурного туризма, который значится в числе перспективных направлений туристского бизнеса, привлекающих значительное число туристов [Милинчук, 2021]. Кавказ – величественная горная страна, находясь между Европой и Азией, в различные периоды своего исторического развития заинтересовывала представителей многих стран и народов. Здесь оседали этносы многих генетических типов, языковых семей и вероисповеданий. Из 130 российских этносов только автохтонных на Северном Кавказе – 60 [Гамзатов, 2009].

Регионы восточного Кавказа отличаются богатейшей историей и древнейшей культурой, разнообразными объектами и памятниками культурного и природного наследия, которые могут превратиться в мощную ресурсную базу развития этнокультурного туризма. Внутриэтнические связи формировались в условиях длительного развития систем природопользования [Забураева, Краснов, 2014].

Различные по происхождению народы с древнейших времен, начиная с палеолита, свободно расселялись на различных частях территории Северо-Восточного Кавказа. В Дагестане, к примеру, совместно проживают не менее 30-ти народностей, каждой из которых присущи свои традиции, обычаи и культура [Мустафаева, Хиясова, 2023]. Помимо самобытной культуры, традиций и других факторов многих из них объединяли этногенетические и природные факторы. Примерами объектов сопряженного развития геотуризма и этнотуризма на северо-востоке Кавказа могут служить объекты природного и этнокультурного наследия при входе в Аргунское ущелье (рис. 2).



Рис. 2. Объекты природного и культурного наследия при входе в Аргунское ущелье, Чеченская Республика, 2022 г. (фото Ч.Ш. Забураева) /

Fig. 2. The objects of natural and cultural heritage at the entrance to the Argun Gorge, Chechen Republic, 2022 (photobyCh.Sh. Zaburaev)

Традиции и обычаи как историческая основа этнотуризма. По древней культуре и традициям природопользования народы Северо-Восточного Кавказа уникальны [Гаджалова, 2022; Забураева, 2022]. Наряду с современными видами производств и хозяйственной деятельности здесь население с древних времен и до настоящего времени занимается различными ремеслами и промыслами (изготовление домашней утвари, орудий труда, бурок, паласов, ковров, гончарных и ювелирных изде-

лий, холодного и огнестрельного оружия и др.), которые, безусловно, заслуживают внимания и развития в качестве перспективных объектов геологического и этнокультурного туризма. Значительная доля творческого потенциала сосредоточена в горных и высокогорных районах. К примеру, ювелирное мастерство сохранилось в Дахадаевском, Хунзахском, Лакском и др. районах Дагестана, а ковроткачество – в Ахтынском, Докузпаринском и Табасаранском районах. Мастеров гончарного ремесла можно найти в равнинных районах (Хасавюртовский, Сулейман-Стальский и др.). В горной Чечне гончарное ремесло развито в Шатойском районе, а в горной Ингушетии – в Джейрахском. Изготовление войлочных изделий встречается редко и сохранилось лишь в Ботлихском районе Дагестана, Веденском и Ножай-Юртовском районах Чеченской Республики. Искусство, народные промыслы и ремесла могут также выступать в качестве образовательного инструмента для развития геотуризма [Farsani et al., 2017].

Историко-культурное наследие. Из 7,5 тыс. памятников истории и культуры, занесенных в реестры объектов культурно-исторического наследия, 6474 объекта выявлено в Дагестане, 750 – в Чечне и 437 – в Ингушетии [Забураева, 2022]. Джейрахско-Ассинский государственный историко-архитектурный и природный музей-заповедник и Аргунский государственный историко-архитектурный и природный музей-заповедник являются основными объектами, определяющими туристско-рекреационный потенциал Республики Ингушетия и Чеченской Республики. В районе озера Кезеной-Ам расположен древний княжеский замок «Алдан-Гези», вблизи которого находится 87 карстовых пещер.

В предгорных Буйнакском и Дербентском районах Дагестана высока концентрация памятников истории и архитектуры. Исключительно ценен среди них Дербентский историко-архитектурный и художественный музей-заповедник с крепостью «Нарын-Кала», признанной ЮНЕСКО памятником мирового значения.

В регионах Северо-Восточного Кавказа функционируют музеи различного профиля (краеведческий, этнографический и др.), которые могут служить основой для развития этнокультурного туризма. В Дагестане находится свыше двух десятков краеведческих музеев и культурно-исторических комплексов.

Для более устойчивого (сбалансированного) развития исследуемых регионов следует ориентироваться на более сбалансированное сочетание традиций и инноваций в природопользовании, включая рекреационную отрасль [Zaburaeva, Krasnov, 2021]. При этом инновационные технологии должны развиваться на основе традиционных [Канукова, 2017]. Весьма актуально в условиях Северо-Восточного Кавказа и этнокультурное брендинг объектов рекреации. Создание образа-бренда предполагает серьезную работу, в т.ч. качественное научно-обоснованное представление информации об уникальности этнокультурных объектов, их символах, экономической, экологической и социальной сущности.

Выводы

В регионах Северо-Восточного Кавказа имеются благоприятные условия для геологического и этнокультурного туризма. Для их масштабного развития потребуются значительные инвестиции в строительство гостиниц, дорог, коммуникаций и др. Однако для начала необходимо пробуждать интерес населения к перспективным для них новым формам деятельности. Геотуризм может быть мощным инструментом устойчивого развития, но при отсутствии эффективного управления может

представлять собой и прямую угрозу ресурсам геонаследия [Newsome et al., 2012; Dowling, 2014] и геоэкологической безопасности, поскольку в горных регионах геоэкологический риск в силу тектонических и геолого-геофизических особенностей в значительной степени возрастает [Свалова, 2022].

Достаточно актуальна в исследуемых регионах разработка новых туристических продуктов с упором на знакомство с достопримечательностями и национальными особенностями и традициями коренных этносов посредством участия в различных видах деятельности, позволяющих погрузиться в этническую атмосферу. К примеру, незатейливые ремесла, народные танцы, пешие и конные прогулки.

Особая роль, по мнению авторов, должна отводиться знакомству с национальной кухней как особо привлекательным выражением этнического самосознания. Современные интеллектуальные технологии приготовления пищи позволят улучшить сервис и создать у туристов самые приятные впечатления [Azis et al., 2020].

Литература

1. Абалаков А.Д., Базарова Н.Б. Принципы организации геологического туризма на Байкальском биосферном полигоне. // География и природные ресурсы. – 2022. – Т. 43. №4. – С. 36–47.
2. Бадов А.Д., Бадов О.А., Дзахова Л.Х., Бязрова Д.Б. Типология горных поселений Северной Осетии и основные направления их устойчивого развития. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 119–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009.
3. Бутузов А.Г. Состояние и перспективы развития этнокультурного туризма в Российской Федерации. // Сервис в России и за рубежом. – 2009. – №4(14). – С. 11–15.
4. Гаджалова Ф.А. Традиционная культура народов Дагестана и её брендинг как ресурс развития региона. // В сб.: 30 лет Республике Ингушетия: Исторические вехи и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции. – Магас, 2022. – С. 327–332.
5. Гамзатов Г.Г. Многонациональный регион: факторы межэтнического напряжения и согласия. // Вестник ВЭГУ. – 2009. – №3(41). – С. 4–14.
6. Головлев А.А. Геолого-геоморфологические особенности территории Горной Чечни. // Самарская лука. – 2007. – Т. 16. №4(22). – С. 689–707.
7. Гордеева И.В. Геологический туризм в Свердловской области: ожидания, реальность и проблемы. // Успехи современного естествознания. – 2020. – №9. – С. 40–45.
8. Гусев А.И. Потенциал геммотуризма в Южном федеральном округе. // Science and education: problems and innovations: материалы международной научно-практической конференции. – Пенза, 2021. – С. 16–20.
9. Забураева Х.Ш. Этнокультурный туризм как форма сохранения этнической культуры на Северо-Восточном Кавказе. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XII. / Под ред. И.А. Керимова, В.А. Широковой. – М.: ИИЕТ РАН, 2022. – С. 417–423.
10. Забураева Х.Ш., Краснов Е.В. Об этногенетических особенностях населения регионов Северо-Восточного Кавказа и их классификации. // Региональные исследования. – 2014. – №2(44). – С. 106–112.
11. Канукова З.В. Традиционная культура в инновационном развитии Северного Кавказа. // Электронный журнал «Кавказология». – 2017. – №2. – С. 89–102.
12. Милинчук Е.С. Этнокультурный туризм как фактор развития российских регионов в условиях COVID-19. // Этнокультурный туризм: современное состояние и перспективы развития в России и в мире: материалы международной научно-практической конференции. – М., 2021. – С. 60–69.
13. Мустафаева М.Г., Хиясова С.Г. Особенности этнотуризма в Дагестане как фактор

достижения мира и согласия. // Научный альманах стран Причерноморья. – 2023. – №1(33). – С. 57–64.

14. Сапего А.В., Клейстер Т.Г. Геологический туризм как стратегическое направление в геологии и туризме Кузбасса. // Теория и практика стратегирования: материалы международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2023. – С. 137–143.

15. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010

16. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетрозов З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51

17. 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. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

18. Хоменко В.И., Филатова М.С. Генезис и перспективы развития этнокультурного туризма в Российской Федерации. // Индустрия туризма: возможности, приоритеты, проблемы и перспективы. – 2019. – №15(1). – С.104–112.

19. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Мамаев А.С., Юсупов З.А. Геологические памятники области предгорного Дагестана. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2020. – №3(82). – С. 98–100.

20. Azis N., Amin M., Chan S., Aprilia C. How smart tourism technologies affect tourist destination loyalty. // Journal of hospitality and tourism technology. – 2020. – Vol. 11(4). – pp. 603-624. DOI: 10.1108/JHTT-01-2020-0005.

21. Cros H.D., McKercher B. Cultural tourism. London: Routledge. – 2020. – 340 p.

22. Dowling R.K. Global Geotourism-An Emerging Form of Sustainable Tourism. // Czech Journal of Tourism. – 2014. –Vol. 2.– pp. 59–79.

23. Farsani N.T., Coelho C.O.A., Costa C.M.M., Amrikazemi A. Geo-knowledge Management and Geoconservation via Geoparks and Geotourism. // Geoheritage. – 2014. Vol. 6. – pp. 185–192. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12371-014-0099-7>

24. Farsani N.T., Mortazavi M., Bahrami A., Kalantary R., Bizhaem F.K. Traditional Crafts: A Tool for Geo-education in Geotourism. // Geoheritage. – 2017. – Vol. 9. – pp. 577–584. DOI: 10.1007/s12371-016-0211-2

25. Gordon J.E. Rediscovering a Sense of Wonder: Geoheritage, Geotourism and Cultural Landscape Experiences. // Geoheritage. – 2012. – Vol. 4. – pp. 65–77.

