

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 3 / 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
№ 3 / 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 Веллуру, Индия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

д.г.-м.н., проф. **С.Г. Парада**

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

363110, РСО-Алания, Пригородный район,

с. Михайловское, ул. Вильямса, 1

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 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., Geophysical
Institute – the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center,
RAS, Vladikavkaz

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

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

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

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

Executive Secretary

Dmitry A. Melkov, Cand. Sci. (Tech.), Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz

Managing Editor

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

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

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

The Journal is published since 2011.

Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

Vladikavkaz Scientific Centre of RAS

Founder address

1 Williamsa Str., Mikhailovskoe,

Prigorodny district,

RNO-Alania, 363110, Russia

Tel.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Publisher:

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

Publisher and Editorial address:

93a, Markova Str., Vladikavkaz, RNO-Alania, 362002 Russia

Tel.: 8 (8672) 764084; Fax: +7 (8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2023

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

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Стогний Г.А., Стогний В.В.

Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа 6

ГЕОФИЗИКА

Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я.

Сейсмологические индикаторы геодинамических обстановок формирования землетрясений на территории Турции в 2023 году 19

Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Милюков В.К., Мионов А.П., Хубаев Х.М., Мельков Д.А., Кануков А.С., Абаева З.В., Шманатов Г.В., Ревазов М.О.

Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных 33

Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А.

Геофизические исследования на карбовом полигоне Чеченской Республики 49

Mammadli T.Ya., Muradov R.B.

Tectonics of source zones of strong earthquakes in the southeastern part of the Greater Caucasus 63

Хуторской М.Д.

Региональное тепловое поле и геотермальные ресурсы Кавказского региона 73

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ**Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А.**

Среднеюрские вулканогенные породы южной окраины Большого Кавказа и Абхазо-Рачинской зоны Закавказского срединного массива: геодинамическая типизация и минерагения 89

Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Гибков Е.В., Скляренко Г.Ю.

Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса 102

Парада С.Г.

Геодинамические обстановки формирования рудно-магматических систем Восточного Донбасса по петрохимическим данным 120

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**Даукаев А.А., Гайсумов М.Я., Бадаев С.В.**

Доюрское основание Терско-Каспийского прогиба в связи с проблемой глубинной нефти и формировании ее скоплений 131

Неркарарян А.Е., Харченко В.М., Самусев Д.Д., Стасенко А.А.

Влияние геодинамических условий на формирования залежей нефти и газа (на примере территории Западной Сибири и Восточного Предкавказья) 145

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Матвеева В.А., Лукьянова А.В.

Оценка эффективности использования флюсового известняка Сокольско-Ситовского месторождения в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв 153

Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Тотурбиева У.Д.

Теплоизоляционный пенобетон безавтоклавного твердения из местного нерудного минерального сырья 167

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ И ГЕОМЕХАНИКА

Голик В.И., Бурдзиева О.Г.

К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса 178

Мохов А.В.

Гидравлические аспекты режима гидросферы на полях угольных шахт (на примере Восточного Донбасса) 191

CONTENTS

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

- Stogny G.A., Stogny V.V.**
The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments 6

GEOPHYSICS

- Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya.**
Seismological indicators of geodynamic conditions of earthquakes formation in Turkey in 2023 19
- Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu., Milyukov V.K., Mironov A.P., Khubaev Kh.M., Melkov D.A., Kanukov A.S., Abaeva Z.V., Shmanatov G.V., Gabaraev A.F., Revazov M.O.**
Deep structure, seismicity, tectonics of the northern flank of the Greater Caucasus and the Terek-Caspian trough (North Ossetia) within the framework of a unified kinematic model based on new geophysical data 33
- Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A.**
Geophysical research on the carbon polygon of the Chechen Republic 49
- Mammadli T.Ya., Muradov R.B.**
Tectonics of source zones of strong earthquakes in the southeastern part of the Greater Caucasus 63
- Khutorskoy M.D.**
Regional thermal field and geothermal resources of the Caucasus region 73

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS,
MINERAGENY

- Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A.**
Middle Jurassic volcanogenic rocks of the southern margin of the Greater Caucasus and the Abkhazian-Racha zone of the Transcaucasian median massif: geodynamic typification and minerageny 89
- Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu.**
Authigenic Iron Minerals in River Sediments of the Eastern Donbass 102
- Parada S.G.**
Geodynamic conditions of formation of ore-magmatic systems of Eastern Donbass according to petrochemical data 120

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF OIL AND GAS FIELDS

- Daukaev A.A., Gaysumov M.Ya., Badaev S.V.**
Pre-Jurassic basement of the Terek-Caspian basin in connection with the problem of deep oil and the formation of its accumulations 131
- Nerkararian A.E., Kharchenko V.M., Samusev D.D., Stasenko A.A.**
The influence of geodynamic conditions on the formation of oil and gas deposits (on the example of the territory of Western Siberia and Eastern Ciscaucasia) 145

GEOECOLOGY

- Matveeva V.A., Lukyanova A.V.**
Evaluation of the effectiveness of the use of fluxing limestone of Sokol-Sitov deposit as a ameliorant for the neutralization of acidic soils 153
- Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbiev U.D.**
Heat-Insulating foam concrete without autoclave hardening from local non-metal mineral raw 167

GEOTECHNOLOGY AND GEOMECHANICS

- Golik V.I., Burdzieva O.G.**
Geophysical monitoring of Sadon field development technology 178
- Mokhov A.V.**
Hydraulic aspects of the hydrosphere regime in the fields of coal mines (on the example of Eastern Donbass) 191

УДК 550.34:551.1(082)

DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001

Оригинальная статья

Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа

Г.А. Стогний , В.В. Стогний 

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

Статья поступила: 05.06.2023, доработана: 02.09.2023, принята к публикации: 08.09.2023

Резюме: Актуальность работы. В региональном плане граница кристаллической коры сближающихся плит определяет стиль коллизионного процесса и особенности его эволюции. В большинстве предложенных коллизионных моделей формирования структуры Большого Кавказа предполагается, что Скифская плита является упором для смещающейся в северном направлении Аравийской плиты. Граница Скифской плиты и Закавказской микроплиты также во многом определяла региональную тектонику Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. В связи с этим установление южной границы Скифской плиты на уровне кристаллического основания является актуальной проблемой. **Цель работы** заключается в оценке положения глубинной южной границы Скифской плиты, перекрытой осадочными породами Центрального и Восточного сегментов мегаантиклинория Большого Кавказа, по анализу блокового строения консолидированной коры. **Методы исследования.** С целью оценки южной глубинной границы Скифской плиты выполнена интерпретация геолого-геофизических материалов на площади в тектоническом отношении отвечающей Центральному, Восточному и Юго-Восточному сегментам, обрамляющим их предгорным прогибам и структурам Скифской плиты на севере, а в южной части – Закавказской системе впадин и срединных массивов. Методы и методика работы заключались в комплексной интерпретации материалов (гравиметрических, сейсмических исследований по профилям ГСЗ и ММЗ, обобщения данных по тектоническому строению). **Результаты работы.** Показано, что консолидированная кора Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа принадлежит к Черноморско-Каспийскому геоблоку, разделенному продольным Сването-Алазанским разломом на Тырныауз-Кубачинский и Джава-Ширакский мегаблоки, характеризующие соответственно южный фланг Скифской плиты и северный фланг Закавказской микроплиты. К южному флангу Скифской плиты приурочена большая часть мезозой-кайнозойского осадочного комплекса Центрального и Восточного сегментов. Южная граница Скифской плиты на уровне консолидированной коры в пределах Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа выражена Сването-Алазанским фрагментом Большекавказского межплитного разлома, который разграничивает Скифскую плиту от Восточно-Черноморской и Закавказской микроплит.

Ключевые слова: Большой Кавказ, Скифская плита, Закавказская микроплита, консолидированная кора, межплитный разлом, тектонический блок, гравитационное поле.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук, код: FMSM-2022-0013.

Для цитирования: Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001

Original paper

The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments

G.A. Stogny , V.V. Stogny 

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

Received: 05.09.2023, revised: 02.09.2023, accepted: 08.09.2023

Abstract: Relevance. In regional terms, the boundary of the crystalline crust of the approaching plates determines the style of the collision process and the features of its evolution. Most of the proposed collision models for the formation of the Greater Caucasus structure assume that the Scythian plate is a stop-block for the northward shifting Arabian plate. The boundary of the Scythian plate and the Transcaucasian microplate also largely determined the regional tectonics of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. In this regard, the establishment of the Scythian plate southern boundary at the level of the crystalline base is an urgent problem.

Aim. The purpose of this work is to estimate the position of the deep southern boundary of the Scythian plate, overlain by sedimentary rocks of the Central and Eastern segments of the Greater Caucasus megaanticlinorium, by analyzing the block structure of the consolidated crust. **Methods.** In order to assess the southern deep boundary of the Scythian plate, an interpretation of geological and geophysical materials was carried out in the area tectonically corresponding to the Central, Eastern and South-Eastern segments, framing their of the foothill troughs of Scythian plate and structures in the north, and in the southern part – the Transcaucasian system of depressions and median arrays. The methods and methodology of the work consisted in the complex interpretation of materials (gravimetric, seismic studies on the DSS and MMS profiles, generalization of data on the tectonic structure). **Results:** It is shown that the consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments belongs to the Black Sea-Caspian geoblock, divided by the longitudinal Svaneto-Alazani fault into Tyrnyauz-Kubachi and Java-Shirak megablocks, characterizing the southern flank of the Scythian plate and the northern flank of the Transcaucasian microplate, respectively. Most of the Mesozoic-Cenozoic sedimentary complex of the Central and Eastern segments is confined to the southern flank of the Scythian Plate. The southern boundary of the Scythian plate at the level of the consolidated crust within the Central and Eastern segments of the Greater Caucasus is expressed by the Svaneto-Alazani fragment of the Bolshekavkazsky interplate fault, which delimits the Scythian plate from the Eastern Blackseas and Transcaucasian microplates.

Keywords: Greater Caucasus, Scythian plate, Transcaucasian microplate, consolidated crust, interplate fault, tectonic block, gravity field.

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

For citation: Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001.

Введение

В формировании региональной тектонической структуры Большого Кавказа основную роль играет конфигурация границ Скифской и Черноморско-Закавказской плит [Расцветаев и др., 2010]. Скифская плита в предложенных коллизионных мо-

делях Большого Кавказа [Казьмин и др., 2004; Копп, 2007; Пати́на и др., 2017; Хаин, 2009] служит упором для Восточно-Черноморской и Закавказской микроплит, которые поддвигаются в условиях движения Аравийской плиты в север-северо-восточном направлении [Reilinger et al., 2006; Tibaldi et al., 2020; Tseng et al., 2016]. Формирование северного крыла Центрального сегмента Большого Кавказа за счет надвинутой пластины земной коры Скифской плиты в результате поддвига Закавказской микроплиты рассмотрено в [Дотдугев, 1986].

Доальпийское основание Большого Кавказа согласно [Сомин, 2007] Главным Кавказским разломом разделено на два различающихся историей становления и преобразования тектонических домена: Северо-Кавказский и Сванетский. В Северо-Кавказском домене в отличие от южнее расположенного Сванетского проявился вариссийский тектогенез, выраженный в региональном метаморфизме, гранитоидном магматизме и наличии деформаций на рубеже среднего и позднего палеозоя. К выходу на поверхность палеозойского фундамента привело аномальное поднятие Центрального Кавказа в киммерийскую тектоническую эпоху [Трифонов и др., 2020]. Модель поднятия Центрального сегмента в олигоцен-миоцене предложена в работе [Vinsent et al., 2020].

Консолидированная кора Большого Кавказа изучена в пределах выходов метаморфических пород в зонах Передового и Главного хребтов Центрального сегмента [Сомин, 2007; Камзолкин и др., 2018] и в Дзирульском кристаллическом массиве [Adamia et al., 2017].

Основные региональные напряжения сжатия в зоне межплитного разлома при коллизионном процессе приурочены к уровню консолидированной коры, поэтому проблема положения и характера южной глубинной границы Скифской плиты, перекрытой осадочным чехлом мегаантиклинория Большого Кавказа, является актуальной. Данная проблема решалась на основе анализа схемы блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа, разработанной по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов.

Материалы и методы исследований

С целью обоснования южной глубинной границы Скифской плиты выполнена интерпретация геолого-геофизических материалов на площади в тектоническом отношении отвечающей Центральному, Восточному и Юго-Восточному сегментам, обрамляющим их предгорным прогибам и структурам Скифской плиты на севере, а в южной части – Закавказской системе впадин и срединных массивов. Методы и методика работы заключались в комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов. В качестве основной информации служили результаты интерпретации структуры гравитационного поля и материалов сейсмических исследований по профилям ГСЗ Степное-Бакуриани и Волгоград-Нахичевань [Павленкова, 2012] и метода микросейсмического зондирования (ММЗ) по Осетинскому профилю [Горбати́ков и др., 2015; Рогожин и др., 2015]. Материалы по анализу гравитационного поля включали изданные гравиметрические карты, а также результаты авторов по тематическим работам, в том числе по проекту РФФИ № 16-45-230343.

Районирование гравитационного поля (редукция Буге, $\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$) Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа выполнено на уровнях аномальной области, региональных и локальных максимумов и минимумов (рис. 1).

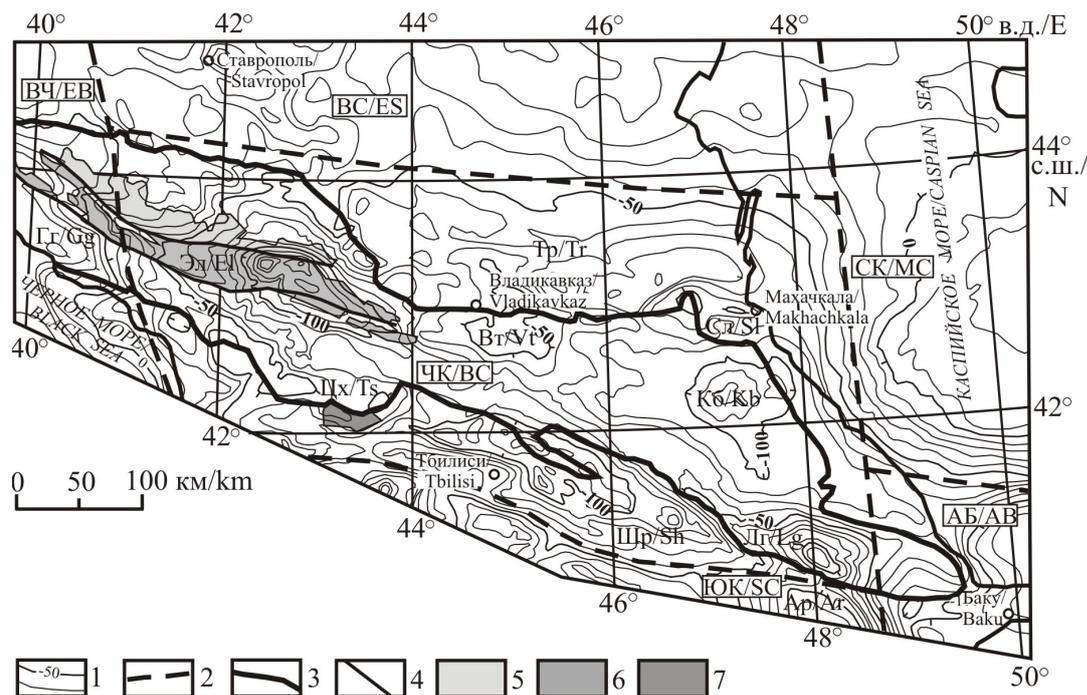


Рис. 1. Схема районирования гравитационного поля Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа с учетом [Стогний Г., Стогний В., 2017]. 1 – изоаномалы гравитационного поля по [Гравиметрическая..., 1990]; 2 – границы аномальных областей; 3 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа; 4 – разломы по [Геологическая..., 1992]; 5–7 – выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов по [Геологическая..., 1992]: 5 – зоны Передового хребта, 6 – зоны Главного хребта, 7 – Дзиркульского кристаллического массива. Аномальные области: ВЧ – Восточно-Черноморская, ВС – Восточно-Скифская, ЧК – Черноморско-Каспийская; СК – Средне-Каспийская, АБ – Апшероно-Бакинская и ЮК – Южно-Кавказская. Региональные минимумы: Эл – Эльбрусский, Кб – Кубачинский, Тр – Терский, Шр – Ширакский, максимумы: Ар – Аракский, Вр – Верхнетерский. Локальные максимумы: Гг – Гагринский, Цх – Цхинвальский, Лг – Лагинский, Сл – Сулакский /

Fig. 1. Scheme of the gravity field zoning of the Greater Caucasus Central and Eastern segments, taking into account [Stogny G., Stogny V., 2017]. 1 – isoanomalies of the gravitational field according to [Gravimetric..., 1990]; 2 – boundaries of anomalous regions; 3 – outline of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus; 4 – faults after [Geological..., 1992]; 5–7 – outcrops of Early Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic granites after [Geological..., 1992]: 5 – zones of the Fore Range, 6 – zones of the Main Range, 7 – Dzirulskiy crystalline massif. Anomalous areas: EB – Eastern-Blackseas, ES – Eastern-Scythian, BC – Blackseas-Caspian; MC – Middle-Caspian, AB – Apsheron-Bakinskiy and SC – Southern-Caucasus. Regional minima: El – Elbrusskiy, Kb – Kubachinskiy, Tr – Terskiy, Sh – Shirakskiy, maxima: Ar – Arakskiy, Vt – Verkhneterskiy. Local maxima: Gg – Gagrinskiy, Ts – Tskhinvalskiy, Lg – Laginskiy, Sl – Sulakskiy /

В структуре гравитационного поля выделены Восточно-Скифская, Восточно-Черноморская, Средне-Каспийская, Черноморско-Каспийская, Апшероно-Бакинская и Южно-Кавказская аномальные области, представляющие собой крупные, до 500 км в поперечнике, участки гравитационного поля мозаичного строения, отличающиеся уровнем поля и включающие региональные максимумы и минимумы.

Восточно-Скифская аномальная область в тектоническом отношении соответствует юго-восточной части Скифской плиты. Структура ее мелко-мозаичная, многочисленные локальные аномалии амплитудой 5–10 мГал имеют разное простирание. Восточно-Черноморская аномальная область в низкочастотной составляющей представлена крупным (300×600 км) гравитационным максимумом амплитудой до 200 мГал, в пределах изучаемой площади она частично захватывает Восточно-Чер-

номорскую впадину, Северо-Западный сегмент Большого Кавказа и Индоло-Кубанский прогиб. Юго-западная часть Северо-Каспийской аномальной области включает крупный региональный максимум Среднего Каспия, а Апшероно-Бакинская аномальная область отражает структуры Южного Каспия и Апшеронского полуострова.

Черноморско-Каспийская аномальная область, в низкочастотной составляющей представляющая собой крупный гравитационный минимум амплитудой более 100 мГал, в плане соответствует Центральному и Восточному сегментам Большого Кавказа, Терско-Каспийскому предгорному прогибу и системе Закавказских предгорных впадин. К региональным аномалиям отнесены Эльбрусский, Кубачинский, Терский и Ширакский минимумы, а также Верхнетерский максимум (рис. 1). Региональные гравитационные аномалии Большого Кавказа имеют разную морфологию, так длинные оси Эльбрусского и Ширакского гравитационных минимумов подчинены «кавказскому» направлению, а Кубачинский минимум и Верхнетерский максимум можно отнести к изометричным.

К осевой зоне Эльбрусского гравитационного минимума амплитудой более 50 мГал приурочены выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов зон Главного и Передового хребтов (рис. 1). Южная гравитационная ступень Эльбрусского минимума осложнена Кутаисским и Цхинвальским локальными максимумами Анапа-Рачинской зоны [Стогний Г., Стогний В., 2017]. Анапа-Рачинская зона объединяет локальные максимумы амплитудой до 20–25 мГал и размером по длинной оси до 60 км южного склона Северо-Западного и Центрального сегментов. В пределах Северо-Западного сегмента она включает Новороссийский, Сочинский и Гагринский максимумы, а в пределах южной части Центрального сегмента – Кутаисский и Цхинвальский максимумы, отражающие высокоплотные блоки консолидированной коры [Стогний и др., 2023].

Верхнетерский максимум амплитудой более 30 мГал и размером в поперечнике до 100 км является пограничной аномалией Эльбрусского и Кубачинского региональных минимумов.

Гравитационное поле Восточного сегмента Большого Кавказа представлено Кубачинским и Ширакским региональными минимумами, а также Сулакским локальным максимумом. Ширакский гравитационный минимум пространственно отвечает северному крылу Чиауро-Дибрарского синклиория зоны Южного склона Большого Кавказа и Ширакско-Аджиноурской зоне Закавказской системы впадин.

Западная часть Юго-Восточного сегмента проявляется интенсивным, амплитудой более 65 мГал, Лагинским локальным максимумом, локализованным в северной части крупного субдолготного Аракского регионального максимума протяженностью до 400 км.

Терский региональный гравитационный минимум, детальная характеристика которого приведена в [Керимов, Бадаев, 2021], отвечает Терско-Каспийскому предгорному прогибу.

Профиль ГСЗ Степное-Бакуриани в своей южной части на отрезке Хашури-Джава пересек структуры, контролируемые Цхинвальским локальным максимумом, соответствующим Дзирульскому блоку, далее в северном направлении Ширакский минимум и Верхнетерский максимум, а профиль ГСЗ Волгоград-Нахичевань – Ширакский и Кубачинский минимумы Восточного сегмента, соответствующие определенным блокам кристаллического фундамента.

Выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов зон Главного и Передового хребтов Центрального сегмента Большого Кавказа в плане соответствуют осевой части Эльбрусского минимума, что позволяет региональные аномалии гравитационного поля отождествлять с плотностными неоднородностями консолидированного слоя земной коры.

Блоковая делимость консолидированной коры

Интерпретация геолого-геофизических материалов с целью разработки схемы строения кристаллического фундамента Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа проведена на базе концепции блоковой (геоблок, мегаблок, блоки более высоких порядков) делимости земной коры.

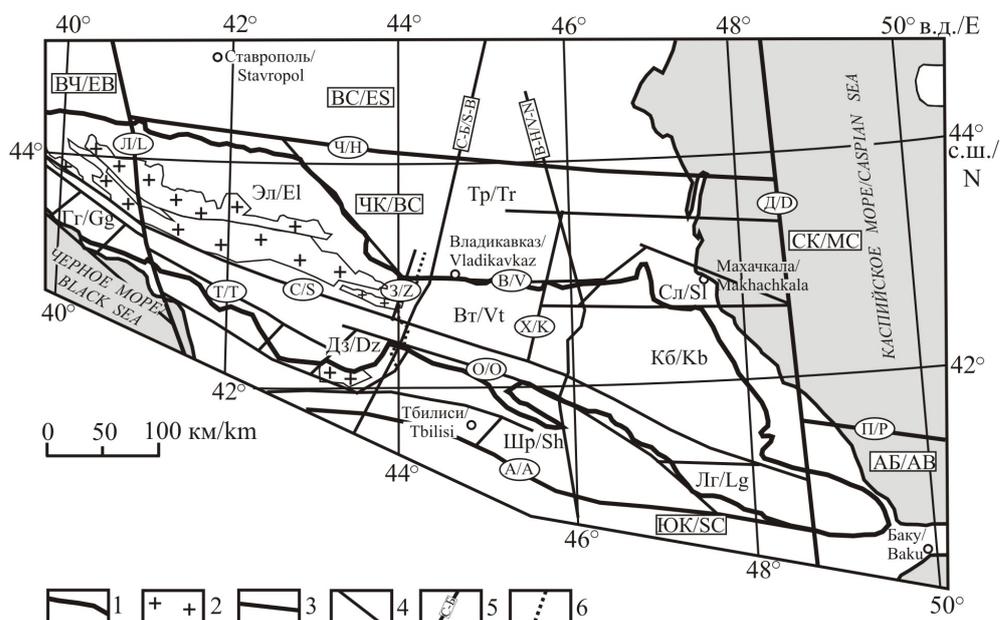


Рис. 2. Схема блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов. 1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзиркульского массива по [Геологическая..., 1992]; 3 – межгеоблоковые разломы: Ч – Черкесско-Кизлярский, А – Аджаро-Мингечаурский, Д – Дербент-Ленкоранский, Л – Лаба-Батумский; 4 – межблоковые разломы: В – Владикавказский, С – Сването-Алазанский, О – Онийский, Т – Тиварчелинский, З – Згидский, Х – Халкилоиский, П – Прибалханский; 5 – профили ГСЗ: С-Б – Степное-Бакуриани, В-Н – Волгоград-Нахичевань; 6 – профиль ММЗ [Рогожин и др., 2015]. Геоблоки: ВЧ – Восточно-Черноморский, ВС – Восточно-Скифский, ЧК – Черноморско-Каспийский; СК – Средне-Каспийский, АБ – Апшеронно-Бакинский, ЮК – Южно-Кавказский. Блоки: Эл – Эльбрусский, Кб – Кубачинский, Тр – Терский, Шр – Ширакский, Вт – Верхнетерский, Гг – Гагринский, Дз – Дзиркульский, Лг – Лагинский, Сл – Сулакский /

Fig. 2. Scheme of the consolidated crust block divisibility of the Greater Caucasus Central and Eastern segments based on the results of the geological and geophysical data interpretation. 1 – contour of the megaanticlinorium of the Greater Caucasus; 2 – outcrops of Early Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central Segment and the Dzirulskiy massif after [Geological..., 1992]; 3 – intergeoblock faults: H – Cherkessko-Kizlyarskiy, A – Adzhar-Mingachevirskiy, D – Derbent-Lenkoranskiy, L – Laba-Batumskiy; 4 – interblock faults: V – Vladikavkazskiy, S – Svaneto-Alazanskiy, O – Oniyskiy, T – Tivarchelinskiy, Z – Zgitskiy, K – Khalkiloyskiy, P – Pribalkhanskiy; 5 – DSS profiles: S-B – Stepnoe-Bakuriani, V-N – Volgograd-Nakhichevan; 6 – MMS profile according to [Rogozhin et al., 2015]. Geoblocks: EB – Eastern-Blackseas, ES – Eastern-Scythian, BC – Blackseas-Caspian; MC – Middle-Caspian, AB – Apsheron-Bakinskiy, SC – Southern-Caucasus. Blocks: El – Elbruskiy, Kb – Kubachinskiy, Tr – Terskiy, Sh – Shirakskiy, Vt – Verkhneterskiy, Gg – Gagrinskiy, Dz – Dzirulskiy, Lg – Laginskiy, Sl – Sulakskiy

Кристаллический фундамент рассматриваемой территории с учетом районирования гравитационного поля представлен Восточно-Черноморским, Восточно-Скифским, Черноморско-Каспийским, Средне-Каспийским и Апшероно-Бакинским геоблоками, выделенными в контурах гравитационных аномальных областей (рис. 2). Черноморско-Каспийский геоблок, ограниченный Черкесско-Кизлярским, Аджаро-Мингечаурским, Дербент-Ленкоранским и Лаба-Батумским разломами, отнесен к кристаллическому фундаменту Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа, Терско-Каспийского прогиба, а также Закавказской системы впадин и срединных массивов.

Черноморско-Каспийский геоблок продольным Сването-Алазанским разломом разделен на Тырнауз-Кубачинский и Джава-Ширакский мегаблоки. Сването-Алазанский разлом в материалах профиля ММЗ [Рогожин и др., 2015] проявляется как зона перехода на глубинах 10–55 км высокоскоростного разреза в низкоскоростной, а в разрезе профиля ГСЗ Степное-Бакуриани его можно сопоставить с разломом северного падения, ограничивающим высокоскоростной (7,0–7,3 км/с) блок в южной части профиля.