26. Gordon J.E. Geoheritage, geotourism and the cultural landscape: Enhancing the visitor experience and promoting geoconservation. // Geosciences. – 2018. – Vol. 8. No.4. DOI: 10.3390/geosciences8040136.

27. Herrera-Franco G., Montalván-Burbano N., Carrión-Mero P., Apolo-Masache B., Jaya-Montalvo M. Research Trends in Geotourism: A Bibliometric Analysis using the Scopus Database. // Geosciences. – 2020. – Vol. 10. DOI: 10.3390/geosciences10100379.

28. Kumar S., Dhir A. Associations between travel and tourism competitiveness and culture. // Journal of destination marketing & management. – 2020. – Vol. 18. DOI: 10.1016/j.jdmm.2020.100501

29. McKercher B. Cultural tourism market: A perspective paper. // Tourism Review. – 2020. – Vol. 75. – pp. 126-129. DOI: 10.1108/TR-03-2019-0096.

30. Newsome D., Dowling R., Leung Y.F. The nature and management of geotourism: A case study of two established iconic geotourism destinations. // Tourism. Management. Perspectives. – 2012. – Vol. 2. No.3. – pp. 19–27.

31. Noonan D.S., Rizzo I. Economics of cultural tourism: issues and perspectives. // Journal of Cultural Economics. – 2017. – Vol. 41. No.2. – pp. 95-107. DOI: 10.1007/s10824-017-9300-6.

32. Pralong J.P. Geotourism: A new Form of Tourism utilising natural Landscapes and based on Imagination and Emotion. // *Tourism. Review.* – 2006. – Vol. 61. – pp. 20–25. DOI:10.1108/eb058476.
33. Richards G. Cultural tourism: A review of recent research and trends. // *Journal of Hospitality and Tourism Management.* – 2018. – Vol. 36. – pp. 12–21. DOI:10.1016/j.jhtm.2018.03.005.
34. Ruhanen L., Whitford M. Cultural heritage and Indigenous tourism. // *Journal of Heritage Tourism.* – 2019. – Vol. 14. No.3. – pp. 179–191. DOI:10.1080/1743873X.2019.1581788.
35. Seyfi S., Hall C.M., Rasoolimanesh S.M. Exploring memorable cultural tourism experiences. // *Journal of Heritage Tourism.* – 2019. – Vol. 15. No.3. – pp. 1–17. DOI: 10.1080/1743873X.2019.1639717.
36. Vergori A.S., Arima S. Cultural and non-cultural tourism: Evidence from Italian experience. // *Tourism Management.* – 2020. – Vol. 78. DOI: 10.1016/j.tourman.2019.104058.
37. ZaburaevaKh.Sh., Krasnov E.V. Traditions and Innovations in the North Caucasus Nature Management. // *Innovations and Traditions for Sustainable Development.* / Ed.: Walter Leal Filho, Eugene V. Krasnov, Dara V. Gaeva. Springer, 2021. – pp. 331–345. DOI: 10.1007/978-3-030-78825-4_20

References

1. Abalakov A.D., Bazarova N.B. Principles of organization of geological tourism of the Baikal biosphere polygon. *Geography and Natural resources.* 2022. Vol. 43. No. 4. pp. 36–47. (In Russ.).
2. Badov A.D., Badov O.A., Dzakhova L.Kh., Byazrova J.B. Typology of mountain settlements in North Ossetia and the main directions of their sustainable development. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 119–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009 (In Russ.).
3. Butuzov A.G. Ethnic and cultural tourism in Russia: status and prospects. *Service in Russia and Abroad.* 2009. Vol. 4 (14). pp. 11–15. (In Russ.).
4. Gadzhalova F.A. The traditional culture of the peoples of Dagestan and its branding as a resource for the development of the region. 30 years of the Republic of Ingushetia: Historical milestones and development prospects. *Materials of the International Scientific and Practical Conference. Magas.* 2022. pp. 327–332. (In Russ.).
5. Gamzatov G.G. Multinational region: factors of interethnic tension and harmony. *Bulletin of VEGU.* 2009. No. (41). pp. 4–14. (In Russ.).
6. Golovlev A.A. Geological and geomorphological features of the territory of Mountain Chechnya. *Samara Luka.* 2007. Vol. 16. No. 4 (22). pp. 689–707. (In Russ.).
7. Gordeeva I.V. Geological tourism in the Sverdlovsk region: expectations, reality and problems. *The successes of modern natural science.* 2020. No. 9. pp. C. 40–45. (In Russ.).
8. Gusev A.I. The potential of gemotourism in the Southern Federal District. *Science and education: problems and innovations. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Penza,* 2021. pp. 16–20. (In Russ.).
9. Zaburaeva Kh.Sh. Ethnocultural tourism as a form of preservation of ethnic culture in the Northeast Caucasus. *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus.* Vol. 12. Edited by I.A. Kerimov V.A. Shirokova. Moscow. S.I. Vavilov Institute for the History of Natural Science and Technology, RAN, 2022. pp. 417–423. (In Russ.).
10. Zaburaeva Kh.Sh., Krasnov E.V. Ethnogenetic typology of the regions of North-East Caucasus. *Regional studies.* 2014. Vol. 2 (44). pp. 106–112. (In Russ.).
11. Kanukova Z.V. Traditional culture in the innovative development of the North Caucasus. *Electronic journal «Caucasology».* 2017. Vol. 2. pp. 89–102. (In Russ.).
12. Milinchuk E.S. Ethnocultural tourism as a factor in the development of Russian regions in the context of COVID-19. *Ethnocultural tourism: the current state and prospects for development*

in Russia and in the world. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Moscow. 2021. pp. 60-69. (In Russ.).

13. Mustafaeva M.G., Khiyasova S.G. Features of ethnotourism in Dagestan as a factor in achieving peace and harmony. Science almanac of Black Searegion countries. 2023. Vol. 1 (33). pp. 57-64. (In Russ.).

14. Sapego A.V., Kleyster T.G. Geological tourism as a strategic direction in geology and tourism of Kuzbass. Strategy Theory and Practice. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Kemerovo. 2023. pp. 137-143. (In Russ.).

15. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 129-147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010 (In Russ.).

16. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. Sustainable Development of Mountain Territories. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)

17. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

18. Khomenko V.I., Filatova M.S. Genesis and prospects for the development of Ethnocultural tourism in the Russian Federation. Tourism industry: opportunities, priorities, challenges and prospects. 2019. Vol. 15 (1). pp. 104-112. (In Russ.).

19. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Mamaev A.S., Yusupov Z.A. Geological monuments of the region of foothill Dagestan. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 3 (82). pp. 98-100. (In Russ.).

20. Azis N., Amin M., Chan S., Aprilia C. How smart tourism technologies affect tourist destination loyalty. Journal of hospitality and tourism technology. 2020. Vol. 11 (4). pp. 603-624. DOI: 10.1108/JHTT-01-2020-0005.

21. Cros H.D., McKercher B. Cultural tourism. London: Routledge. 2020. 340p.

22. Dowling R.K. Global Geotourism - An Emerging Form of Sustainable Tourism. Czech Journal of Tourism. 2014. Vol. 2. pp. 59–79.

23. Farsani N.T., Coelho C.O.A., Costa C.M.M., Amrikazemi A. Geo-knowledge Management and Geoconservation via Geoparks and Geotourism. Geoheritage. 2014. Vol. 6. pp. 185–192 <https://link.springer.com/article/10.1007/s12371-014-0099-7>

24. Farsani N.T., Mortazavi M., Bahrami A., Kalantary R., Bizhaem F.K. Traditional Crafts: A Tool for Geo-education in Geotourism. Geoheritage. 2017. Vol. 9. pp. 577–584. DOI:10.1007/s12371-016-0211-2

25. Gordon J.E. Rediscovering a Sense of Wonder: Geoheritage, Geotourism and Cultural Landscape Experiences. Geoheritage. 2012. Vol. 4. pp. 65–77.

26. Gordon J.E. Geoheritage, geotourism and the cultural landscape: Enhancing the visitor experience and promoting geoconservation. Geosciences. 2018. Vol. 8. No. 4. DOI: 10.3390/geosciences8040136.

27. Herrera-Franco G., Montalván-Burbano N., Carrión-Mero P., Apolo-Masache B., Jaya-Montalvo M. Research Trends in Geotourism: A Bibliometric Analysis using the Scopus Database. Geosciences. 2020. Vol. 10. DOI: 10.3390/geosciences10100379.

28. Kumar S., Dhir A. Associations between travel and tourism competitiveness and culture. Journal of destination marketing & management. 2020. Vol. 18. DOI: 10.1016/j.jdmm.2020.100501.

29. McKercher B. Cultural tourism market: A perspective paper. Tourism Review. 2020. Vol. 75. pp. 126-129. DOI: 10.1108/TR-03-2019-0096.

30. Newsome D., Dowling R., Leung Y.F. The nature and management of geotourism: A case study of two established iconic geotourism destinations. Tourism. Management. Perspectives. 2012. Vol. 2. No. 3. pp. 19–27.

31. Noonan D.S., Rizzo I. Economics of cultural tourism: issues and perspectives. *Journal of Cultural Economics*. 2017. Vol. 41. No. 2. pp. 95-107. DOI: 10.1007/s10824-017-9300-6.
32. Pralong J.P. Geotourism: A new Form of Tourism utilising natural Landscapes and based on Imagination and Emotion. *Tourism. Review*. 2006. Vol. 61. pp. 20–25. DOI:10.1108/eb058476.
33. Richards G. Cultural tourism: A review of recent research and trends. *Journal of Hospitality and Tourism Management*. 2018. Vol. 36. pp. 12-21. DOI: 10.1016/j.jhtm.2018.03.005.
34. Ruhanen L., Whitford M. Cultural heritage and Indigenous tourism. *Journal of Heritage Tourism*. 2019. Vol. 14. No. 3. pp. 179-191. DOI:10.1080/1743873X.2019.1581788.
35. Seyfi S., Hall C.M., Rasoolimanesh S.M. Exploring memorable cultural tourism experiences. *Journal of Heritage Tourism*. 2019. Vol. 15. No. 3. pp. 1-17. DOI: 10.1080/1743873X.2019.1639717.
36. Vergori A.S., Arima S. Cultural and non-cultural tourism: Evidence from Italian experience. *Tourism Management*. 2020. Vol. 78. DOI: 10.1016/j.tourman.2019.104058.
37. Zaburaeva Kh.Sh., Krasnov E.V. Traditions and Innovations in the North Caucasus Nature Management. *Innovations and Traditions for Sustainable Development*. Ed.: Walter Leal Filho, Eugene V. Krasnov, Dara V. Gaeva. Springer, 2021. pp. 331-345. DOI: 10.1007/978-3-030-78825-4_20

УДК 556.18

[DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.35.64.001)

Оригинальная статья

Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея)

А.В. Погорелов¹, **Д.А. Липилин^{1, 2}**, **Е.В. Яроцкая²**

¹Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149;