Тырнауз-Кубачинский мегаблок включает Эльбрусский, Верхнетерский, Кубачинский, Сулакский и Терский блоки первого порядка, выделенные в контурах одноименных гравитационных аномалий (рис. 2). Кристаллический фундамент Тырнауз-Кубачинского мегаблока характеризуют выходы раннедокембрийских метаморфических и палеозойских магматических пород зон Передового и Главного хребтов Эльбрусского блока.

Верхнетерский блок сопоставляется с областью раздела Центрального и Восточного сегментов мегаантиклинория Большого Кавказа. С запада и востока блок ограничен Згидским и Халкилойским разломами, северным ограничением Верхнетерского блока является Владикавказский разлом, выраженный в осадочном чехле зоной состоящей из трех ветвей [Рогожин, Милуков, 2016].

Кубачинский блок, перекрытый отложениями юры, с востока ограничен межгеоблоковым Дербент-Ленкоранским разломом. По профилю Волгоград-Нахичевань, пересекающему Кубачинский блок, граница Мохоровичича имеет форму прогиба глубиной до 60 км [Павленкова, 2012]. Предполагается, что после киммерийской складчатости произошло метаморфическое уплотнение низов коры Восточного сегмента, компенсировавшее ее деформационное утолщение [Трифонов и др., 2020].

Джава-Ширакский мегаблок отнесен к кристаллическому фундаменту зоны Южного склона Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа и Закавказской системы впадин и срединных массивов. Выходы раннедокембрийских метаморфических пород зоны Южного склона Центрального сегмента закартированы в Дзирульском массиве Грузинской глыбы [Геологическая..., 1992]. Дзирульский массив в структуре гравитационного поля отражается Цхинвальским локальным максимумом, интерпретируемым как высокоплотный блок, выведенный в верхнюю часть земной коры в процессе коллизии [Стогний Г., Стогний В., 2017]. Ширакский блок кристаллического фундамента перекрыт флишем Чиауро-Дибрарского синклинория и отложениями Алазанской межгорной впадины.

Таким образом, по результатам анализа геолого-геофизических материалов консолидированная кора Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа принадлежит к Черноморско-Каспийскому геоблоку, разделенному продольным Сването-Алазанским разломом на Тырнауз-Кубачинский и Джава-Ширакский мегаблоки.

Результаты работы и их обсуждение

Положение южной границы Скифской плиты под осадочным чехлом Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа обсуждается в рамках предложенной схемы блоковой делимости консолидированной коры изучаемого региона (рис. 2). Показано, что Сването-Алазанский разлом в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа сохраняет свое простирание и является разделом блоков разного порядка и ориентировки. Раздробленность консолидированной коры при становлении складчато-надвигового сооружения Большого Кавказа практически не затронула Сването-Алазанский разлом, что позволяет его отнести к межплитному, разграничивающему Скифскую плиту и Западнокавказскую микроплиту. При этом Тырныауз-Кубачинский мегаблок характеризует консолидированную кору южного фланга Скифской плиты, а Джава-Ширакский мегаблок – северного фланга Закавказской микроплиты.

Выделенные Тырныауз-Кубачинский и Джава-Ширакский мегаблоки консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов практически соответствуют охарактеризованным в [Сомин, 2007] Северо-Кавказскому и Сванетскому тектоническим доменам доюрского основания Большого Кавказа.

Продолжением Сването-Алазанского разлома в Северо-Западном сегменте Большого Кавказа является Западнокавказский разлом, разграничивающий Скифскую плиту и Восточно-Черноморскую микроплиту [Стогний Г., Стогний В., 2019]. В предлагаемой схеме блокового строения консолидированной коры Большого Кавказа Сването-Алазанский и Западнокавказский разломы рассматриваются как фрагменты Большекавказского межплитного разлома (рис. 3).

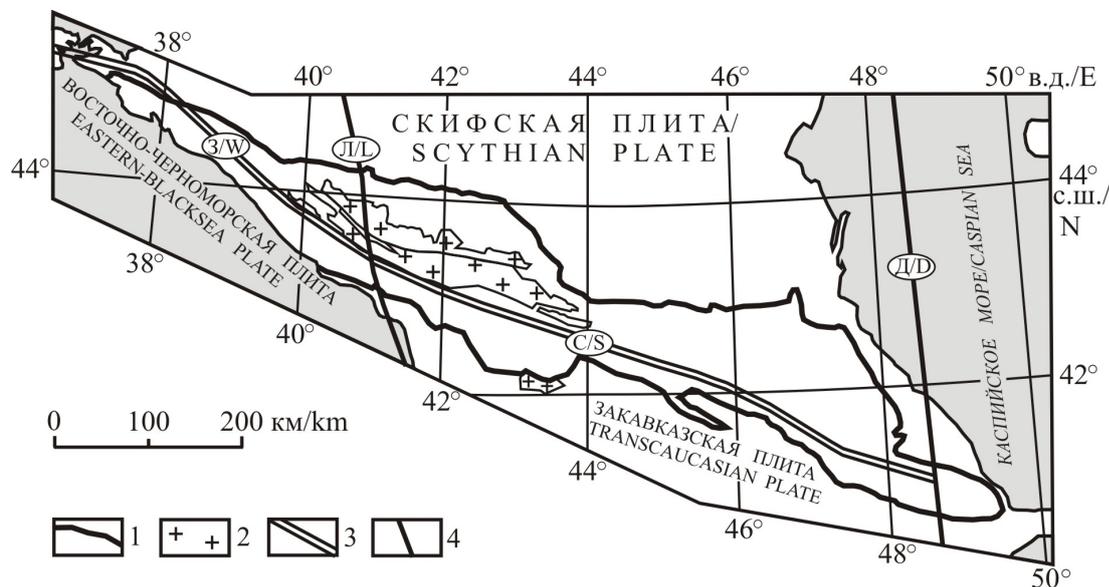


Рис. 3. Южная граница консолидированной коры Скифской плиты под осадочными отложениями Большого Кавказа с учетом работы [Стогний Г., Стогний В., 2019]. 1 – контур мегаантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы раннедокембрийских метаморфических пород и палеозойских гранитов зон Главного и Передового хребтов Центрального сегмента и Дзирульского массива по [Геологическая..., 1992]; 3 – Большекавказский межплитный разлом и его фрагменты: 3 – Западнокавказский, С – Сването-Алазанский; 4 – межгеоблоковые разломы: Л – Лаба-Батумский, Д – Дербент-Ленкоранский /

Fig. 3. The southern boundary of the consolidated crust Scythian Plate under the sedimentary deposits of the Greater Caucasus, taking into account [Stogny G., Stogny V., 2019]. 1 – contour of the

megaanticlinorium of the Greater Caucasus; 2 – outcrops of Early Precambrian metamorphic rocks and Paleozoic granites of the zones of the Main and Frond Ranges of the Central Segment and the Dzirulskiy massif after [Geological..., 1992]; 3 – Greatercaucasian interplate fault and its fragments: W – Westerncaucasian, S – Svaneto-Alazanskiy; 4 – intergeoblock faults: L – Laba-Batumskiy, D – Derbent-Lenkoranskiy

Наиболее отчетливо южная граница Скифской плиты проявлена в материалах профиля ММЗ [Рогожин и др., 2015] как зона перехода на глубине 10–55 км высокоскоростного разреза Закавказской микроплиты в низкоскоростной разрез Верхнетерского блока Тырныауз-Кубачинского мегаблока. А.В. Горбатиков с соавторами [2015] формирование данной низкоскоростной области связывают с наличием многочисленных трещин и насыщенностью консолидированной коры флюидами. Обычно такие зоны проявляются также значительным уменьшением удельных электрических сопротивлений. Согласно [Азаров и др., 2005], удельная электрическая проводимость уменьшается от палеозоя до архея, также наблюдается уменьшение значений удельного сопротивления для областей последующей переработки архейской коры. Низкоскоростной разрез Верхнетерского блока отражает по нашему мнению консолидированную кору южного края Скифской плиты, переработанную в мезозойский тектонический этап при заложении прогиба Большого Кавказа.

По профилю ГСЗ Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012] мощность земной коры в южной части Верхнетерского блока резко уменьшается в северном направлении с 50 до 35–40 км, что соответствует мощности земной коры Скифской плиты.

Поперечная сегментация Большого Кавказа на уровне консолидированной коры сохраняется лишь для Скифской плиты. Консолидированная кора Восточно-Черноморской и Закавказской микроплит тектонически более раздроблена, она содержит расположенные к югу от Большекавказского межплитного разлома Анапский, Сочинский, Гагринский, Кутаисский и Дзирульский сейсмогенерирующие высокоплотные блоки. Севернее межплитного разлома отдельные тектонические блоки по данным GPS-наблюдений имеют более автономное движение, превалирующие направления и скорость движения которых определяются формируемыми местными полями тектонических напряжений на уровне кристаллической коры [Стогний и др., 2022, 2023].

Ненарушенная линейная форма Большекавказского разлома консолидированной коры подчеркивается тектоническими нарушениями, закартированными геологическими методами, так, в пределах Центрального сегмента межплитный разлом проявляется Главным Кавказским разломом, а в Восточном сегменте – разломами его южной части.

Особая роль при обосновании геодинамических моделей Большого Кавказа отводится Главному Кавказскому разлому (надвику), ограничивающему с юга выходы раннедокембрийских метаморфических пород Центрального сегмента. Главный Кавказский разлом в плане совпадает с длинной осью Эльбрусского гравитационного минимума и в нашей интерпретации это разлом с крутым, практически вертикальным, наклоном сместителя. В системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа Сването-Алазанский фрагмент Большекавказского межплитного разлома отвечает условиям модели содвига [Расцветаев, 2002] либо жесткой коллизии Скифской плиты и Закавказской микроплиты.

Большая часть мезозой-кайнозойского осадочного комплекса Центрального и Восточного сегментов расположена на южном фланге Скифской плиты. При этом

различие в геодинамических обстановках формирования Центрального и Восточного сегментов предопределили Згидский и Халкилойский поперечные разломы консолидированной коры, ограничивающие Верхнетерский блок, являющийся переходной зоной между данными сегментами.

Выводы

Показано, что консолидированная кора Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа принадлежит к Черноморско-Каспийскому геоблоку, разделенному продольным Сването-Алазанским разломом на Тырнауз-Кубачинский и Джава-Ширакский мегаблоки, характеризующие соответственно южный фланг Скифской плиты и северный фланг Закавказской микроплиты. Консолидированная кора Закавказской микроплиты тектонически более раздроблена, она содержит сейсмически активные высокоплотные блоки.

Большая часть мезозой-кайнозойского осадочного комплекса Большого Кавказа расположена на южном фланге Скифской плиты, а различие в условиях формирования осадочного чехла Центрального и Восточного сегментов предопределили поперечные Згидский и Халкилойский разломы консолидированной коры.

На уровне консолидированной коры южная граница Скифской плиты в пределах Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа выражена Сването-Алазанским фрагментом Большекавказского межплитного разлома, разграничивающего Скифскую плиту от Восточно-Черноморской и Закавказской микроплит.

Литература

1. Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Шермет Е.М. Геолого-геоэлектрическая модель Орехово-Павлоградской шовной зоны Украинского щита. – Киев, 2005. – 190 с.
2. Горбатилов А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзедобоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных. // Физика Земли. – 2015. – №1. – С. 28–39. DOI: DOI: 10.7868/S000233371501007X
3. Геологическая карта России и сопредельных государств (в границах бывшего СССР). М-6 1:5 000 000. / Под ред. Р.И. Соколова – СПб: ВСЕГЕИ, 1992. – 2 листа.
4. Гравиметрическая карта СССР. Масштаб 1:2 500 000. / Гл. редакторы П.П. Степанов, М.А. Якушевич. – М.: ВНИИ «Геофизика», 1990.
5. Дотдугев С.И. О покровном строении Большого Кавказа. // Геотектоника. – 1986. – №5. – С. 94–106.
6. Казьмин В.Г., Лобковский Л.И., Пустовитенко Б.Г. Современная кинематика микроплит в Черноморско-Южно-Каспийском регионе. // Океанология. – 2004. – Т. 44. №4. – С. 600–610.
7. Камзолкин В.А., Латышев А.В., Видяпин Ю.П., Сомин М.Л., Смутьская А.И., Иванов С.Д. Поздневенские комплексы в структуре метаморфического основания Передового хребта Большого Кавказа. // Геотектоника. – 2018. – №3. – С. 42–57. DOI: DOI: 10.7868/S0016853X18030037
8. Керимов И.А., Бадаев С.В. Анализ сейсмической опасности территории Чечни и Ингушетии. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XI. – М.: ИИЕТ РАН. – 2021. – С. 238–245.
9. Копп М.Л. Коллизионная структура Кавказского региона. // Большой Кавказ в альпийскую эпоху. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 339–342.

10. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное-Бакуриани и Волгоград-Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных). // *Физика Земли*. – 2012. – №5. – С. 16–23.
11. Патица И.С., Леонов Ю.Г., Волож Ю.А., Копп М.Л., Антипов М.П. Крымско-Копетдагская зона концентрированных орогенических деформаций как трансрегиональный позднеколлизийный правый сдвиг. // *Геотектоника*. – 2017. – №4. – С. 17–30. DOI: 10.7868/S0016853X17040063
12. Расцветаев Л.М. Актуальные проблемы структурной геологии и тектонофизики. // *Тектонофизика сегодня*. / Ред. Л.М. Расцветаев. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – С. 333–373.
13. Расцветаев Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Позднеальпийские дизъюнктивные системы и геодинамика Западного Кавказа. // *Физика Земли*. – 2010. – №5. – С. 31–40.
14. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегаантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // *Геотектоника*. – 2015. – №2. – С. 36–49. DOI: 10.7868/S0016853X15020058
15. Рогожин Е.А., Милюков В.К. Спутниковый геофизический мониторинг и сейсмические проявления зоны Владикавказского активного разлома. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2016. – №4. – С. 102–110. DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20904
16. Сомин М.Л. Главные черты строения доальпийского основания Большого Кавказа. // *Большой Кавказ в альпийскую эпоху*. – М.: ГЕОС, 2007. – С.15–38.
17. Стогний Г.А., Стогний В.В. Сейсмичность Большого Кавказа с позиции блоковой делимости земной коры. // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС)*. – 2017. – №2. – С. 86–95.
18. Стогний Г.А., Стогний В.В. Сеймотектоническая модель Северо-Западного Кавказа: геолого-геофизический аспект. // *Физика Земли*. – 2019. – №4. – С. 124–132. DOI: 10.31857/S0002-333720194124-132
19. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003
20. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сеймотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. №1. – С. 76–95. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006
21. Трифионов В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Хессами Х. Мезозойско-кайнозойская структура Черноморско-Кавказско-Каспийского региона и ее соотношение со строением верхней мантии. // *Геотектоника*. – 2020. – №3. – С. 55–81. DOI: 10.31857/S0016853X20030108
22. Хаин В.Е. Большой Кавказ // *Тектоника южного обрамления Восточно-Европейской платформы*. / Под ред. В.Е. Хаина, В.И. Попкова. – Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2009. – С. 150–161.
23. Adamia S.A., Chkhotia T.G., Gavtadze T.T., Lebanidze Z.A., Lursmanashvili N.D., Sadradze N.G., Zakaraia D.P., Zakariadze G.S. Tectonic setting of Georgia – Eastern Black Sea: a review. / *Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Ed. by M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia. // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* – 2017. – Vol. 428. – pp. 11–40.
24. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Gebran Karam. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051
25. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // *J. of Asian Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.

26. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. // *Tectonophysics*. – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.

27. Vinsent S.J., Somin M.L., Carter A., Vezzolini G., Fox M., Vautravers B. Testing models of Cenozoic Exhumation in the Western Greater Caucasus. // *Tectonics*. – 2020. – Vol. 39. Is. 2. e2018TC005451. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018TC005451>

References

1. Azarov N.Ya., Antsiferov A.V., Sheremet E.M. Geological and geoelectrical model of the Orekhovo-Pavlograd suture zone of the Ukrainian shield. Kyiv, 2005. 190 p. (In Russ.)

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

3. Geological map of Russia and neighboring states (within the borders of the former USSR). Scale 1:5 000 000. Ed. R.I. Sokolova. St. Petersburg. VSEGII, 1992. 2 sheets. (In Russ.)

4. Gravimetric map of the USSR. Scale 1: 2,500,000. Ch. editors: P.P. Stepanov, M.A. Yakushevich. Moscow. VNII “Geophysics”, 1990. (In Russ.)

5. Dotduev S.I. On the cover structure of the Greater Caucasus. *Geotectonics*, 1986. No. 5. pp. 94–106. (In Russ.)

6. Kazmin V.G., Lobkovsky L.I., Pustovitenko B.G. Modern kinematics of microplates in the Black Sea-South Caspian region. *Oceanology*. 2004. Vol. 44. No. 4. pp. 600–610. (In Russ.)

7. Kamzolkin V.A., Latyshev A.V., Vidyapin Y.P., Somin M.L., Smul'skaya A.I., Ivanov S.D. Late vendian complexes in the structure of metamorphic basement of the Fore range zone, Greater Caucasus. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No. 3. pp. 331–345. DOI: [10.1134/S0016852118030020](https://doi.org/10.1134/S0016852118030020)

8. Kerimov I.A., Badaev S.V. Seismic hazard analysis of the Chechnya and Ingushetia territory. *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Volume XI. Moscow: IIET RAS, 2021. pp. 238–245. (In Russ.)

9. Kopp M.L. Collision structure of the Caucasian region. *Greater Caucasus in the Alpine era*. Moscow. GEOS, 2007. pp. 339–342. (In Russ.)

10. Pavlenkova G.A. Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe–Bakuriani and Volgograd–Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2012. Vol. 48. No. 5, pp. 375–384. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351312040040>

11. Patina I.S., Leonov Y.G., Volozh Y.A., Kopp M.L., Antipov M.P. Crimea-Kopet Dagh zone of concentrated orogenic deformations as a transregional late collisional right-lateral strike-slip fault. *Geotectonics*. 2017. Vol. 51. No. 4, pp. 353–365. DOI: [10.1134/S0016852117040069](https://doi.org/10.1134/S0016852117040069)

12. Rastsvetaev L.M. Actual problems of structural geology and tectonophysics. *Tectonophysics today*. Ed. L.M. Rastsvetaev. Moscow: OIFZ RAN, 2002. pp. 333–373. (In Russ.)

13. Rastsvetaev L.M., Tveritina T.Y., Marinin A.V. Late-Alpine fault systems and geodynamics of the West Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. Vol. 46. No. 5, pp. 394–403. DOI: [10.1134/S1069351310050046](https://doi.org/10.1134/S1069351310050046)

14. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Y., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. The structural framework and recent geodynamics of the Greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on its deep structure. *Geotectonics*. 2015. Vol. 49. No. 2, pp. 123–134. DOI: [10.1134/S0016852115020053](https://doi.org/10.1134/S0016852115020053)

15. Rogozhin E.A., Milyukov V.K. Satellite geodetic monitoring and seismic manifestations of the Vladicavkaz active breaking zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 4, pp. 102–110. (In Russ.)

16. Somin M.L. The main features of the structure of the pre-Alpine foundation of the Greater Caucasus. *The Greater Caucasus in the Alpine era*. Moscow. GEOS, 2007. pp. 15–38. (In Russ.)
17. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12(2), pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003 (In Russ.)
18. 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(1). pp. 76–95. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006. (In Russ.)
19. Stogny G.A., Stogny V.V. Seismicity of the Greater Caucasus from the standpoint of the block divisibility of the Earth's crust. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation (BSEC)*. 2017. No. 2. pp. 86–95. (In Russ.)
20. Stogny G.A., Stogny V.V. Seismotectonic model of the Northwestern Caucasus: geological and geophysical aspect. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. Vol. 53. No. 4, pp. 124–132. DOI: 10.1134/S1069351319040116
21. Trifonov V.G., Sokolov S.Y., Sokolov S.A., Hessami K. Mesozoic-Cenozoic structure of the Black Sea–Caucasus–Caspian region and its relationships with the upper mantle structure. *Geotectonics*. 2020. Vol. 54. No. 3, pp. 331–355. DOI: 10.1134/S0016852120030103
22. Khain V.E. Greater Caucasus. *Tectonics of the southern framing of the East European Platform*. Ed.: V.E. Khaina, V.I. Popkov. Krasnodar. KubSU, 2009, pp. 150–161. (In Russ.)
23. Adamia S.A., Chkhotia T.G., Gvartadze T.T., Lebanidze Z.A., Lursmanashvili N.D., Sadradze N.G., Zakariaia D.P., Zakariadze G.S. Tectonic setting of Georgia – Eastern Black Sea: a review, In *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*, Ed. by M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2017. Vol. 428. pp. 11–40.
24. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Gebran Karam. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
25. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *J. of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188, pp. 1–18.
26. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. pp. 362–374.
27. Vinsent S.J., Somin M.L., Carter A., Vezzolini G., Fox M., Vautravers B. Testing models of Cenozoic Exhumation in the Western Greater Caucasus. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. Is. 2, e2018TC005451. DOI: 10.1029/2018TC005451.

УДК 550.348.4

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002

Оригинальная статья

Сейсмологические индикаторы геодинамических обстановок формирования землетрясений на территории Турции в 2023 году

Ю.М. Вольфман , Е.Я. Колесникова

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

Статья поступила: 16.06.2023, доработана: 04.09.2023, принята к публикации: 11.09.23.2023

Резюме: Актуальность работы. Колоссальный масштаб бедствий, причиненных катастрофическими землетрясениями в Турции и Сирии 6 февраля 2023 года, и высокая сейсмическая активность в течение длительного времени вызвали обоснованные опасения у населения соседних регионов. Они касались возможности смещения области высокой сейсмичности на соседние территории и возникновения катастрофических землетрясений в их пределах. Эти факторы обусловили актуальность исследования данного сейсмического процесса, его основных толчков и многочисленных афтершоков. **Цель исследований.** Анализ пространственно-временного распределения сейсмичности, исследование изменений напряженно-деформированного состояния земной коры региона в период его высокой сейсмической активности, а также идентификация геодинамических обстановок сейсмогенеза. **Методы исследования.** Основу метода составил алгоритм пространственно-временного и кинематического анализа данных о фокальных механизмах землетрясений. **Результаты работы.** Количественное соотношение разных типов землетрясений, для которых получены фокальные механизмы (всего 130 очагов), показало, что большинство из них (47%, в том числе, катастрофические толчки 6 февраля) являются сдвиговыми. Их формирование равновероятно как в обстановках сжатия, так и при растяжении земной коры. В меньшей степени (38% очагов) проявились обстановки растяжения. И только 15% фокальных механизмов отвечают обстановкам сжатия земной коры региона. Установлены закономерности (сегментарный характер) в распределении ориентировок осей сжатия и растяжения сейсмогенерирующих полей напряжений. Показано, что в совокупности очагов, для которых идентифицированы кинематические обстановки их формирования (растяжение или сжатие земной коры), доминируют те, которые отражают влияние растягивающих напряжений на процессы сейсмогенеза. При этом ориентировки осей растяжения образуют контрастный максимум в направлении $295-310^{\circ}$. В тоже время оси сжатия образуют слабоконтрастные максимумы по многим направлениям. Это указывает на относительно стабильный характер обстановок растяжения земной коры и на высокую вариативность полей напряжений, предопределивших обстановки сжатия на исследуемой территории. В результате по комплексу признаков установлено, что в регионе доминировали обстановки растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях, обусловленные дивергентным характером взаимодействия Анатолийской субплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома.

Ключевые слова: землетрясения, фокальные механизмы, растяжение (сжатие) земной коры, кинематические обстановки, процессы дивергенции.

Для цитирования: Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я.. Сейсмологические индикаторы геодинамических обстановок формирования землетрясений на территории Турции в 2023 году. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 19-32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002.

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002

Original paper

Seismological indicators of geodynamic conditions of earthquakes formation in Turkey in 2023

Yu.M. Volfman , E.Ya. Kolesnikova

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

Received: 16.06.2023, revised: 04.09.2023, accepted: 11.09.2023

Abstract: Relevance. The colossal scale of the disasters caused by the catastrophic earthquakes in Turkey and Syria on February 6, 2023, and the high seismic activity for a long time caused reasonable concerns among the population of neighboring regions. They concerned the possibility of shifting the area of high seismicity to neighboring territories and the occurrence of catastrophic earthquakes within them. These factors determined the relevance of the study of this seismic process, its main aftershocks and numerous aftershocks. **Aim.** Analysis of the spatial-temporal distribution of seismicity, study of changes in the stress-strain state of the Earth's crust of the region during its high seismic activity, as well as identification of geodynamic conditions of seismogenesis. **Methods.** The method is based on the algorithm of spatial-temporal and kinematic analysis of data on focal mechanisms of earthquakes. **Results.** The quantitative ratio of different types of earthquakes for which focal mechanisms were obtained (130 foci in total) showed that most of them (47%, including the catastrophic tremors of February 6) are shear. Their formation is equally likely both in conditions of compression and during stretching of the Earth's crust. To a lesser extent (38% of foci), stretching conditions were manifested. And only 15% of the focal mechanisms correspond to the conditions of compression of the earth's crust of the region. Regularities (segmental character) in the distribution of orientations of compression and stretching axes of seismogenerating stress fields are established. It is shown that in the totality of foci for which the kinematic conditions of their formation (stretching or compression of the Earth's crust) are identified, those that reflect the influence of tensile stresses on the processes of seismogenesis dominate. In this case, the orientations of the stretching axes form a contrasting maximum in the direction of 295-310°. At the same time, the compression axes form low-contrast maxima in many directions. This indicates the relatively stable nature of the conditions of stretching of the Earth's crust and the high variability of the stress fields that predetermined the compression conditions in the study area. As a result, according to a set of features, it was found that the conditions of stretching of the Earth's crust in the latitudinal and south-easterly directions dominated in the region, due to the divergent nature of the interaction of the Anatolian subplate with the rest of Arabia along the zone of the East-Anatolian fault.

Keywords: earthquakes, focal mechanisms, stretching (compression) of the Earth's crust, kinematic situations, divergence processes.

For citation: Volfman Yu. M., Kolesnikova E. Ya. Seismological indicators of geodynamic conditions of earthquakes formation in Turkey in 2023. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(3): 19-32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002.

Введение

Начало 2023 г. ознаменовалось катастрофическими землетрясениями в пределах Турции и пограничных с ней районов Сирии. В течение 6 февраля здесь произошло два землетрясения с магнитудами $M=7.75$ и $M=7.55$, приведших к многочисленным человеческим жертвам и колоссальным разрушениям. Очаг первого, наиболее раз-

рушительного из этих них, с координатами $\varphi=37.23^\circ$, $\lambda=37.019^\circ$, располагался на относительно небольшой глубине ($h=17.5$ км) в пределах густонаселенного региона, что многократно усилило катастрофический эффект его воздействий. Через 9 часов произошло второе сильное землетрясение ($\varphi=38.008^\circ$, $\lambda=37.211^\circ$, $M=7.55$, $h=13.5$ км), которое привело к новым жертвам, «довершило» разрушение инфраструктуры региона и усложнило проведение спасательных работ.