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, e-mail: LipiLin_dmitrii@mail.ru

Статья поступила: 09.05.2023, доработана: 06.06.2023, одобрена к публикации: 13.06.2023

Резюме: Актуальность работы. На земли сельскохозяйственного назначения в Краснодарском крае приходится 62% территории, большая часть которой расположена на Азово-Кубанской равнине в бассейнах степных рек. Техногенная трансформация ландшафтов и речных систем Азово-Кубанской равнины происходит непрерывно, сопровождаясь изменениями гидрографических характеристик и нарушениями дренированности территории. Указанная трансформация и связанные с ней водно-балансовые изменения до сих пор остаются слабоизученными. **Цель исследования.** Количественная оценка и анализ происходящих преобразований водно-эрозионной сети на Азово-Кубанской равнине в бассейне р. Ея с использованием распространенных гидрографических характеристик. **Методы исследования.** При цифровом моделировании на базе глобальной ЦМР ASTER GDEM сети постоянных и временных водотоков, а также контуров водосборов реализован принятый в гидрологии и геомоделировании бассейновый подход. Распознавание типов землепользования (сельскохозяйственные угодья, населенные пункты, водные объекты, болота и лесополосы) и элементов речной сети в бассейне р. Ея выполнено по данным спутниковых снимков Landsat за период 1999–2021 гг. Дешифрирование спутниковых изображений, моделирование речной сети, картографирование и анализ пространственных данных проведены в среде полнофункциональной ГИС. Операционные территориальные единицы – частные речные бассейны в количестве 29 площадью от 70 до 609 км². **Результаты работы.** Выполненные исследования позволили оценить динамику типов землепользования и гидрографических показателей (длина водотоков, густота эрозионной сети, распаханность и урбанизированность водосборов) в бассейне р. Ея на площади 8654 км². Преобразования гидрографической сети проявляются в повсеместном сокращении длины водотоков и уменьшении плотности водно-эрозионной сети. В каждом из выделенных 29 частных бассейнов за 1999–2021 гг. произошло уменьшение длины водотоков. В целом в бассейне р. Ея общая длина водотоков уменьшилась с 3221 до 2675 км или на 17,1%. Причина – распашка склонов речных долин, иногда до уреза воды, и перепланировка поверхности водосборов; следствие – повсеместное отмирание верхних участков речной и балочной сети, сокращение площади пойм, занятой влаголюбивой растительностью. Полученные результаты закладывают основу для описания механизмов водного обмена и выявления гомеостатичности речных систем, обоснованного моделирования воздействия техногенных преобразований ландшафтов и гидрографических характеристик речных геосистем на водообменные процессы и водный баланс территории Азово-Кубанской равнины.

Ключевые слова: степные реки, ландшафты, трансформация, распашка, водосбор, гидрографические характеристики, цифровая модель рельефа, ГИС, спутниковые снимки.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 22-27-20008.

Для цитирования: Погорелов А.В., Липилин Д.А., Яроцкая Е.В. Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 161-179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001.

GEOINFORMATICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.35.64.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.35.64.001)

Original paper

GIS analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network on the Azo-Kuban plain (Eya river basin)

A.V. Pogorelov¹, D.A. Lipilin^{1, 2}, E.V. Yarotskaya²

¹Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation;

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13 Kalinina Str., Krasnodar 350044, Russian Federation, e-mail: LipiLin_dmitrii@mail.ru

Received: 09.05.2023; revised: 06.06.2023; accepted: 13.06.2023

Abstract: Relevance. Agricultural land in the Krasnodar Territory accounts for 62% of the territory, most of which is located on the Azov-Kuban plain in the steppe river basins. Technogenic transformation of landscapes and river systems of the Azov-Kuban Plain occurs continuously, accompanied by changes in hydrographic characteristics and disturbances in drainage of the territory. This transformation and related water balance changes are still poorly understood. **Aim.** Quantitative assessment and analysis of ongoing transformations of the water-erosion network on the Azov-Kuban Plain in the basin of the river. Her using common hydrographic characteristics. **Methods.** In digital modeling based on the global ASTER GDEM DEM network of permanent and temporary watercourses, as well as watershed contours, the basin approach adopted in hydrology and geomodeling is implemented. Recognition of land use types (agricultural land, settlements, water bodies, swamps and forest belts) and elements of the river network in the river basin. It was performed c based on data from Landsat satellite images for the period 1999–2021. Interpretation of satellite images, modeling of the river network, mapping and analysis of spatial data were carried out in a full-featured GIS environment. Operational territorial units are 29 private river basins with area from 70 to 609 km². **Results.** The performed studies made it possible to assess the dynamics of land use types and hydrographic indicators (the length of watercourses, the density of the erosion network, the plowing and urbanization of watersheds) in the basin of the river. It covers an area of 8654 km². Transformations of the hydrographic network are manifested in the widespread reduction in the length of watercourses and a decrease in the density of the water-erosion network. In each of the allocated 29 private pools for 1999–2021. there was a decrease in the length of the streams. In general, in the river basin its total length of watercourses decreased from 3221 to 2675 km or by 17.1%. The reason is the plowing of the slopes of river valleys, sometimes up to the water's edge, and the redevelopment of the surface of the watersheds; the consequence is the widespread death of the upper sections of the river and gully network, the reduction in the area of floodplains occupied by moisture-loving vegetation. The obtained results lay the foundation for describing the mechanisms of water exchange and identifying the homeostatic nature of river systems, for sound modeling of the impact of technogenic transformations of landscapes and hydrographic characteristics of river geosystems on water exchange processes and the water balance of the Azov-Kuban Plain.

Keywords: steppe rivers, landscapes, transformation, plowing, catchment area, hydrographic characteristics, digital elevation model, GIS, satellite images.

Acknowledgments: *The study was financially supported by the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation under project No. 22-27-20008.*

For citation: Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Yarotskaya E.V. GIS analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network in the Azov-Kuban plain (Eya river basin). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 161-179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001.

Введение

Настоящее исследование служит продолжением работ [Погорелов и др., 2021; 2022; Pogorelov et al., 2021], нацеленных на количественные оценки и причины изменения гидрографических показателей речной сети на Азово-Кубанской равнине под влиянием человеческой деятельности. Предпосылки исследования следующие. Кубань – один из лидеров в агропромышленном комплексе России, главным образом в отрасли растениеводства. В структуре земельного фонда Краснодарского края на земли сельскохозяйственного назначения в 2019 г. приходилось 4695 тыс. га или 62,2% земельных ресурсов¹ – в основном это земли в пределах Азово-Кубанской равнины и правобережья р. Кубани. Площадь посевных земель сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае составляет 3745 тыс. га, при этом с 2014 г. площади этих земель постепенно увеличиваются. Одновременно доля продукции растениеводства в валовой сельскохозяйственной продукции в Краснодарском крае увеличилась с 62,3% в 2010 г. до 75,9% в 2021 г., что указывает на усиление растениеводческой специализации. Среди регионов Российской Федерации Краснодарский край является лидером по относительной площади ценных сельскохозяйственных угодий (53,7%). Освоение новых сельскохозяйственных земель при сложившейся структуре земельного фонда возможно лишь при перераспределении земель между категориями. В равнинной части Краснодарского края относительно нетронутыми остались только неудобья (откосы балок, заболоченные участки) общей площадью не более 1%. Отсюда понятна важность сохранения ценных свойств сельскохозяйственных земель с учетом комплекса определяющих их геоэкологических факторов, включая водно-ресурсный.

В последние годы в исследуемом регионе, расположенном в семиаридном климате степной зоны, отмечен устойчивый рост водопотребления на производственные и сельскохозяйственные нужды. В этих условиях поверхностные воды, представленные степными реками, выступают важнейшим региональным ресурсом, обеспечивающим стабильное производство продукции растениеводства [Svalova et al., 2019; Хулелидзе и др., 2016; Чотчаев и др., 2021; Сазонов и др., 2022] и, как следствие, продовольственную безопасность региона и страны. Вместе с тем, техногенное преобразование степей – глобальное явление, отмечаемое в разных сторонах, в частности, в [Ellis et al., 2010; Moon, 2013; Kraemer et al., 2015; Pazur et al., 2021; и др.]. На фоне трансформации степных ландшафтов деградация речных экосистем Азово-Кубанской равнины происходит непрерывно. Как было показано [Погорелов и др., 2021, 2022], речные системы (Челбас, Бейсуг, Албаши и др.) вследствие массового сооружения плотин и дамб на реках, прокладки искусственной ирригационной сети, перепланировки территории, распашки русел фактически представляют собой природно-техногенные системы с измененными

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году».

гидрографическими характеристиками и нарушенными показателями водного и минерального обмена. Наряду с повсеместным нарушением дренированности поверхности и проточности на степных реках и балках, отдельную проблему представляет собой несоблюдение водоохранных и санитарных зон вдоль водных объектов, особенно характерное для аграрных регионов нашей страны [Скрипчинский и др., 2022].

Техногенному изменению гидрографических характеристик степных рек уделяется мало внимания, несмотря на значимость вопросов изменения естественной дренированности территории Азово-Кубанской равнины и последствий потери гомеостатичности речных систем в результате перестройки водообменных процессов. Отдельные публикации [Гайдай, 2006; Белюченко, 2010, 2017; Суслов, 2015; Экология речных..., 2017], как правило, сосредоточены на биологических, химических, биоэкологических проблемах степных рек и не оценивают балансовые и режимные изменения водообмена в речных бассейнах. Исследования водно-балансовых свойств степных агроландшафтов [Барабанов, Панов, 2021] свидетельствуют об ухудшении их водного режима при земледелии, в частности, в результате снижения инфильтрационной способности почвы и роста поверхностного стока. Не удивительно, что в степных регионах России, включая Краснодарский край, за последние десятилетия ухудшилось мелиоративное состояние орошаемых земель [Демин, 2021]. При постановке задач мы опирались на бассейновый подход [Корытный, 2001], позволяющий обосновать ландшафтно-гидрологическую организацию территории, поскольку речному бассейну на любом иерархическом уровне присущи механизмы (само) регулирования геоморфологических и гидрологических процессов, почвообразования, элементов биоты и других взаимосвязанных процессов.

К наиболее показательным гидрографическим характеристикам¹ в контексте преобразований водного баланса территории Азово-Кубанской низменности и последующих геоэкологических эффектов отнесём длину водотоков, густоту эрозийной сети, распаханность и урбанизированность территории речных бассейнов.

Объект и методы исследования

Объект исследования. Бассейн реки Ея занимает северную часть Азово-Кубанской низменности (рис. 1). Поверхность низменности, имеющей преимущественно аккумулятивное и денудационно-аккумулятивное происхождение, слабо расчленена, речные долины, как правило, неглубокие, водоразделы плохо выражены; встречаются западины. Низменность сложена в основном легко поддающимися эрозии лессовидными суглинками, песчано-глинистыми отложениями.