Исходные данные и методы исследования

Исходными данными исследований послужили выборки из сейсмических каталогов, размещенных на сайтах Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (<http://www.emsc-csem.org>) и Global CMT Web Page (<https://www.globalcmt.org>). По первому из них отслеживались все события в регионе с $M \geq 2$: так, с 6 февраля до 31 марта, когда сейсмическая активность исследуемого региона сохранялась на весьма высоком уровне, здесь было зарегистрировано 6535 землетрясений. Данные из второго каталога составили выборку землетрясений с $M \geq 4$ и выше, для которых получены фокальные механизмы землетрясений. За период с февраля по май идентифицировано 130 таких событий. Параметры наиболее значимых из них (с магнитудами $M \approx 5$ и выше), на которые в работе есть прямые указания, приведены в таблице.

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры наиболее сильных землетрясений, произошедших на территории Турции и Сирии в феврале-мае 2023 года /
The main parameters of the strongest earthquakes that occurred on the territory of Turkey and Syria in February-May 2023

№ п/п	Дата / Data	Координаты очага / Source coordinates		h , км	M	Параметры осей главных напряжений (азимут/угол) / Parameterers of the axes (azimuth / angle)			Кин. обст. / Kin. sit/
		$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ E$			P	N	T	
1	06.02.2023	37,23	37,019	17.5	7,75	183/01	15/88	273/0	СДВ
2	06.02.2023	38,008	37,211	13.5	7,55	232/06	351/77	141/11	СДВ
3	06.02.2023	38,19	38,176	8.0	5,38	16/06	146/80	285/07	СДВ
4	06.02.2023	38,001	36,508	9.0	4,97	208/44	40/46	304/06	Рст
5	06.02.2023	37,978	36,446	11.5	5,23	161/76	12/12	281/07	Рст
6	06.02.2023	37,259	37,102	11.5	5,30	326/72	177/16	85/09	Рст
7	07.02.2023	37,764	37,731	19.5	5,48	159/13	268/54	61/32	СЖТ
8	07.02.2023	38,097	38,64	11.5	5,36	187/12	83/48	287/40	СЖТ
9	07.02.2023	37,994	36,477	9.5	4,96	275/74	30/07	122/14	Рст
10	07.02.2023	37,969	36,604	19.5	5,31	57/61	175/15	272/24	Рст
11	08.02.2023	38,006	36,496	21.5	5,02	218/48	29/41	123/05	Рст
12	08.02.2023	37,937	37,661	10.0	5,36	70/12	210/75	338/09	СДВ
13	12.02.2023	38,824	38,031	13.5	4,99	181/15	57/64	276/20	СДВ

14	16.02.2023	36,177	35,797	13.5	5,17	293/67	189/06	97/22	Рст
15	20.02.2023	36,159	36,034	11.5	6,34	195/43	356/45	96/10	Рст
16	23.02.2023	36,059	36,095	11.5	4,94	38/60	193/27	289/11	Рст
17	27.02.2023	38,217	38,256	11.5	5,24	217/16	104/54	317/31	Сжт
18	03.03.2023	37,84	36,7	11.5	4,99	352/60	218/21	120/19	Рст
19	21.05.2023	37,923	36,253	8,0	4,91	210/60	44/29	311/06	Рст

Примечания. Кинематические обстановки формирования очага (столбец Кин. обст.): Рст – растяжения, Сжт – сжатия, Сдв – равновероятные как в обстановках сжатия, так и в условиях растяжения (сдвиговые).

Идентификация кинематических обстановок в очагах выполнена в соответствии с классификацией деформационных режимов [Гущенко и др., 1991; Гинтов, 2005], в основу которой заложены соотношения углов наклона осей главных напряжений. Так, обстановкам растяжения геологической среды отвечают сбросовый, сдвиго-сбросовый и сбросо-сдвиговый деформационные режимы; обстановкам сжатия – взбросовый, сдвиго-взбросовый и взбросо-сдвиговый режимы [Ребецкий и др., 2017]. Формирование сдвиговых очагов равновероятно как в обстановках сжатия, так и в условиях растяжения.

Результаты работы и их обсуждение

Общая характеристика активной фазы сейсмического процесса. Главной причиной высокой сейсмичности на территории Турции является тектоническое взаимодействие Евразийской и Аравийской литосферных плит и их микроплит [Журавлев, Лукк, 2011; Ружич и др., 2023; Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980; Alptekin et al., 1986; Elliott et al., 2013; Golonka, 2004; Jackson et al., 1995; Nikishin et al., 2011; Okay, Nikishin, 2015 и др.], которое, по мнению исследователей, имеет коллизионную природу. За исключением высокосейсмичной области на западе Турции (на побережье Эгейского моря), основные сейсмогенерирующие зоны региона приурочены к крупным линейно-вытянутым геоструктурам, по которым либо происходит сочленение Евразийской и Аравийской плит (системы разломов Северо-Анатолийская и Загрос), либо проходит граница Анатолийской микроплиты с основной частью Аравии – вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома (рис. 1).

Следует отметить особенности сейсмического процесса, начавшегося землетрясениями 6 февраля: 1) катастрофические события не предварялись сколько-нибудь значительными форшоками в пределах территории; 2) очаги основных землетрясений и многочисленных афтершоков, локализованы, главным образом, вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома северо-восточного простирания и в непосредственной близости от него, образуя ответвление в широтном направлении; 3) расположенная неподалеку зона Северо-Анатолийского разлома все это время оставалась незадействованной в сейсмическом процессе, «откликнувшись» лишь несколькими событиями с $M=2-4$, вопреки тому, что Северо-Анатолийский разлом, трассирующий зону палеосубдукции, возникшую в результате сближения Евразии, Аравии и Африки [Stampfli, 2000; Wortel et al., 2000; Nikishin et al., 2011; Okay, Nikishin, 2015 и др.], обычно весьма активен в сейсмическом отношении.

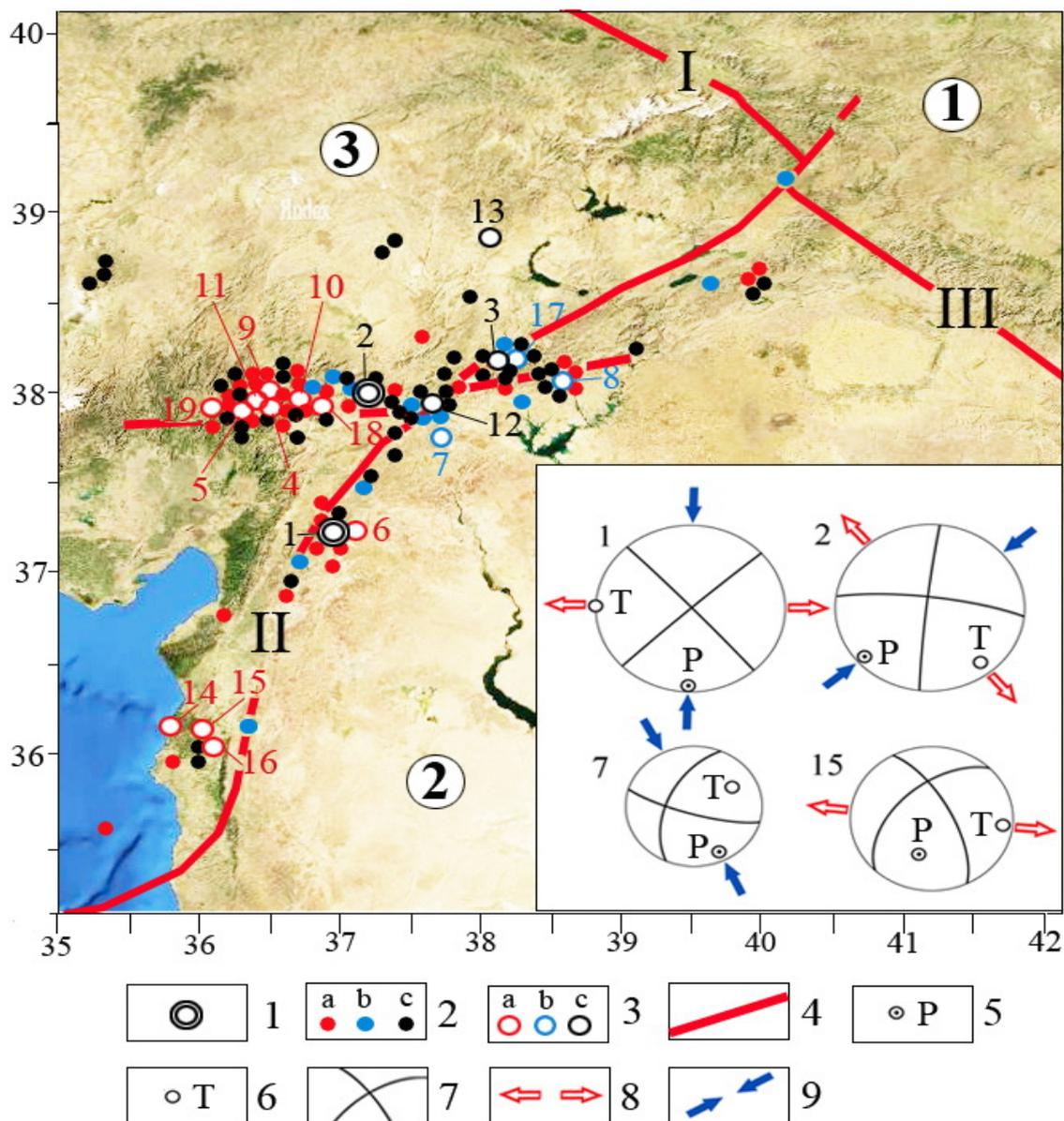


Рис. 1. Схема очагов землетрясений, для которых получены фокальные механизмы. Условные обозначения. На схеме: 1 – эпицентры катастрофических землетрясений с $M > 7$; 2-3 – очаги с $M < 4,9$ (2) и с $M > 4,9$ (3), для которых получены фокальные механизмы, сформировавшиеся в обстановках растяжения (a), сжатия (b), и сдвиговые очаги, равновероятные в условиях и растяжения, и сжатия земной коры (c); 4 – основные сейсмогенерирующие зоны региона (I, II – зоны Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов соответственно, III – система Загрос). На врезке – фокальные механизмы наиболее сильных землетрясений разных типов и их номера в таблице: 5 – оси сжатия; 6 – оси растяжения; 7 – проекции нодальных плоскостей; 8-9 – направления растяжения (8) или сжатия (9) в очаге. Цифры в кружках – Евразийская (1) и Аравийская (2) плиты; Анатолийская микроплита (3) /

Fig. 1. The scheme of localization of earthquake foci for which focal mechanisms are obtained.. Symbols. In the diagram: 1 – epicenters of catastrophic earthquakes with $M > 7$; 2-3 – focal mechanisms with $M < 4.9$ (2) and with $M > 4.9$ (3), for which focal mechanisms formed in conditions of stretching (a), compression (b), and shear foci, equally probable in conditions of stretching and, and compression of the earth's crust (c); 4 – the main seismogenerating zones of the region (I, II – zones of the North Anatolian and East Anatolian faults, respectively, III – the Zagros system). The inset shows the focal mechanisms of the strongest earthquakes of different types and their numbers in the table: 5 – compression axes; 6 – stretching axes; 7 – projections of nodal planes; 8-9 – directions of stretching (8) or compression (9) in the focus. The numbers in the circles are Eurasian (1) and Arabian (2) plates; Anatolian microplate (3) /

Общий характер сейсмического процесса иллюстрирует хронограмма (рис. 2), отражающая посуточную последовательность проявлений сейсмогенеза. Графики показывают, что ежедневно в регионе в среднем происходило более 100 сейсмических толчков с $M \geq 2$ (график n, правая шкала). На этом фоне выделяются периоды повышенной сейсмической активности (так, с 6 по 12 февраля ежедневно регистрировалось до 230-и событий, 3 и 6-7 марта количество толчков в сутки превышало 150, а 15 марта произошло 202 землетрясения). Даже в периоды относительного сейсмического затишья их количество было достаточно большим – не менее 70 землетрясений в сутки; при этом некоторые из них (например, с 23 февраля по 1 марта) имели довольно высокие ($M \geq 4$) магнитуды, позволяющие идентифицировать кинематические обстановки в очагах в момент их формирования.

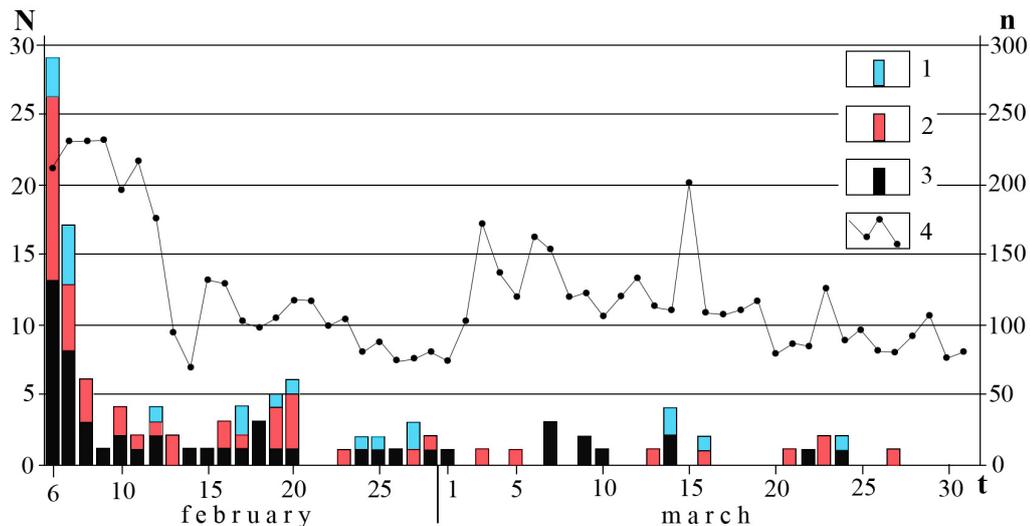


Рис. 2. Количественные соотношения разных типов землетрясений, для которых идентифицированы кинематические обстановки в очаге (N), и общее количество событий в регионе (n), произошедших в течение февраля-марта 2023 года. Условные обозначения: 1-3 – очаги, сформированные в обстановках сжатия (1), растяжения (2) и сдвиговые очаги, возникновение которых равновероятно как в условиях сжатия, так и при растяжении (3); 4 – график распределения общего количества землетрясений с $M \geq 2$ /

Fig. 2. Quantitative ratios of different types of earthquakes for which kinematic conditions in the focus (N) have been identified, and the total number of events in the region (n) that occurred during February-March 2023. Symbols: 1-3 – foci formed in conditions of compression (1), stretching (2) and shear foci, the occurrence of which is equally likely both under compression and under tension (3); 4 – a graph of the distribution of the total number of earthquakes with $M \geq 2$

В геодинамическом аспекте особый интерес представляет соотношение разных типов землетрясений, для которых идентифицированы кинематические обстановки в очаге (гистограмма, левая шкала N на рис. 2). Так, из 130 очагов, для которых получены фокальные механизмы, основная часть – 47 % (в том числе, катастрофические события 6 февраля – №№1,2 в таблице) являются сдвиговыми, формирование которых равновероятно как в обстановках сжатия, так и при растяжении земной коры. Несколько в меньшей степени (38% очагов) проявились обстановки растяжения. И только 15% фокальных механизмов отвечают условиям сжатия земной коры региона. Подобное соотношение очагов, отражающих разные кинематические обстановки сейсмогенеза в пределах одного из сегментов коллизионного Средиземноморского пояса, явилось неожиданным. Логичным в данной ситуации было бы преобладание проявлений регионального сжатия по отношению к обстановкам растяжения.

Особенности распределения ориентировок осей главных напряжений в фокальных механизмах землетрясений как индикатор геодинамических обстановок региональной сейсмогенеза. При всем многообразии идентифицированных обстановок сейсмогенеза, в регионе вполне явно проявились закономерности в распределении ориентировок осей сжатия и растяжения в очагах разных типов (рис. 3, 4).

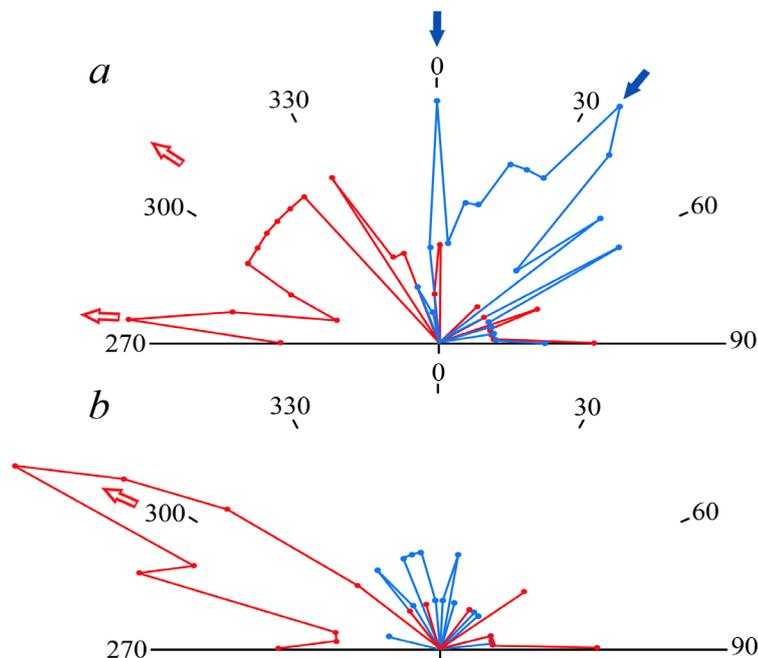


Рис. 3. Распределение ориентировок осей напряжений T (красное) и P (синее) в очагах сдвигового типа – 61 событие (а), в 49 очагах растяжения и в 19 очагах сжатия (б). Стрелками указаны направления регионального растяжения (красные) и сжатия (синие)/

Fig. 3. Distribution of orientations of the stress axes T (red) and P (blue) in the foci of the shear type – 61 events (a), in 49 foci of tension and in 19 foci of compression (b). The arrows indicate the directions of regional stretching (red) and compression (blue)

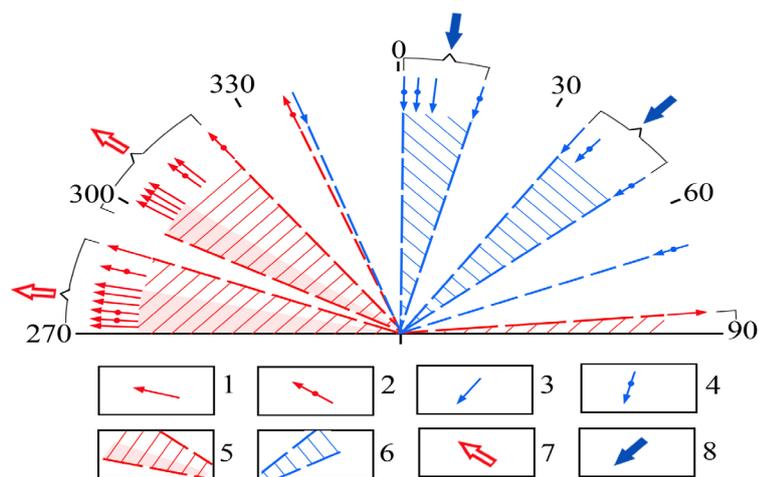


Рис. 4. Распределение ориентировок осей напряжений T и P в очагах землетрясений с $M > 4.9$. Условные обозначения: 1-2 – ориентировки осей T в очагах растяжения (1) и сдвиговых (2); 3-4 – ориентировки осей P в очагах сжатия (3) и сдвиговых (4); 5-6 – секторы концентрации осей растяжения (5) и сжатия (6); 7-8 – направления регионального растяжения (7) и сжатия (8) /

Fig. 4. Distribution of orientations of stress axes T and P in earthquake foci with $M > 4.9$. Symbols: 1-2 – orientations of the T axes in earthquake foci of tension (1) and shear (2); 3-4 – orientations of the P axes in earthquake foci of compression (3) and shear (4); 5-6 – sectors of the concentration of the axes of tension (5) and compression (6); 7-8 – directions of regional stretching (7) and compression (8)

Так, сопоставление ориентировок осей растяжения (T) и сжатия (P) в очагах *сдвигового типа* (61 событие), характеризует сегментарный характер их распределения (рис. 3а). Две пары максимумов ориентировок этих осей (в широтном и северо-западном направлениях для осей T , в меридиональном и северо-восточном направлениях – для осей P) отражают попеременное влияние 2-х систем сдвиговых напряжений на процессы сейсмогенеза – ортогональных (субмеридионального сжатия или субширотного растяжения) и диагональных (северо-восточного сжатия или северо-западного растяжения). В геодинамической трактовке, поскольку источником напряжений являются геоструктуры, расположенные к югу от исследуемой территории, правильнее будет считать, что диагональные обстановки обусловлены юго-восточным растяжением или юго-западным сжатием земной коры (далее будут указаны эти направления). В этих обстановках сформированы и катастрофические землетрясения 6 февраля 2023 г., соответственно, с $M=7.75$ и $M=7.55$ (№№1,2 в таблице; стереограммы 1, 2 на врезке к рис. 1).

На рисунке 3б совмещены розы-диаграммы ориентировок осей T и P в очагах, отражающих, соответственно, обстановки растяжения (49 очагов) и сжатия (19 очагов). Они построены не в относительном (в %), а в реальном масштабе, отражающем количество очагов каждого типа. Вследствие этого диаграмма выглядит «несбалансированной», но иллюстрирующей истинное соотношение проявлений разных типов сейсмогенеза. Можно констатировать следующее:

- в совокупности очагов, для которых идентифицированы кинематические обстановки их формирования (растяжение или сжатие земной коры), в количественном отношении доминируют те из них, которые отражают влияние растягивающих напряжений на процессы сейсмогенеза;

- высокая степень концентрации ориентировок осей растяжения, обусловившая их контрастный максимум в направлении $295-310^\circ$, с одной стороны, и слабоконтрастные максимумы с рассредоточением вдоль многих направлений осей сжатия, с другой стороны, указывают на стабильный характер обстановок растяжения земной коры и высокую вариативность напряжений, обусловивших обстановки сжатия на исследуемой территории.

Весомым аргументом в пользу данных положений является и характер распределения ориентировок осей сжатия и растяжения в очагах землетрясений с магнитудами $M>4.9$ (приведены в таблице). В этом случае тоже весьма уверенно выделяются две пары максимумов ориентировок главных осей, отражающих доминирующие кинематические обстановки в регионе: широтного растяжения–меридионального сжатия и юго-восточного растяжения–юго-западного сжатия (рис. 4). При этом высокие концентрации осей растяжения в интервалах $270-280^\circ$ и $300-305^\circ$ указывает на то, что именно процессы растяжения земной коры в этих направлениях играли основную роль в формировании сейсмогенеза.

Таким образом, с высокой степенью вероятности можно полагать, что преимущественно преобладающие в процессе регионального сейсмогенеза очаги сдвигового типа, возникновение которых равновероятно как в обстановках сжатия, так и в обстановках растяжения, в большинстве случаев обусловлены именно *обстановками растяжения земной коры* в широтном и юго-восточном направлениях. В геодинамической трактовке это означает, что современное взаимодействие Анатolianской микроплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолий-

ского разлома, где локализованы катастрофические землетрясения 6 февраля и их афтершоки, определяется, главным образом, не коллизионными, а дивергентными процессами, то есть растяжением земной коры в широтном и юго-восточном направлениях.

Хронологическая последовательность изменения кинематических обстановок сейсмогенеза. Анализ изменения во времени кинематических обстановок как в очагах всех 130-и землетрясений, для которых получены фокальные механизмы, так и в случаях реализации сильных (с $M > 4.9$) землетрясений (рис. 5), показал высокую вариативность обстановок на всем протяжении сейсмического процесса. Изменения происходили в течение весьма коротких (порой исчисляемых всего несколькими часами) промежутков времени. Даже катастрофические землетрясения 6 февраля (№№1, 2 в таблице) отражают резкую перемену напряженно-деформированного состояния земной коры, поскольку ортогональная система напряжений сменилась диагональной (врезка на рис. 1; рис. 5). В течение этих же суток произошло несколько значимых (с $M \geq 5$) событий в обстановках субширотного и юго-восточного растяжения, которые через несколько часов (7 февраля) сменились очагами субмеридионального сжатия с последующим восстановлением изначальных условий в виде вариативных обстановок растяжения земной коры (рис. 5).

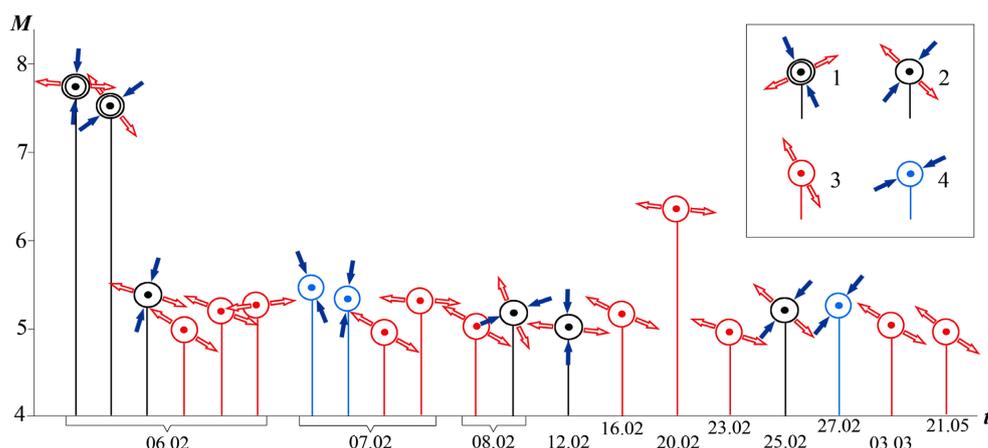


Рис. 5. Хронологическая последовательность изменения кинематических обстановок в очагах сильных (с $M > 4.9$) землетрясений. Условные обозначения: 1 – катастрофические сдвиговые землетрясения 6 февраля (№№1, 2 в таблице); 2 – сдвиговые очаги; 3-4 – очаги, сформировавшиеся в кинематических обстановках растяжения (3) и сжатия (4). Стрелки – направления растяжения (красные) и сжатия (синие) в очаге. M – шкала магнитуд, t – шкала времени /

Fig. 5. Chronological sequence of changes in kinematic settings in the foci of strong earthquakes (from $M > 4.9$). Symbols: 1 – catastrophic shear earthquakes on February 6 (No. 1, 2 in the table); 2 – shear foci; 3-4 – foci formed in kinematic conditions of stretching (3) and compression (4). Arrows – directions of stretching (red) and compression (blue) in the earthquake foci. M – is the magnitude scale, t – is the time scale

Кратковременная изменчивость кинематических обстановок сейсмогенеза для разных сейсмоактивных регионов ранее отмечалась и в наших работах [Вольфман и др., 2014; Volfman et al., 2017], и в публикациях других авторов [Гущенко, 1979; Етирмишли и др., 2019; Казымова, Казымов, 2020; Степаненко и др., 2013; Шибалин и др., 1986; Широкова, 1967; Юнга, 1996; Jackson, McKenzie, 1988; Tseng et al., 2016 и др.]. Установлено, что эти изменения, обусловившие многообразие проявлений деформационных режимов и кинематических обстановок в очагах землетрясений, отражают, как правило, не суммарное влияние различных геодинамических факторов в виде результирующего поля напряжений, а кратковремен-

ное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными. В некоторых случаях причиной разнообразия типов сейсмогенеза является локальное перераспределение полей напряжений на отдельных участках земной коры в процессе релаксации геологической среды после сильных землетрясений. Поэтому задачей сеймотектонических исследований является определение доминирующих обстановок в регионе, позволяющих установить характер геодинамического взаимодействия геоструктурных элементов тектоносферы, обусловивший общий ход сейсмического процесса.