Согласно принятому гидрологическому районированию [Ресурсы..., 1973] бассейн р. Ея входит в Восточный Приазовский гидрографический район, включающий 605 маловодных степных рек, из которых река Ея – самая крупная по площади водосбора (8654 км²) и длине (311 км). Исток Еи расположен в 6 км южнее станицы Новопокровской в месте слияния рек Упорной и Корсун на высоте около 80 м [Лурье, Панов, 2021]; впадает река в Ейский лиман. Бассейн имеет асимметричную форму с заметно расширенной верхней частью, имеющей развитую сеть притоков (рис. 1). Наиболее крупные притоки – Сосыка (левобережье) и Куго-Ея (правобере-

¹ Р 52.08.874-2018. Рекомендации. Определение гидрографических характеристик картографическим способом. Росгидромет. СПб. 2018. 172 с.

жье).



Рис. 1. Бассейны р. Ея на территории Краснодарского края и Ростовской области /
Fig. 1. Basin of the Eya river in the Krasnodar and Rostov territory

Границы бассейна повсеместно представлены слабосхолмленными плоскими водоразделами. В верховьях элементы долины реки морфологически плохо выражены. Склоны речной долины практически на всем протяжении слабо расчлененные, пологие (рис. 2); русло умеренно- или слабоизвилистое. Пойма появляется ниже впадения р. Терновка, достигая ширины 0,2-0,3 км, и увеличивается вблизи устья до 6-7 км. Ниже впадения р. Сосыка пойма сильно заболочена, изрезана протоками и мелкими озерами. Ширина русла изменяется от 5–30 м в верховьях до 150–200 м в нижнем течении.

Основной источник питания – атмосферные осадки, грунтовое питание незначительное. В летнее время, когда потребность в водоснабжении наибольшая, участие атмосферных осадков в формировании стока из-за высоких потерь на испарение резко снижается. Средний годовой сток Еи составляет 109,5 млн м³, средний годовой расход воды равен 4,32 м³/с, слой стока – 40 мм. При этом 85% стока проходит в течение февраля – мая. Скорость течения в период весеннего по-

ловодья, как правило, не превышает 0,6-0,7 м/с, в другое время наблюдается лишь непосредственно ниже плотин. В летне-осеннюю межень из-за незначительного стока и обилия плотин многие малые реки и ручьи в составе гидрографической сети бассейна р. Ея пересыхают. Действующую площадь бассейна, т.е. площадь, на которой происходит формирование поверхностного и грунтового стока, в бассейне р. Ея определяют в 870 км² [Суслов, 2015], что в 10 раз меньше всей площади бассейна.



Рис. 2. Река Ея в среднем течении (фото Липилин Д.А., 2018 г.) /

Fig. 2. River Eya in the middle course (photo by Lipilin D.A., 2018)

Русло реки Ея в настоящее время представлено цепочкой многочисленных прудов, число которых оценивается от 733 [Лурье, Панов, 2021] до 749 [Суслов, 2015], использующихся для орошения, рекреации, рыбозабоев. Многочисленные гидротехнические перегораживающие сооружения в виде русловых плотин – земляных насыпей и мостовых переходов (рис. 3) – относятся к категории активных с позиции воздействия на русловые процессы. Пруды с суммарной площадью зеркала более 110 км² практически полностью перехватывают речной сток в межень. Подобная зарегулированность речного стока способствует заилению русел, увеличению безвозвратных потерь стока, а в целом приводит к радикальной перестройке вещественно-обменных процессов в степных реках. Большая часть перегораживающих сооружений построена без проектной документации. Значительная часть плотин и нерегулируемых водосбросных сооружений требует ремонтных работ.

Зарегулированность речного стока перегораживающими сооружениями оценивалась по материалам их инвентаризации ОАО ПИИ «Кубаньводпроект» (2000 г.) и

результатам наших наземных обследований.



Рис. 3. Типичные русловые плотины на р. Ея – в виде земляной насыпи выше ст. Калниболотской (вверху), с автодорожным мостом в пос. Советский (внизу) /

Fig. 3. Typical dams on the Eya River – in the form of an earth embankment above Kalnibolotskaya village (above) and with a road bridge in the Sovetsky village (below)

Дополнительно распознавание водохозяйственных сооружений выполнялось с использованием спутниковых снимков Landsat 8. Дешифровочными признаками выступали специфическое пространственное положение плотин поперёк речного русла и наличие подъездных путей [Погорелов и др., 2021]. Всего в 2023 г. в бассейне р. Ея выявлено 1160 перегораживающих сооружений (рис. 4). Отметим, что для оценки их влияния на условия дренированности и водный баланс территории необходимы специальные исследования.



Рис. 4. Распределение перегораживающих сооружений на реке Ея /

Fig. 4. Distribution of dams on the river of the Eya

Значимым фактором техногенного воздействия на речную сеть выступает застройка территории: в 2023 г. в исследуемом бассейне насчитывалось 142 населённых пункта общей площадью 540,3 км².¹

Методы исследования

Цифровое моделирование сети тальвегов (постоянных и временных водотоков) и границ бассейнов выполнено по предварительно откорректированной глобальной ЦМР ASTER GDEM2 [ASTER..., 2009; Atroshchenko et al., 2022]. При делении поверхности на частные бассейны, имея в виду фрактальный характер речной сети, мы исходили из относительной гомогенности развития гидрографической сети в границах выделяемых бассейнов. Распознавание типов землепользования с учетом заданного периода (1999–2021 гг.) выполнено по спутниковым снимкам Landsat (табл. 1), пространственное разрешение которых сопоставимо с разрешением ЦМР ASTER GDEM2.

Таблица 1 / Table 1

**Сведения об использованных космических снимках /
Information about the used satellite images**

Космический аппарат / Satellite	Дата снимка / Date	ID снимка / ID of satellite images	Пространственное разрешение, м / Spatial resolution, m
Landsat 7	01.10.1999	LE71750281999274NSG01	30
Landsat 7	03.10.1999	LE71730281999276SGS00	30
Landsat 7	11.11.1999	LE71740281999315SGS00	30
Landsat 8	10.07.2021	LC81740282021191LGN00	30
Landsat 8	17.07.2021	LC81750282021198LGN00	30
Landsat 8	19.07.2021	LC81730282021200LGN00	30

Поверхности исследуемого бассейна свойственно ограниченное количество типов землепользования. За основу типизации принята универсальная номенклатура базы данных покрытия/землепользования, разработанная для европейской программы CORINE Land Cover (CLC)². Имеющийся опыт использования этой номенклатуры базы данных свидетельствует о возможности ее применения для анализа техногенных преобразований речной сети. Выделено четыре типа характерных поверхностей/землепользования: 1) сельскохозяйственные угодья (Agricultural areas), 2) населенные пункты и объекты инфраструктуры (Artificial surfaces), 3) плавни (болота) и лесополосы (Wetland, Forests and semi-natural areas), 4) водные объекты. Объединение плавней и лесополос в единый тип вызвано объективной сложностью распознавания на спутниковых изображениях болотной и древесной растительности. Методика дешифрирования спутниковых снимков в программе ENVI описана

¹ Указанная площадь отличается от площади населенных пунктов (застройки), полученной при дешифрировании спутниковых снимков, поскольку административные границы включают поверхности с разными типами землепользования.

² <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>

[Погорелов и др., 2021]. Уточнение положения сети постоянных и временных водотоков, а также результатов дешифрирования типов землепользования осуществлялось с помощью геосервиса Google Earth Pro. Процедуру распознавания элементов водно-эрозионной сети на спутниковых снимках, а также оценку ее изменений иллюстрирует рисунок 5.

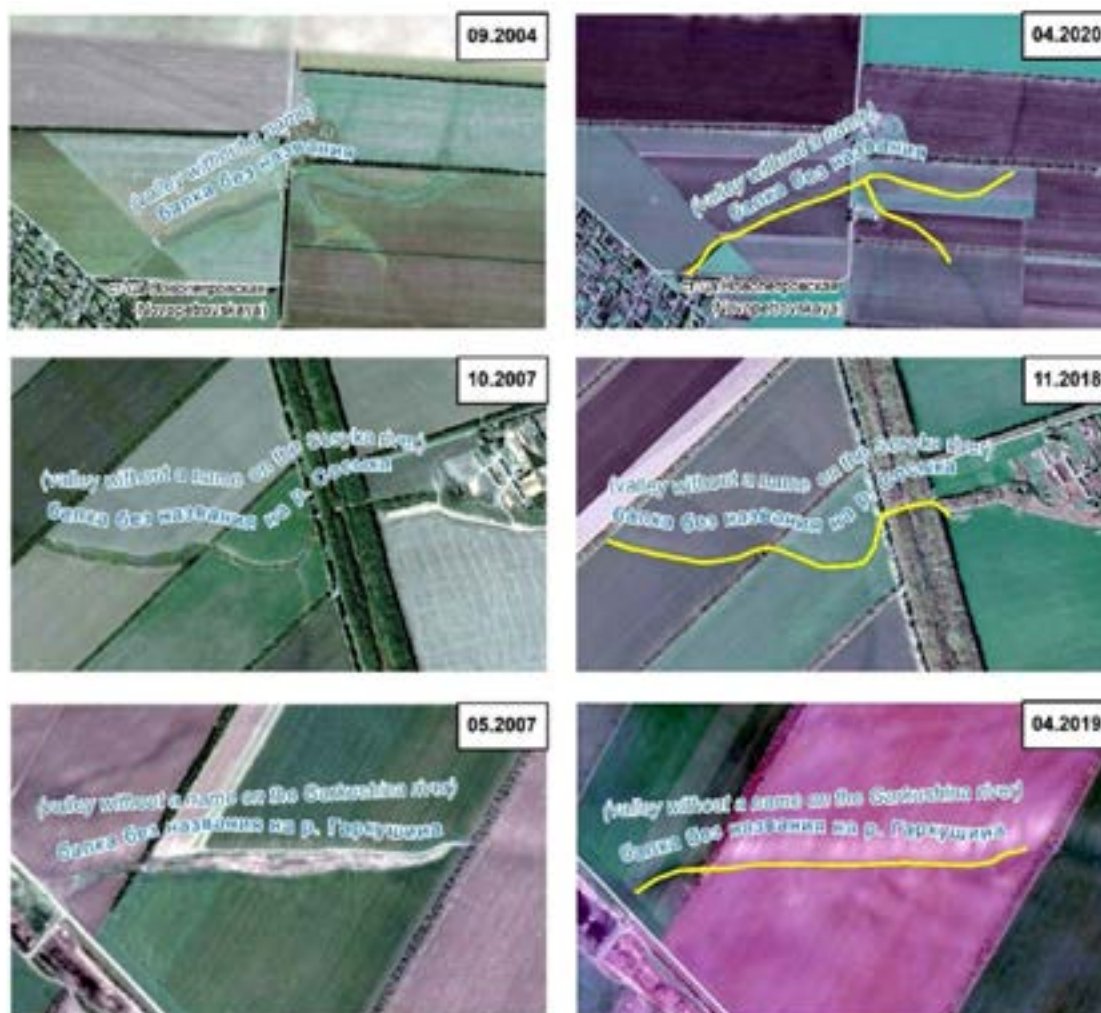


Рис. 5. Уменьшение длины водно-эрозионной сети в результате распайки и вертикальной планировки поверхности в бассейне р. Ея. Уничтоженные водотоки выделены желтым цветом/
Fig. 5. Decreases in the length of the erosion network as a result of plowing and vertical leveling of the surface in the Eya river basin. Eliminated streams are highlighted in yellow

Результаты работы и их обсуждения

В результате векторизации границ водосборов в исследуемом бассейне выделено 29 частных бассейнов, площадь которых варьирует от 70 (балка Попова) до 609,5 км² (Корсун) (рис. 6, табл. 2). Азово-Кубанская равнина на большей своей части представлена плоским или слабовосхолмленным рельефом, поэтому автоматизированное выделение водоразделов на некоторых участках приводило к артефактам, что потребовало ручной корректировки границ частных бассейнов. Обобщенные результаты дешифрирования типов поверхности/землепользования в границах

частных бассейнов представлены в таблице 2.

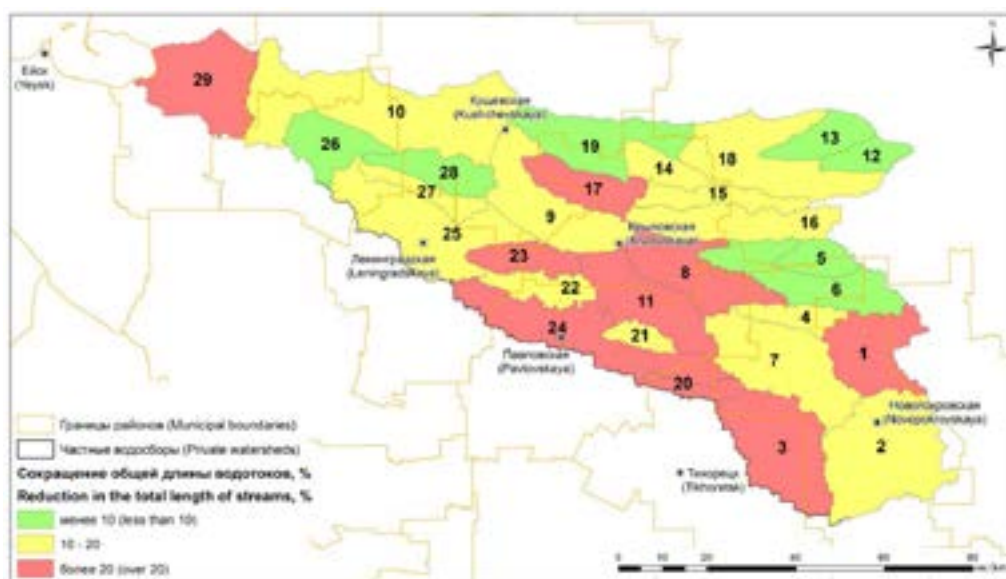


Рис. 6. Выделенные частные бассейны в бассейне р. Ея. Изменение длины водотоков за период 1999–2021 гг. в частных бассейнах /

Fig. 6. Changes in the length of watercourses for the period 1999-2021 in the studied basins

Таблица 2 / Table 2

Распределение типов поверхностей в частных бассейнах в бассейне р. Ея /
Distribution of surface types in basins in the Eya river basin

№	Частный бассейн / Private basin	Площадь, км ² / Area, km ²	1999 г. / 1999 year				2021 г. / 2021 year			
			Населенные пункты и объекты инфраструктуры, % / Settlements and infrastructure facilities, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %	Населенные пункты и объекты инфраструктуры, % / Settlements and infrastructure facilities, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Горькая / Gorkaya	311,80	1,69	2,55	0,81	94,94	2,57	6,52	0,73	90,18
2	Корсун / Korsun	609,49	3,59	2,53	0,68	93,20	6,15	6,84	0,84	86,17
3	Терновка / Ternovka	466,37	3,30	3,56	0,96	92,18	7,54	10,97	1,22	80,27
4	балка Водяная / Vodyanaya valley	108,64	2,51	1,35	1,31	94,83	6,00	5,26	1,25	87,50
5	Терноватая / Терноватая	114,35	0,89	1,39	0,38	97,34	2,89	9,68	0,54	86,89
6	Плоская / Ploskaya	346,37	1,61	1,22	0,67	96,49	4,17	6,38	0,97	88,48
7	Ея (верхнее течение) / Eya (upperflow)	480,68	3,09	2,12	1,91	92,88	5,96	8,57	1,90	83,56

8	Ея (среднее течение 2) / Eya (middleflow 2)	339,73	3,50	3,29	1,61	91,60	9,45	7,62	1,45	81,48
9	Ея (среднее течение 1) / Eya (middleflow 1)	406,17	8,27	4,91	1,37	85,46	5,37	6,88	0,90	86,85
10	Ея (нижнее течение) / Eya (downflow)	850,70	8,15	6,79	2,81	82,25	3,47	10,53	1,03	84,97
11	Весёлая / Vesolaya	342,47	5,46	2,41	0,67	91,46	5,10	10,34	0,65	83,91
12	Мокрая Грязнуха / Mokraya Gryaznukha	108,15	1,61	1,21	0,89	96,28	3,74	2,19	0,88	93,19
13	Егорлычек / Yegorlychek	156,15	6,43	1,86	0,90	90,81	9,38	3,13	0,97	86,52
14	Гезова / Gezova	120,12	3,27	1,77	0,60	94,37	3,32	8,68	0,41	87,59
15	Грузская / Gruzskaya	160,82	5,47	2,35	1,18	91,00	6,54	15,28	1,02	77,16
16	Кавалерка (верхнее течение) / Kavalerka (upperflow)	313,86	2,72	1,37	0,70	95,21	4,42	9,68	0,81	85,08
17	Кавалерка (нижнее течение) / Kavalerka (downflow)	205,15	3,72	3,28	0,94	92,05	3,25	4,60	0,85	91,30
18	Куго-Ея (верхнее течение) / Kugo-Eya (upperflow)	495,17	2,58	1,86	1,00	94,56	6,35	6,20	0,68	86,77
19	Куго-Ея (нижнее течение) / Kugo-Eya (downflow)	355,51	5,82	3,21	1,21	89,76	4,97	8,11	0,54	86,37
20	балка Смертина / Smertina valley	74,00	4,02	2,13	0,68	93,17	3,52	16,09	0,51	79,88
21	балка Попова / Popova valley	69,98	6,94	2,64	1,16	89,26	11,92	11,50	1,15	75,42
22	Бичевая / Bichevaya	140,60	6,48	2,71	0,69	90,12	5,12	11,42	0,79	82,67
23	балка Максимова / Maksimova valley	150,79	11,05	2,81	0,77	85,36	6,04	7,10	0,84	86,02
24	Сосыка (верхнее течение) / Sosyka (upperflow)	490,68	8,46	2,78	1,07	87,70	8,43	11,79	1,15	78,63
25	Сосыка (среднее течение) / Sosyka(middleflow)	513,08	10,52	4,23	2,03	83,22	5,59	6,69	1,82	85,90
26	Сосыка (нижнее течение) / Sosyka(downflow)	208,26	15,67	6,18	4,17	73,98	10,33	11,00	2,94	75,74
27	балка Широкая / Shirokaya valley	110,19	4,02	3,90	0,14	91,94	1,92	6,12	0,01	91,94
28	балка Добренькая / Dobrenkaya valley	181,10	6,29	3,76	1,22	88,74	2,57	5,28	1,15	91,01
29	Устьевая часть реки Ея / Estuary of the Eyariver	423,80	12,57	23,09	1,91	62,43	4,54	24,04	2,95	68,47

Территория в целом / Territory as a whole	8654,18	5,84	4,22	1,37	88,58	5,57	9,17	1,16	84,10
--	---------	------	------	------	-------	------	------	------	-------

Рисунок 7 иллюстрирует некоторые результаты распознавания на спутниковых снимках типов землепользования и их динамику в бассейне р. Ея за период 1999–2021 гг. Обратимся к структуре землепользования. В 2021 г. в бассейне р. Ея сельскохозяйственные поля занимали 84,1% общей площади, плавни и лесополосы – 9,17%, населенные пункты – 5,57%, водные объекты – 1,16% (табл. 2). В каждом из 29 выделенных бассейнов низшего порядка сельскохозяйственные поля доминируют с долей земель от 68,5 до 91,9%, демонстрируя наименьшую изменчивость в структуре землепользования. Лишь в одном бассейне (устьевая часть реки Ея) с площадью плавней 24% доля сельскохозяйственных полей оказалась менее 70%, что свидетельствует о существенном участии агроценозов в ландшафтообразовании. Относительная изменчивость других типов землепользования на порядок выше и имеет сопоставимые показатели, отражая сложившуюся в настоящее время структуру землепользования на данной территории Азово-Кубанской равнины

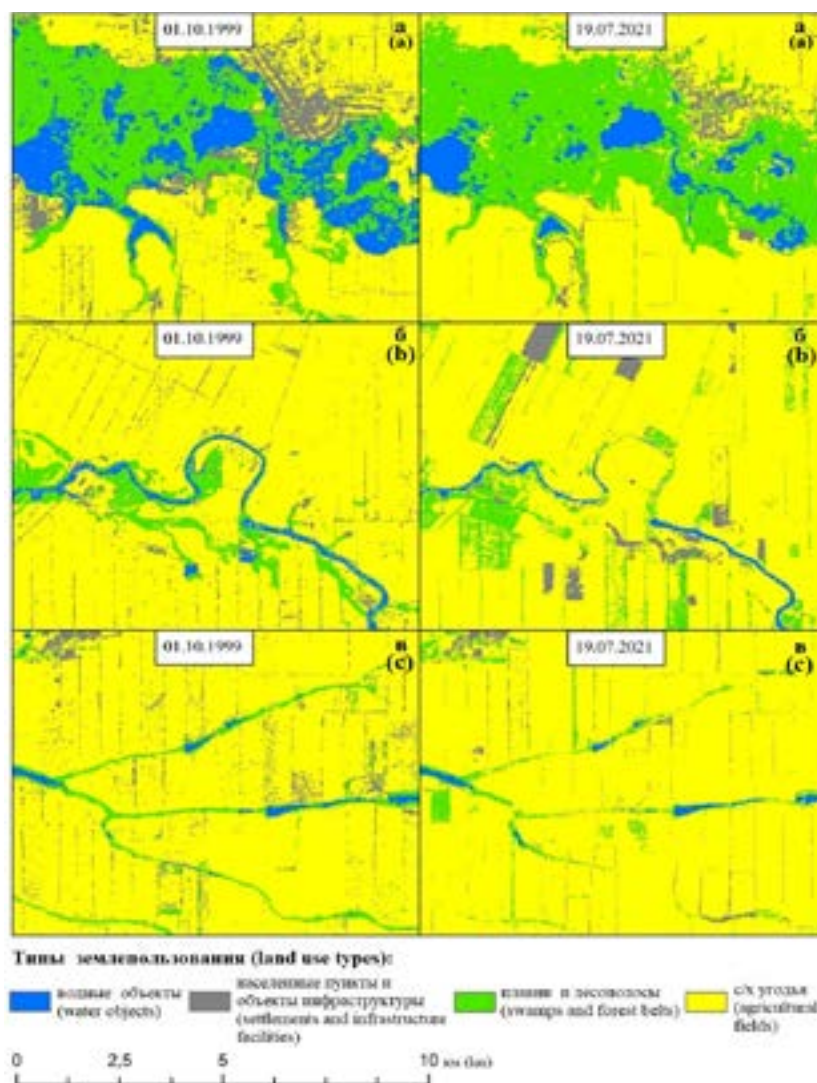


Рис. 7. Дешифрирование типов землепользования по данным спутников Landsat и примеры изменений землепользования в 1999–2021 гг. в бассейне р. Ея в районе населенных пунктов с. Елизаветовка (а), ст. Крыловская (б), пос. Комсомольский и пос. Заветы Ильича (в) /