Геодинамические сценарии развития региона и причины, обусловившие катастрофический характер турецких землетрясений. Результаты анализа изменения кинематических обстановок турецко-сирийских землетрясений 2023 года выявили основные особенности данного сейсмического процесса. Преобладающая часть очагов землетрясений (включая и очаги сдвигового типа) возникла в условиях растяжения земной коры, которые периодически (судя наличию очагов взбросового, сдвига-взбросового и взбросо-сдвигового типов, не менее 15-20-ти раз) сменялись обстановками регионального сжатия. Эта тенденция нашла отражение на хронограмме (рис. 5), из которой следует, что доминирующими обстановками, предопределившими характер большей части землетрясений с $M > 4.9$ и, соответственно, основные особенности геодинамики региона в период его высокой сейсмической активности, являются обстановки растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях. Это обстоятельство указывает на дивергентный характер взаимодействия Анатолийской микроплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома.

Системный характер распределения (в меридиональном и северо-восточном направлениях) ориентировок осей сжатия в очагах турецких землетрясений согласуется с доминирующими обстановками, установленными ранее при исследовании процессов сейсмогенеза этого же региона за период с 1977 по 2013 гг. [Volfman et al., 2017]. Было обосновано, что особенности геодинамики в этот период определялись периодически проявляющимися обстановками: а) меридионального сжатия, обусловленного движением Аравийской плиты на север; б) юго-западного–северо-восточного сжатия, вызванного процессами дивергенции в зоне Красноморского рифта, вследствие чего Аравия периодически «напирает» на Евразию в северо-восточном направлении.

Таким образом, можно обосновать геодинамический сценарий развития процессов сейсмогенеза в пределах исследуемой территории, который включает долговременную и кратковременную составляющие.

Первая отражает коллизионное взаимодействие сегментов тектоносферы 2-х типов: 1) периодическое сжатие земной коры в меридиональном направлении, обусловленное движением Аравийской плиты на север; 2) юго-западное–северо-восточное сжатие коры, вызванное процессами дивергенции в зоне Красноморского рифта и перемещением Аравии в северо-восточном направлении.

Вторая часть геодинамического сценария охватывает период высокой сейсмической активности региона (с февраля 2023 года), в течение которого доминировали обстановки растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях, обусловленные дивергентным характером взаимодействия Анатолийской микроплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома.

По-видимому, преодоление общего тренда развития региона могло реализоваться только путем инверсии геодинамического режима при условии приложения значительных по величине напряжений, что, в итоге, и обусловило катастрофический, «взрывной» всплеск сейсмической активности.

Выводы

Результаты анализа фокальных механизмов и пространственно-временного распределения очагов катастрофических турецко-сирийских землетрясений 6 февраля 2023 года и их афтершоков показали, что их формирование было обусловлено, главным образом, доминирующими геодинамическим обстановками растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях. Дивергентный характер кратковременного взаимодействия Анатолийской субплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома и, соответственно, кинематические обстановки, предопределившие основные особенности сейсмогенеза, как бы «выпадают» из общего, долговременного тренда геодинамического развития региона, определяемого преимущественно коллизионными процессами в зоне сочленения литосферных плит Аравии и Евразии. Это инверсионное возмущение общего хода геодинамического развития региона, проявившееся относительно локально – только в пределах зоны внутриплитного Восточно-Анатолийского разлома, могло реализоваться лишь в условиях приложения весьма значительных по величине напряжений, что обусловило «взрывной», катастрофический по интенсивности всплеск сейсмической активности в регионе.

Литература

1. Вольфман Ю.М., Гинтов О.Б., Колесникова Е.Я., Муровская А.В. Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений системы Загрос // Геодинамика и тектонофизика. – 2014, 5(1). – С.305-319.
2. 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. – 312. №4. – С. 830-835.
3. Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М.: Наука, 1979. – С. 26–51.
4. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. – Киев: Феникс, 2005. – 572 с.
5. Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э., Казымов И.Э. Расчет тензора сейсмического момента землетрясений Азербайджана за период 2012-2015 гг. // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. №7. – С. 103-115.
6. Журавлев В.И., Лукк А.А. Полуденная активизация сейсмичности в Тупции и ряде других регионов мира // Геофизические исследования. – 2011. – Том 12, № 4. – С.31-57.
7. Казымова С.Э., Казымов И.Э. Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений и GPS-станций. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. 10 (3). – С.40 – 56. DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003.
8. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. – М.: ГЕОС. – 2017. – 234 с.
9. Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О причинах возникновения и последствиях двух разрушительных землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Геология и окружающая среда. – 2023. – Т. 3, № 1. – С. 22-34.

10. 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.
11. Сулиди-Кондратьев Е.Д., Козлов В.В. Деструкция земной коры в зоне сочленения Африкано-Аравийского континента и Средиземноморско-складчатого пояса. // В кн.: Тектоника Средиземноморского пояса. / Отв. ред. Муратов М.В., Яншин А.Л. – М.: Наука, 1980. – С. 40-49
12. Шебалин Н.В., Ибрагимов Р.Н., Чернов Ю.К. и др. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
13. Широкова Е.И. Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса. // Физика Земли. – 1967. – №1. – С. 22–36.
14. Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии. // Физика Земли. – 1996. – №12. – С. 37–58.
15. Alptekin O., Nabelek J., Toksoz M. Source mechanism of the Bartin earthquake of September 3, 1968 in northwest Turkey: evidence for active thrust faulting at the southern Black Sea margin // *Tectonophysics*. – 1986. – №122. – P. 73-78.
16. Elliott J., Copley A., Holley R., Scharer K., Parsons B. The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118. – pp. 1619-1637.
17. Golonka J. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic // *Tectonophysics*. – 2004. – 381. – P. 235-273.
18. Jackson J.A., Haines A.J., Hoot W.E. The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran // *Journ. Geophys. Res.* – 1995. – V. 100. – P. 15205-15219.
19. Jackson J.A., McKenzie D. The Relationship Between Plate Motions and Seismic Moment Tensors, and the Rates of Active Deformation in the Mediterranean and Middle-East // *Geophys. Journ.* – 1988. – Vol.93. – P. 45-73.
20. Nikishin A., Ziegler P., Bolotov S., Fokin P. Late Palaeozoic to Cenozoic Evolution of the Black Sea-Southern Eastern Europe Region: A View from the Russian Platform // *Turkish J. Earth Sc.* – 2011. – 20. – P. 571-634.
21. Okay A., Nikishin A. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region // *Int. Geol. Rev.* – 2015. – 57(5-8). – P. 1051-1076.
22. Stampfli G.M. Tethyan oceans // Bozkurt E., Winchester J.A., Piper, J.D.A. (eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area – Geological Society, London: 2000. Special Publications*. – 173. – P. 1-23.
23. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms // *Tectonophysics*. – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.
24. 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
25. Wortel M., Spakman W. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region // *Science*. – 2000. – 290. – P. 1910-1917.

References

1. Volfman Y.M., Gintov O.B., Kolesnikova E.Ya., Murovskaya A.V. 2014. Tectonophysical interpretation of earthquake focal mechanisms of the Zagros system. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 305–319. DOI: 10.5800/GT-2014-5-1-0129. (In Russ.)
2. 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. Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. 1991. 312. No. 4. pp. 830–835. (In Russ.)

3. Gushchenko O.I. Reconstruction of the field of megaregional tectonic stresses in seismically active regions of Eurasia. In: Fields of stress and deformation in the lithosphere. Moscow. Nauka, 1979. pp. 26–51. (In Russ.)

4. 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.)

5. Yetirmishli G.J., Kazimova S.E., Kazimov I.E. Seismic-moment tensor of earthquakes in Azerbaijan for 2012–2015. Russian Geology and Geophysics. 2019. Vol. 60. No. 7. pp. 819–831. DOI: 10.15372/RGG2019053.

6. Zhuravlev V.I., Lukk A.A. Midday activation seismicity in Turkey and several other world regions. Geophysical Research. 2011. Vol. 12, No. 4. pp. 31–57. (In Russ.)

7. 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. DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003. (In Russ.)

8. Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms. Moscow. GEOS. 2017. 234 p. (In Russ.)

9. Ruzhich V.V., Berzhinskaya L.P., Levina E.A., Ponomareva E.I. On the causes and consequences of two destructive earthquakes in Turkey on 06.02.2023. Geology and the Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. pp. 22–34. (In Russ.)

10. Stepanenko N.Ya., Simonova N.A., Kardanets V.Yu. Spatial variations of the axes of principal stresses in the sources of earthquakes in the Vrancea region. Seismological Bulletin of Ukraine for 2012 r. – Sevastopol: SPC “ECOSI-Hydrophysics”, 2013. – P. 46–56. (In Russ.)

11. Sulidi -Kondratyev E.D., Kozlov V.V. Destruction of the Earth's crust in the zone of junction of the African-Arabian continent and the Mediterranean-fold belt. In: Tectonics of the Mediterranean Belt. Moscow. Nauka, 1980. pp. 40–49. (In Russ.)

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

13. Shirokova E.I. General patterns in the orientation of the main stresses in the sources of earthquakes in the Mediterranean-Asian seismic belt. Physics of the Solid Earth. 1967. No. 1. pp. 22–36. (In Russ.)

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

15. Alptekin O., Nabelek J., Toksoz M. Source mechanism of the Bartin earthquake of September 3, 1968 in northwest Turkey: evidence for active thrust faulting at the southern Black Sea margin. Tectonophysics. 1986. No. 122. pp. 73–78.

16. Elliott J., Copley A., Holley R., Scharer K., Parsons B. The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake. J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. Vol. 118. pp. 1619–1637.

17. Golonka J. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. Tectonophysics. 2004. 381. pp. 235–273.

18. Jackson J.A., Haines A.J., Hoot W.E. The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran. Journ. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. pp. 15205–15219.

19. Jackson J.A., McKenzie D. The Relationship Between Plate Motions and Seismic Moment Tensors, and the Rates of Active Deformation in the Mediterranean and Middle-East. Geophys. Journ. 1988. Vol.93. pp. 45–73.

20. Nikishin A., Ziegler P., Bolotov S., Fokin P. Late Palaeozoic to Cenozoic Evolution of the Black Sea-Southern Eastern Europe Region: A View from the Russian Platform. Turkish J. Earth Sc. 2011. 20. pp. 571–634.

21. Okay A., Nikishin A. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. Int. Geol. Rev. 2015. 57(5-8). pp. 1051–1076.

22. Stampfli G.M. Tethyan oceans. Bozkurt E., Winchester J.A., Piper, J.D.A. (eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area* – Geological Society, London, 2000. Special Publications. 173. pp. 1–23.

23. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. pp. 362–374.

24. 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.

25. Wortel M., Spakman W. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. *Science*. 2000. 290. pp. 1910–1917.

УДК 550.34,550.21.534.11

DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003

Оригинальная статья

Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных

А.В. Горбатиков¹, В.Б. Заалишвили², Ю.В. Харазова¹,
М.Ю. Степанова¹, В.К. Милюков^{3,4}, А.П. Миронов^{3,4},
Х.М. Хубаев⁴, Д.А. Мельков², А.С. Кануков², З.В. Абаева²,
Г.В. Шманатов², А.Ф. Габараев², М.О. Ревазов²

¹Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта,

Россия, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1;

²Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,
Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а;

³Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга МГУ,
Россия, 119234, пр. Университетский, д.13, Москва;

⁴Владикавказский научный центр Российской академии наук (КНИО ВНЦ РАН),
Россия, 363110, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1
e-mail: avgor70@mail.ru

Статья поступила: 18.07.00.2023, доработка: 01.09.2023, принята к публикации: 08.09.2023

Резюме: Актуальность работы. Исследование глубинного строения в контактных зонах литосферных блоков в сопоставлении с сейсмичностью и регистрируемыми современными движениями имеет важнейшее значение для правильного понимания геодинамических процессов. Кавказская коллизионная зона характеризуется высокой геодинамической и тектонической активностью и сейсмичностью. Формирование тектонической структуры горно-складчатого сооружения Кавказа (далее – Кавказа) связано, в первую очередь, с напряжениями субгоризонтального сжатия, ориентированными, в общем, вкрест простирания и на современном этапе развития такие напряжения играют определяющую роль. С целью представления тектонического процесса в рамках единой кинематической модели была поставлена задача объединения структур Большого Кавказа, Осетинской впадины и Сунженского хребта единым глубинным геофизическим разрезом. **Методы.** Для построения структур Большого Кавказа, Осетинской впадины и Сунженского хребта единым глубинным геофизическим разрезом был применён метод микросейсмического зондирования (ММЗ). **Результаты.** Предложена кинематическая схема тектонических движений, которая позволяет объяснить наличие в тектонической зоне северной моноклинали Кавказа серии падающих на север надвигов и взросов. При коллизии складчато-глыбового горного сооружения Кавказа и Скифской плиты верхний слой 8-11 км надвигается на Кавказ быстрее, проскальзывая по контакту 8-11 км, и создает ликстрику Владикавказского разлома. Сдвиг идет по поверхности фундамента, что объясняет сейсмичность, приуроченную к границе фундамент-осадки на глубине около 10 км. В районе Владикавказского разлома при столкновении с консолидированным приподнятым массивом Кавказа происходит процесс выпучивания осадочной толщи. Сунженский хребет является промежуточной складкой этого процесса. Зафикси-

рованное спутниковыми геодезическими измерениями более быстрое поднятие бортов Владикавказского разлома по сравнению с его центральной частью объясняется тем, что для южной ветви разлома это связано с задирием осадочного толща при столкновении с приподнятым глыбовым фронтом Кавказа. Над северной ветвью разлома формируется независимый фронт поднятия.

Ключевые слова: глубинное строение, микросейсмическое зондирование, кинематическая модель, сейсмичность, Кавказская коллизионная зона, Сунженский хребет.

Благодарности: Исследования выполнены при частичной поддержке гранта РФФИ №21-55-46007 СТ_а.