Fig. 7. Recognition of land use types from Landsat satellites and examples of land use changes in 1999–2021 in the Eya river basin in the area of settlements Elizavetovka (a), Krylovskaya (b), Komsomolsky and Zavety Iliche (v)

Вместе с тем, за 1999–2021 гг. структура землепользования в бассейне р. Ея (табл. 2) претерпела характерные изменения, выразившиеся, прежде всего, в сокращении площади сельскохозяйственных полей с 88,6 до 84,1%. Такое сокращение сопровождалось увеличением площади населенных пунктов (урбанизация) (рис. 7) и заболоченных территорий. Ранее подобная временная динамика в структуре землепользования отмечена нами в бассейнах р. Бейсуг и р. Челбас [Погорелов и др., 2021, 2022]. Выявленные преобразования в бассейне р. Ея и в частных бассейнах следует рассматривать с позиции динамики гидрографических характеристик, к которым относятся урбанизированность и распаханность территории.

Среди гидрографических характеристик наиболее показательной в аспекте изменения речной сети является длина водотоков (табл. 3). В целом в бассейне р. Ея за 1999–2021 гг. произошло весьма существенное сокращение общей длины водотоков – с 3221,5 до 2674,6 км, то есть на 17,1%, за счет преобразований водно-эрозионной сети в частных бассейнах. За 22 года отмечено уменьшение относительной суммарной длины водотоков в каждом их частных бассейнов – от 2,6% (р. Егорлычек) до 27,8% (р. Терновка). Сопоставимое сокращение относительной длины водотоков отмечено в крупных речных бассейнах Азово-Кубанской равнины – бассейнах р. Бейсуг (на 17,2%) [Погорелов и др., 2021] и р. Челбас (на 16,5%) [Погорелов и др., 2022]. Это свидетельствует о деградации речной сети как общем явлении на Азово-Кубанской равнине. Наряду с повсеместным сокращением длины водотоков наблюдается и пропорциональное уменьшение густоты эрозионной сети, которая определяет активность флювиальных процессов и дренированность исследуемой территории.

Таблица 3 / Table 3

Изменения за 1999–2021 гг. длины водотоков и площади поймы / Changes for 1999–2021 in the length of watercourses and the density of the erosion network

№	Частные бассейны / Private basin	Площадь бассейна, км ² / Area of basin, km ²	Длина водотоков, км / Length of water object, km			Площадь поймы, км ² / Floodplain area, km ²		
			1999 г. / 1999 year	2021 г. / 2021 year	Изменение за 1999–2020 гг., % / Change for 1999–2020 year, %	1999 г. / 1999 year	2021 г. / 2021 year	Изменение за 1999–2021 гг., % / Change for 1999–2020 year, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Горькая / Gorkaya	311,80	109,05	80,61	-26,09	10,14	7,82	-22,91
2	Корсун / Korsun	609,49	156,04	135,66	-13,06	16,36	14,67	-10,31
3	Терновка / Ternovka	466,37	221,28	159,77	-27,80	23,71	17,01	-28,26
4	балка Водяная / Vodyanaya valley	108,64	29,15	24,68	-15,32	3,96	3,32	-16,07
5	Терноватая / Терноватая	114,35	32,87	30,69	-6,61	3,24	2,89	-10,59
6	Плоская / Ploskaya	346,37	91,62	83,72	-8,62	10,37	9,38	-9,55

7	Ея (верхнее течение) / Eya (upperflow)	480,68	204,79	165,83	-19,02	25,49	21,84	-14,32
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	Ея (среднее течение 2) / Eya (middleflow 2)	339,73	149,69	114,74	-23,35	23,19	19,36	-16,51
9	Ея (среднее течение 1) / Eya (middleflow 1)	406,17	216,88	175,12	-19,26	33,12	21,94	-33,76
10	Ея (нижнее течение) / Eya (downflow)	850,70	476,97	404,59	-15,18	119,50	87,39	-26,87
11	Весёлая / Vesolaya	342,47	123,17	93,48	-24,10	13,71	9,59	-30,03
12	Мокрая Грязнуха / Mokraya Gryaznukha	108,15	34,31	33,13	-3,42	4,11	3,84	-6,65
13	Егорлычек / Yegorlychek	156,15	48,33	47,10	-2,55	4,99	4,85	-2,87
14	Гезова / Gezova	120,12	0,40	0,34	-16,05	3,06	2,64	-13,86
15	Грузская / Gruzskaya	160,82	49,67	43,92	-11,58	5,86	5,19	-11,47
16	Кавалерка (верхнее течение) / Kavalerka (upperflow)	313,86	84,10	73,93	-12,09	9,98	8,39	-15,91
17	Кавалерка (нижнее течение) / Kavalerka (downflow)	205,15	89,76	68,44	-23,75	11,06	9,19	-16,92
18	Куго-Ея (верхнее течение) / Kugo-Eya (upperflow)	495,17	168,30	142,19	-15,52	19,40	16,66	-14,09
19	Куго-Ея (нижнее течение) / Kugo-Eya (downflow)	355,51	151,88	136,75	-9,96	17,35	16,21	-6,59
20	балка Смертина / Smertina valley	74,00	26,14	20,36	-22,11	3,19	2,08	-34,75
21	балка Попова / Popova valley	69,98	19,81	16,90	-14,70	3,02	2,51	-16,87
22	Бичевая / Bichevaya	140,60	42,29	36,58	-13,50	5,32	4,58	-13,87
23	балка Максимова / Maksimova valley	150,79	46,09	34,51	-25,13	5,82	4,67	-19,81
24	Сосыка (верхнее течение) / Sosyka (upperflow)	490,68	172,08	133,81	-22,24	20,69	16,55	-19,98
25	Сосыка (среднее течение) / Sosyka(middleflow)	513,08	238,71	208,54	-12,64	35,18	31,04	-11,77
26	Сосыка (нижнее течение) / Sosyka(downflow)	208,26	73,57	67,52	-8,22	23,32	18,24	-21,76
27	балка Широкая / Shirokaya valley	110,19	38,61	34,50	-10,66	4,50	3,68	-18,26
28	балка Добренькая / Dobrenkaya valley	181,10	65,73	59,38	-9,66	9,62	8,56	-11,03

29	Устьевая часть реки Ея / Estuary of the Eya river	423,80	65,23	47,87	-26,62	117,28	115,39	-1,61
	Весь бассейн / Whole basin	8654,18	3226,52	2674,65	-17,10	586,53	489,48	-16,55

Пространственная дифференция преобразований речной сети представлена на картах (рис. 6 и 8). В исследуемом бассейне сокращению длины водотоков в наибольшей мере подвержены водосборы в верхней и средней части бассейна (Горькая, Терновка, Весёлая, балка Смертина, Сосыка в верхнем течении и др.) (рис. 6), где распашка русел и «вертикальная» перепланировка территории наиболее выражены. Установлено, что в результате ползучей экспансии пашни наблюдается повсеместное «отмирание» верхних звеньев водно-эрозионной сети, а в ряде случаев и участков поймы (табл. 3, рис. 8). Распашка склонов речных долин и балок до уреза воды приводит к замене специфической пойменной растительности сельскохозяйственными культурами. В некоторых случаях в течение 10–15 лет после перепланировки и распашки на поверхности водосборов практически исчезают какие-либо признаки дренажной сети и почвенно-растительного покрова пойм (рис. 5). В совокупности это приводит к перестройке водообменных процессов территории, чему способствует заиление русел, зарегулированность стока, антропогенная трансформация растительности в агроценозах.

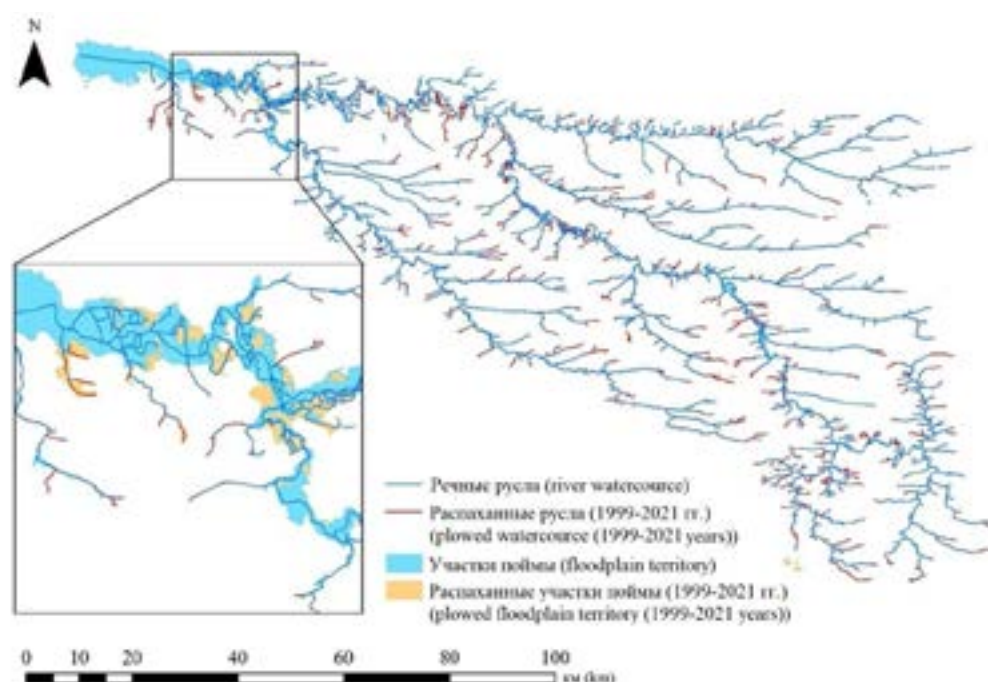


Рис. 8. Изменения водно-эрозионной сети в бассейне р. Ея за 1999–2021 гг. вследствие распашки /

Fig. 8. Changes in the system of river channels in the Eya river basin for 1999–2021 due to plowing

Реки Азово-Кубанской равнины имеют естественные низкие значения коэффициента стока. По данным [Суслов, 2015] у р. Ея с действующей площадью водосбора, т.е. с которой происходит формирование поверхностного и грунтового стока, он равен 0,4. Поверхностное и грунтовое питание степных рек сосредоточено на ограниченной поверхности водосбора. В бассейне р. Ея фактически реч-

ной сток формируется примерно на 10% площади бассейна. Один из механизмов нарушения водообменных процессов проявляется через уменьшение коэффициента стока за счет наблюдаемого уменьшения длины и густоты речной и балочной сети.

Выводы

1. Влияние техногенных преобразований ландшафтов и гидрографических характеристик речных геосистем (длина водотоков, густота эрозионной сети, распаханность и урбанизированность водосборов) на водообменные процессы и водный баланс территории Азово-Кубанской равнины остается плохо изученным. В условиях семиаридного климата равнинной части Краснодарского края нарушение дренирующей способности территории увеличивает затраты на сохранение ценных свойств сельскохозяйственных земель.

2. В бассейне р. Ея на площади 8654 км² по состоянию на 2021 г. по данным спутниковых снимков и полевых исследований в речных руслах насчитывается 1160 перегораживающих сооружений. Строительство плотин и прудов в бассейне р. Ея (более 700) вызывает «стихийное» регулирование стока и радикальную перестройку вещественно-обменных процессов в реках.

3. По данным дешифрирования спутниковых снимков в бассейне р. Ея в 2021 г. на сельскохозяйственные угодья приходилось 84,1% площади, на населенные пункты и объекты инфраструктуры – 5,57%, на болота и лесополосы – 9,17%, на водные объекты – 5,57%. В течение 1999–2021 гг. произошло небольшое (на 4,5%) сокращение площади сельскохозяйственных земель при росте площади населенных пунктов и заболоченных территорий.

4. Преобразования гидрографической сети наиболее выражены в повсеместном сокращении длины водотоков и уменьшении плотности водно-эрозионной сети. Причина – распашка склонов речных долин и перепланировка поверхности водосборов. В каждом из выделенных 29 частных бассейнов за 22 года произошло уменьшение длины водотоков. В целом в бассейне р. Ея общая длина водотоков уменьшилась с 3221 до 2675 км или на 17,1%. Следствие – повсеместное отмирание верхних участков речной и балочной сети, сокращение площади пойм, занятой влаголюбивой растительностью.

5. Выполненный анализ расширяет представления о происходящих в последние десятилетия изменениях гидрографических характеристик рек в степной зоне Краснодарского края и отчасти Ростовской области. Полученные результаты закладывают основу для описания механизмов вещественного обмена и выявления гомеостатичности речных систем, обоснования направленности и темпов их преобразований, а в перспективе – оценки влияния этих механизмов на геохимические эффекты перестройки степных ландшафтов.

Литература

1. Скрипчинский А.В., Бадов А.Д., Бадов О.А., Борисов Д.Д. Анализ состояния водозащитной зоны городского округа Дербент на основе ГИС-технологий. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 180–192. – DOI 10.46698/VNC.2022.39.75.014. – EDNYXVSZQ.
2. Барабанов А.Т., Панов В.И. Преобразование гидрологического режима степных агроландшафтов. // *Степи Северной Евразии*. – 2021. – Т. 9. – С. 105–110.

3. Белюченко И.С. Функционирование степных рек Краснодарского края и перспективы их развития. // Экология речных ландшафтов: сб. статей по материалам I Межд. экол. конф. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – С. 28–43.
4. Белюченко И.С. Экологическое состояние бассейнов степных рек Кубани и перспективы их развития. // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2010. – Т. 6. №2. – С. 5–12.
5. Демин А.П. Трансформация состояния орошаемых земель в степных регионах России. // Степи Северной Евразии. – 2021. – Т. 9. – С. 260–266.
6. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании: монография. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. – 63 с.
7. Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: Гидрография и режим стока. – Ростов-на-Д: Донской издательский дом, 2021. – 672 с.
8. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Дудкина А.А., Копанева О. В. О техногенных преобразованиях речной сети на Азово-Кубанской равнине (реки Челбас, Албаши). // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». – 2022. – Т. 28(2). – С 567–582. – DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582
9. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Киселев Е.Н. Об изменении гидрографических характеристик рек в степных агроландшафтах за последние десятилетия (на примере бассейна р. Бейсуг, Краснодарский край). // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». – 2021. – Т. 27(4). – С. 19–32. – DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. / Под ред. В.В. Куприянова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 447 с.
11. Сазонов А.Д., Закруткин В.Е, Решетняк О.С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 117–130. – DOI 10.46698/VNC.2022.37.47.009. – EDNRKRHGF.
12. Суслов О.Н. Степные реки Краснодарского края. – Краснодар: Куб ГАУ, 2015. – 256 с.
13. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
14. 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. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
15. Экология речных ландшафтов. // В сб. статей по материалам I Межд. экол. конф. / Отв. за вып. Н.Н. Мамась. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 267 с.
16. ASTER Global DEM Validation. Summary Report. ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. – 2009. – 28 p.
17. Atroshchenko V., Dyachenko R., Gura D., Vidovskiy L., Dovgal V., Doumit J. Analysis of Methods for Classifying and Segmenting 3D Images. // Communications in Computer and Information Science. – 2022. – 1703 CCIS. – pp. 104–116. – DOI: 10.1007/978-3-031-21340-3_10.
18. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kiselev E.N., Lipilin D.A. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban river, Russia. // Journal of Geographical Sciences. – 2021. – Vol. 31. – pp. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.
19. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., et al. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. // Geology and Geophysics of the South of Russia. – 2019. – Vol. 9. No.4. – pp. 87-101. DOI 10.23671/VNC.2019.4.44491. EDN TEBPHV.
20. Pazur R., Prishchepov A.V., Myachina K., Verburg P.H., Levykin S., Ponkina E.V., Kazachkov G., Yakovlev I., Akhmetov R., Rogova N., Bürgi M. Restoring steppe landscapes: pat-

terns, drivers and implications in Russia's steppes. // *Landscape Ecology*. – 2021. – Vol. 36. – pp. 407–425. DOI: 10.1007/s10980-020-01174-7

21. Kraemer R., Prishchepov A.V., Muller D., Kuemmerle T., Radeloff V.C., Dara A., Terekhov A., Fruhauf M. Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former Virgin Lands area of Kazakhstan. // *Environmental Research Letters*. – 2015. – Vol. 10(5). 054012. DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054012

22. Moon D. *The Plough that Broke the Steppes*. Oxford University Press, Oxford. – 2013. – 319 p.

23. Ellis E.C., Klein Goldewijk K., Siebert S., Lightman D., Raman-kutty N. Anthropogenic transformation biomes, 1700 to 2000. // *Global Ecology and Biogeography*, (Global Ecol. Biogeogr.). – 2010. – No.19. – pp. 589–606. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x

References

1. Skripchinsky A.V., Badov A.D., Badov O.A., Borisov D.D. Analysis of the state of the water protection zone of the urban district of Derbent based on GIS technologies. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No.4. pp. 180-192. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.75.014. EDN YXVSZQ.

2. Barabanov A.T., Panov V.I. Transformation of the hydrological regime of steppe agricultural landscapes. *Steppes of Northern Eurasia*. 2021. Vol. 9. pp. 105-110.

3. Belyuchenko I.S. Functioning of the steppe rivers of the Krasnodar territory and prospects for their development. *Ecology of river landscapes: coll. articles on materials I Int. ecol. conf. Rep. for issue N. N. Mamas*. Krasnodar. KubGAU, 2017. pp. 28-43.

4. Belyuchenko I.S. Ecological state of the basins of the steppe rivers of the Kuban and prospects for their development. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2010. Vol. 6. No.2. pp. 5-12.

5. Demin A.P. Transformation of the state of irrigated lands in the steppe regions of Russia. *Steppes of Northern Eurasia*. 2021. Vol. 9. pp. 260-266.

6. Korytny L.M. *Basin concept in nature management: monograph*. Irkutsk. Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, 2001. 63 p.

7. Lurie P.M., Panov V.D. *Rivers of the Azov Sea basin: Hydrography and runoff regime*. Rostov-on-Don. Donskoy publishing house, 2021. 672 p.

8. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Dudkina A.A., Kopaneva O.V. On technogenic transformations of the river network in the Azov-Kuban Plain (Chelbas, Albashi rivers). *Proceedings of the International Conference «InterCarto. InterGIS»*. 2022. Vol. 28(2). pp. 567-582. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582

9. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kiselev E.N. On the change in the hydrographic characteristics of rivers in the steppe agrolandscapes over the past decades (on the example of the Beisug river basin, Krasnodar Territory). *Proceedings of the International Conference «InterCarto. InterGIS»*. 2021. Vol. 27(4). pp. 19–32. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32.

10. *Surface water resources of the USSR. T. 8. North Caucasus*. Ed. V.V. Kupriyanov. Leningrad. Gidrometeoizdat, 1973. 447 p.

11. Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S. Temporal variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoi Egorlyk River basin under anthropogenic impact and climate change. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No.2. pp. 117-130. DOI 10.46698/VNC.2022.37.47.009. EDN RKRHGF.

12. Suslov O.N. *Steppe rivers of the Krasnodar Territory*. Krasnodar. KubSAU, 2015. 256 p.

13. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)

14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas

by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

15. Ecology of river landscapes: Sat. articles on materials I Int. ecol. conf. Rep. for issue N.N. Mom. Krasnodar. KubGAU, 2017. 267 p.

16. ASTER Global DEM Validation. Summary Report. ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAAC, USGS/EROS. 2009. 28 p.

17. Atroshchenko V., Dyachenko R., Gura D., Vidovskiy L., Dovgal V., Doumit J. Analysis of Methods for Classifying and Segmenting 3D Images. *Communications in Computer and Information Science*. 2022. 1703 CCIS. pp. 104–116. DOI: 10.1007/978-3-031-21340-3_10

18. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kiselev E.N., Lipilin D.A. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban river, Russia. *Journal of Geographical Sciences*. 2021. Vol. 31. pp. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.

19. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., et al. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No.4. pp. 87–101. DOI 10.23671/VNC.2019.4.44491. EDN TEBPHV.

20. Pazur R., Prishchepov A.V., Myachina K., Verburg P.H., Levykin S., Ponkina E.V., Kazachkov G., Yakovlev I., Akhmetov R., Rogova N., Bürgi M. Restoring steppe landscapes: patterns, drivers and implications in Russia's steppes. *Landscape Ecology*. 2021. Vol. 36. pp. 407–425. DOI: 10.1007/s10980-020-01174-7

21. Kraemer R., Prishchepov A.V., Muller D., Kuemmerle T., Radeloff V.C., Dara A., Terekhov A., Fruhauf M. Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former Virgin Lands area of Kazakhstan. *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10(5). 054012. DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054012

22. Moon D. *The Plough that Broke the Steppes*. Oxford University Press, Oxford. 2013. 319 p.

23. Ellis E.C., Klein Goldewijk K., Siebert S., Lightman D., Raman-kutty N. Anthropogenic transformation biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, (Global Ecol. Biogeogr.). 2010. No.19. pp. 589–606. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x

Алборову Ивану Давыдовичу – 80 лет!



Доктор технических наук, профессор Алборов Иван Давыдович

Иван Давыдович Алборов, родился в крестьянской семье 14 июня 1943 года в селении Арашенда, Ахметского района Грузинской ССР. Отец и мать не владели грамотой, но, при этом, отличались невероятным трудолюбием, Самое главное - знания родители считали главным достоянием детей и отдавали все для достижения этой цели. В 1951 году Иван Давыдович, один многих детей, был зачислен в первый класс грузинской Арашендской восьмилетней школы, где проучился до 1953 года. Уже в 1953 г. он был зачислен в первый класс Сунженской средней школы и окончил ее с серебряной медалью в 1962 г. В том же году поступил на первый курс горно-геологического факультета Северо-Кавказского горно-металлургического института (СКГМИ) по специальности «Технология и комплексная механизация разработки месторождений полезных ископаемых», который окончил с отличием в 1967 году, получив квалификацию горного инженера. В 1968 году по направлению И.Д. Алборов был принят инженером в пылегазовентиляционную лабораторию Орджоникидзевского ремонтно-монтажного управления Министерства цветной металлургии СССР, где проработал до 1972 года. В 1971 году он был принят в заочную аспирантуру СКГМИ по горной специальности. В 1973 году был переведен в качестве инженера исследователя в научно-исследовательский сектор Северо-Кавказского горно-металлургического института, где продолжил заниматься научными исследованиями. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Очистка вентиляционных потоков, поступающих в рудник» и начал работать ассистентом на кафедре Охраны труда и окружающей среды. В 1975-1977 гг. выезжал в Норильский Горно-металлургический комбинат со строительным студенческим отрядом в

150 студентов, где выполнялись работы по возведению мягкой кровли на предприятиях комбината: административно-бытового комбината рудника «Октябрьского», «Комсомольского» и других ответственных объектов.

В 1994 году Иван Давыдович Алборов окончил курсы по профессиональной переподготовке при Московском горном университете по специальности «Экология и повышение эффективности использования природных ресурсов» с присвоением квалификации инженера-эколога горного производства. В 1988 году был избран заведующим кафедрой «Охраны труда и окружающей среды» СКГМИ, а в 1990 году перешел на кафедру «Экология» в том же институте. В 1995 году защитил докторскую диссертацию на тему «Технология управления вентиляционными потоками и окружающей природной средой высокогорных рудников». Таким образом, в СКГМИ Иван Давыдович Алборов вырос профессионально до доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Экология и техносферная безопасность», которую возглавляет в настоящее время.

В 1996 году возглавил диссертационный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций в СКГМИ по научной специальности 11.00.11, который в 2000 г. был преобразован в диссертационный совет 25.00.36 – «Геоэкология» по отраслям. В 1996 году И. Д. Алборов вошел в состав экспертного совета ВАК России по инженерным специальностям, где состоял до 2000 года.

За прошедшие годы И.Д. Алборов воспитал двух докторов и 15 кандидатов технических наук. В течение четверти века (1976-1990 гг.) вел активную научно-исследовательскую работу по обеспечению нормальных условий труда на объектах цветной металлургии России: Садонский СЦК, Тырныаузский ВМК, Норильский ГМК, Укрцинк, Североуральский медеплавильный завод, Рязцветмет, Алавердский медеплавильный завод (Республика Армения), Канакерский алюминиевый завод (Республика Армения), Кировобадский алюминиевый завод (Республика Азербайджан), Дастакертский вольфрамовый рудник (Республика Армения) и др.

Таким образом, вопросы экологической и технологической безопасности стали основой научной деятельности Ивана Давыдовича. Он является автором/соавтором 7 учебных пособий, рекомендованных Учебно-методическим объединением по техносферной безопасности, имеет около 650 научных трудов, в международных российских и региональных изданиях в журналах, входящих в перечень ВАК, Скопус и WoS. Еще он автор 34 патентов. В 2005 г. он возглавил лабораторию геоэкологии Геофизического института Владикавказского научного центра РАН, где по настоящее время руководит научным направлением «Геоэкология и рациональное природопользование в условиях горных территорий».

С 1999 года по настоящее время И.Д. Алборов является заместителем председателя Международного общественного движения «Высший совет осетин», он - зам. председателя Общественной палаты РСО-Алания, председатель комиссии по экологии, председатель Совета общественности при Минприроды РСО-Алания, вице-президент Северокавказского отделения Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, эксперт Минприроды РФ по экологии, председатель совета общественности Минприроды РСО-Алания, академик РАЕН, МАНЭБ, член редколлегии журналов «Безопасность жизнедеятельности», Вестник МАНЭБ.

И.Д. Алборов – заслуженный деятель науки и техники Республики Северная Осетия – Алания, заслуженный работник высшей школы РФ, заслуженный эколог РФ. В 1970 году в ознаменование 100-летия В.И.Ленина был награжден медалью

«За доблестный труд», позже был награжден орденом Дружбы России, затем медалью «Во славу Осетии». Он награждался почетными грамотами главы РСО-Алания, парламента Чеченской республики, Общественной палаты России, Владикавказского научного центра РАН.

В 1993 году Алборов И.Д. организовал Северо-Кавказское отделение Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ) и по настоящее время является его президентом. МАНЭБ неоднократно выступала экспертом по важнейшим проектам строительства РСО-Алания: каскад Зарамагских ГЭС, Ардонский нефтеперерабатывающий завод, реконструкция ОАО «Электроцинк», где он всегда стоял на принципах отстаивания гражданских прав и интересов трудящихся и народа Республики Северная Осетия-Алания.

И.Д. Алборов все много лет ведет большую научно-исследовательскую работу по совершенствованию технологии добычи полезных ископаемых в Тырныаузском ГОКе и Норильском ГМК. Его разработки по совершенствованию вентиляции горных выработок, стали основой проектирования вентиляции на горных рудниках, а системы борьбы с пылью на рудниках Норильского ГМК был использован при сухом бурении шпуров в условиях Крайнего Севера. Новаторскую работу проводил и на рудниках Садонского комбината, используя новые технологии улавливания пыли на всех этапах добычи руд.

Патенты, полученные И.Д. Алборовым использовались в технологии очистки газов при выщелачивании вельцоокислов на ОАО «Электроцинк», что существенно снизило уровень выбросов вредных газов в атмосферу и повысило извлечение всех видов вельцоокислов. Он входил в состав экспертной группы Общественной палаты РСО-Алания по оценке негативного воздействия ОАО «Электроцинк».

В течение всей работы в СКГМИ долгие годы вел активную общественную работу в должности начальника стройотряда, председателя профкома, секретаря партбюро и др. В последние годы И.Д. Алборов возглавляет экспертную комиссию при Ученом совете СКГМИ (ГТУ), избран заместителем председателя Ученого совета, который стал стабилизирующим этапом в улучшении общественной жизни института. Он стоит на принципиальных позициях при решении ключевых вопросов в среде сотрудников и профессорско-преподавательского состава.

И.Д. Алборов вносит значительный вклад в укрепление дружбы и добрососедства между народами, организывает дискуссионные встречи, круглые столы, форумы для развития доверия и сотрудничества между проживающими в республике народами. Широко использует в переговорном процессе традиционную народную дипломатию с учетом адатов – законов гор. Внес существенный вклад в урегулировании Осетино-Ингушского конфликта, принимал участие в разработке Текста примирения между конфликтующими сторонами.

Значительная общественно значимая работа ведётся И.Д. Алборовым в должности председателя Северо-Осетинской общественной организации «Национально-культурный Центр имени Коста Хетагурова». За короткое время были рассмотрены, приняты конкретные предложения и реализованы мероприятия по вопросам изучения родного языка в образовательных учреждениях, пропаганды культуры, традиционного театрального искусства, национальной литературы, молодежной политики. Им ведется большая целенаправленная работа по привитию экологической и общей культуры среди населения, патриотическая работа среди студенче-

ской молодежи. Проводятся ежегодные конкурсы среди подрастающего поколения Северной и Южной Осетии по мотивам произведений К.Л. Хетагурова.

Его высокий авторитет среди всех слоёв населения и общественной жизни снижали завидное доверие, и, как следствие, успех во всех направлениях его неутомимой гражданской деятельности. К его мнению прислушиваются в общественной и научной среде республики и, как правило, его учитывают при принятии судьбоносных проектов и предложений. Иван Давыдович Алборов пользуется уважением и пониманием среди научной интеллигенции и гражданского общества республики.

Сегодня 14 июня 2023 года, в этот знаменательный день юбилея от имени коллектива Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук (ГФИ ВНЦ РАН), Редакции журнала «Геология и геофизика Юга России» поздравляем известного ученого, доктора технических наук, профессора, педагога, наставника молодежи, друга и просто настоящего мужчину Ивана Давыдовича Алборова с 80-летием и пожелать здоровья, успехов в делах и теплоты близких!

*Главный редактор,
Научный руководитель ГФИ ВНЦ РАН,
доктор физико-математических наук, профессор,
Владислав Заалишвили.
14 июня 2023 года*

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 смежных научных направлений.

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, 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. Вла-

дикавказ, 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. 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, ученая степень и звание (кегль 14 полужирный курсив, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки ответственного автора.

Аннотация должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то 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 аннотацию на русском. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце аннотации обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, const , $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$ и т. п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным

элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (MBT/cm^2) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (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 (не по разделам!) и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате виде, 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, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

The journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth’s crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4. Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6. Hydrogeology; 1.6.9. Geophysics; 1.6.10. Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11. Geology, prospecting and exploration 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. Geoinformatics, cartography; 2.8.6. Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8. Geotechnology, mining machines, and related scientific areas.

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, academic degrees and titles (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 www.naukagor.ru (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and υ , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value

figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) 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 street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 2. 2023 г. Том 13)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 19.06.2023 г. Дата фактического выхода 28.06.2023 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 22,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 72.

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.

362000, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3