Для цитирования: Горбати́ков А. В., Заалишвили В. Б., Харазова Ю. В., Степанова М. Ю., Милу́ков В. К., Миронов А. П., Хубаев Х. М., Мельков Д. А., Кануков А. С., Абаева З. В., Шманатов Г. В., Габараев А. Ф., Ревазов М. О. Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 33-48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003

Original paper

Deep structure, seismicity, tectonics of the northern flank of the Greater Caucasus and the Terek-Caspian trough (North Ossetia) within the framework of a unified kinematic model based on new geophysical data

A.V. Gorbatikov¹, V.B. Zaalishvili², Yu.V. Kharazova¹,
M.Yu. Stepanova¹, V.K. Milyukov^{3, 4}, A.P. Mironov^{3, 4},
Kh.M. Khubaev⁴, D.A. Melkov², A.S. Kanukov², Z.V. Abaeva²,
G.V. Shmanatov², A.F. Gabaraev², M.O. Revazov²

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
10/1 Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation;

²Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz, 362002, Russian Federation;

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University,
13 Universitetsky pr., Moscow, 119234, Russian Federation;

⁴Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
1 Williams str., Prigorodny district, Mikhailovskoye village 363110, Russian Federation,
e-mail: avgor70@mail.ru

Received: 18.07.2023, revised: 01.08.2023, accepted: 08.09.2023

Abstract: Relevance. The study of the depth structure in the contact zones of lithospheric blocks in comparison with seismicity and recorded recent movements is of utmost importance for the correct understanding of geodynamic processes. The Caucasian collision zone is characterized by high geodynamic and tectonic activity and seismicity. The formation of the tectonic structure of the Caucasus mountain-fold structure (hereinafter referred to as the Caucasus) is primarily associated with subhorizontal compression stresses oriented, in general, across the strike, and at the present stage of development such stresses play a determining role. In order to represent the tectonic process within the framework of a unified kinematic model, the goal was set to unite

the structures of the Greater Caucasus, the Ossetian Depression and the Sunzhensky Ridge by a single deep geophysical section. **Methods.** The method of microseismic sounding was applied to build the structures of the Greater Caucasus, the Ossetian Depression and the Sunzhensky Ridge as a single deep geophysical section. **Results.** A kinematic scheme of tectonic movements is proposed, which allows to explain the presence of a series of northward-dipping thrusts and thrusts in the tectonic zone of the northern monocline of the Caucasus. During collision of the fold-and-boulder mountain structure of the Caucasus and the Scythian plate, the upper 8-11 km layer thrusts faster into the Caucasus, slipping across the 8-11 km contact, and creates the listric of the Vladikavkaz fault. The thrusting is along the basement surface, which explains the seismicity confined to the basement-sediment boundary at a depth of about 10 km. In the vicinity of the Vladikavkaz fault, the sedimentary strata is bulging as it collides with the consolidated uplifted massif of the Caucasus. The Sunzhensky Ridge is an intermediate fold of this process. The faster uplift of the sides of the Vladikavkaz fault as compared to its central part recorded by satellite geodetic measurements is explained by the fact that for the southern branch of the fault it is associated with the bulging of the sedimentary strata during collision with the uplifted clastic front of the Caucasus. An independent uplift front is formed above the northern branch of the fault.

Keywords: deep structure, microseismic sounding, kinematic model, seismicity, Caucasian collision zone, Sunzhensky Ridge.

Acknowledgments: *The research was carried out with partial support from the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 21-55-46007 ST_a.*

For citation: Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu., Milyukov V.K., Mironov A.P., Khubaev Kh.M., Melkov D.A., Kanukov A.S., Abaeva Z.V., Shmanatov G.V., Gabaraev A.F., Revazov M.O. Deep structure, seismicity, tectonics of the northern flank of the Greater Caucasus and the Terek-Caspian trough (North Ossetia) within the framework of a unified kinematic model based on new geophysical data. *Geologiya / Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(3): 33-48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003.

Введение

Исследование глубинного строения в контактных зонах литосферных блоков в сопоставлении с сейсмичностью и регистрируемыми современными движениями имеет важнейшее значение для правильного понимания геодинамических процессов.

Кавказская коллизионная зона характеризуется высокой геодинамической и тектонической активностью и сейсмичностью. Исследования неотектонических напряжений показывают, что формирование тектонической структуры Кавказа связано в первую очередь с напряжениями субгоризонтального сжатия, ориентированными в общем вкрест простирания [Сим, 2022]. Изучение механизмов очагов землетрясений региона свидетельствует о том, что и на современном этапе развития такие напряжения играют определяющую роль [Heidbach, 2016; Стогний и др., 2022, 2023].

Поскольку сейсмичность распространяется не только на область Большого Кавказа, но и на область его сочленения со Скифской плитой, очевидно, они объединены единым тектоническим сложно построенным процессом. В этой связи попробуем рассмотреть в рамках единой модели строение и тектонику северного фланга Большого Кавказа, Осетинской впадины и Сунженского хребта.

Складчатость и надвиг в осадочном чехле Сунженской антиклинальной зоны образовались в плиоцен-четвертичное время в обстановке меридионального сжатия на фоне вертикальных движений [поднятия Терско-Сунженской зоны и Большого Кавказа и погружения предгорных впадин] и в результате активизации Пшекиш-Тырныузской разломной зоны, поставившей глубинное тепло и флюиды, приводившие к увеличению объема и пластичности глинистых и соленосных толщ [Короновский, 1990].

В конце миоцена – среднем плиоцене полоса северной моноклинали Большого Кавказа восточнее Коринского выступа подверглась довольно интенсивным склад-

чато-надвиговым деформациям. Общее падение мезо-кайнозойских толщ к северу осложнилось несколькими запрокинутыми к югу антиклинальными складками, крылья которых срезаются системой довольно пологих надвигов с общим смещением масс к югу, т. е. от краевого прогиба в сторону поднятия Большого Кавказа, придающими всей структуре чешуйчатый характер. По наблюдениям Е.Е. Милановского в бассейнах Гизельдона, Терека и Камбилеевки разломы становятся круче и приобретают характер взбросов, обнаруживаются отчетливые признаки их развития в течение всего антропогена [Милановский, 1968].

Сходные по кинематике структуры, но значительно меньшей амплитуды, развиваются вплоть до настоящего времени вдоль южной ветви Владикавказского разлома, служащего границей между горным сооружением Кавказа и Осетинской впадиной Терско-Каспийского прогиба. Эта ветвь разлома была прослежена на востоке от р. Камбилеевка до р. Гизельдон [Милановский, 1968] и на запад до р. Ардон [Овсяченко, 2008]. Севернее были выделены еще 2 ветви разлома, а общая ширина разломной зоны составила 5-7 км. Северная ветвь характеризуется как взброс с опущенным северным крылом. Палеосейсмогеологические исследования выявили активные разрывы [преимущественно крутые взбросы] на всех ветвях разломной зоны [Овсяченко, 2011].

Ранее здесь уже проводились сейсморазведочные работы с использованием методов ГСЗ и МОВ ОГТ [Краснопевцева, 1970; Летавин и др., 1975; Коновалов, 1987]. В частности, были получены глубинные границы по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани [Краснопевцева, 1970]: Мохоровичича, Конрада, поверхность «гранитного» слоя, преломляющая граница, которая в северной части Предкавказья соответствует поверхности палеозойского фундамента, а в Осетинской впадине близка к поверхности подсолевых верхнеюрских или ниже-среднеюрских терригенных отложений, а также выделены разломы в кровле меловых отложений по данным МОВ ОГТ [Государственная геологическая карта [Геологический разрез по линии А₁-А₃], 2021].

Несмотря на значительный объем работ и обширное покрытие территории исследования, МОВ ОГТ не позволило получить надежную информацию о строении глубже, чем 4-5 км, а ГСЗ не дало достаточного латерального разрешения выделяемых структур. В этой связи нами была поставлена задача повторно пройти региональный профиль, объединяющий северный фланг Большого Кавказа, Осетинскую впадину и Сунженский хребет, альтернативным методом пассивной сейсморазведки.

Метод исследования

Для изучения глубинной структуры земной коры был применён метод микросейсмического зондирования [ММЗ] [Горбатиков и др., 2008]. Это дифференциальный амплитудный метод. Удобство его применения заключается в том, что измерения выполняются по принципу «отдельной станцией» последовательно в точках профиля. Теоретические основы ММЗ обсуждаются в [Горбатиков, Цуканов, 2011; Цуканов, Горбатиков 2015; Яновская, 2017].

В качестве зондирующего сигнала используются фоновые микросейсмические колебания с частотой $f < 1$ Гц. ММЗ базируется на ряде предположений, касающихся

зондирующего излучения:

– генерация микросейсм происходит в дальней от наблюдателя зоне, регистрируемое микросейсмическое поле является результатом интерференции волн разных типов, оно носит случайный характер;

– в микросейсмическом поле по энергии преобладают волны поверхностного типа; вертикальная компонента микросейсмического поля определяется преимущественным вкладом фундаментальных мод Рэлея [наличие высших мод минимально];

– среда, в которой распространяются микросейсмические волны, влияет на формирование и распределение их спектральных характеристик; к модели среды не предъявляется требование локальной горизонтальной слоистости, она может иметь вертикальные границы и неоднородности.

Информативным параметром является степень искажения спектров исходного микросейсмического поля при его рассеянии на скоростных неоднородностях. Фазовая информация не используется. Форма и глубина залегания неоднородности оценивается исходя из пространственного распределения искажений спектра исходного поля, фиксируемого на земной поверхности, и частоты, на которой эти искажения проявляются в максимальной степени.

В работе [Горбатиков, Цуканов, 2011] на разработанном комплексе программ проведены расчеты влияния заглубленных включений на пространственное распределение спектра мощности поля поверхностных волн Рэлея. Рассмотрены включения различной формы, размеров, глубины залегания и скоростного контраста по отношению к вмещающей среде, но при этом рассмотрение ограничено случаями с неизменным значением коэффициента Пуассона в самой неоднородности и во вмещающей среде. Показано, что амплитудная реакция не чувствительна к форме скоростного включения, если его размеры не превышают $\lambda/4$, где λ – длина фундаментальной моды волны Рэлея, соответствующая глубине залегания. При этом возможно обнаружить присутствие включения и определить знак его скоростного контраста. В терминах глубин, используя коэффициент глубинной привязки, можно утверждать, что изображения двух неоднородностей со скоростными контрастами одного знака должны сливаться, если расстояние по горизонтали между ними составляет половину глубины их залегания или менее.

Основные закономерности формирования сигнала в ММЗ, полученные на численной модели, находятся в хорошем соответствии с результатами полевых экспериментов. Однако в ряде натуральных экспериментальных наблюдений было обнаружено, что полученные изображения не соответствуют результатам описанной серии численных расчетов. Это относится к возможности раздельного наблюдения двух субвертикальных структур на глубинах, где, в соответствии с расчетами, изображения должны сливаться в одно, то есть, наблюдается “сверхразрешение”. Обнаруженное несоответствие между результатами расчетов и экспериментов потребовало проведения дополнительного исследования, в ходе которого было показано, что данный эффект может наблюдаться, если коэффициент Пуассона материала включения приближается к нулевому значению [Цуканов, Горбатиков, 2015]. В природных условиях это может означать наличие во включении развитой микротрещиноватости либо повышенной пористости.

Согласно численным экспериментам [Горбатилов, Цуканов, 2011], разрешающая способность метода при восстановлении изображения по горизонтали оценивается как $[0.25 \div 0.3] \lambda$, где λ – эффективная зондирующая длина волны. В соответствии с указанной работой, разрешение по вертикали можно оценить, как $[0.25 \div 0.3] \lambda$, где λ – эффективная длина волны для средней глубины между неоднородностями. Близкую оценку разрешения по вертикали можно также получить по результатам аналитического подхода [Яновская, 2017]. В работе [Горбатилов, Цуканов, 2011] показано, что обнаружить присутствие изолированной малой неоднородности возможно, даже если ее размеры меньше длины волны в 10 и более раз.

Методика проведения полевых измерений сводится к накоплению спектра мощности микросейсмического сигнала в течение некоторого времени последовательно от точки к точке вдоль профиля одним или несколькими переносными датчиками. Одновременно регистрируется микросейсмический сигнал на опорной точке в пределах исследуемого полигона. Коррекция на нее выполняется для устранения эффекта нестационарности зондирующего микросейсмического сигнала. В зависимости от поставленной задачи возможно проведение как профильной, так и площадной съемки.

ММЗ позволяет построить разрез локальных скоростных пространственных вариаций по отношению к некоторой средней региональной скоростной модели, которая либо берется из независимых источников, либо оценивается независимо от ММЗ с помощью активных или пассивных сейсмологических методов. Степень отклонения от региональной скоростной модели выражается в децибелах и определяется согласно тоновой шкале. Известно, что дисперсионная кривая, рассчитанная по горизонтально слоистой скоростной модели, ведет себя достаточно устойчиво по отношению даже к значительным вариациям скоростей в слоях исходной модели, с чем связана неединственность решения обратной задачи строения на основе измерения дисперсионной картины, что отмечается многими исследователями. Обратим внимание, что ММЗ позволяет получить разрез в параметрах вариаций скоростей по отношению к региональной скоростной модели, но при этом в процедуре ММЗ используется лишь дисперсионная кривая, соответствующая этому скоростному разрезу. Саму скоростную модель разреза можно при этом не определять, но любая выбранная региональная скоростная модель должна обеспечивать именно ту дисперсионную кривую, которая принята в расчет.

Исходные данные

В соответствии с поставленной задачей был пройден профиль по методу микросейсмического зондирования, представленный на рис. 1. Этот профиль является продолжением более длинного профиля в Осетинском секторе, начинающегося у г. Цхинвал, и пересекающего весь Большой Кавказ в меридиональном направлении. Результаты исследований вдоль большого профиля представлены в работе [Горбатилов и др., 2015]. Предмет нашего анализа в данной публикации – это продолжение большого профиля на север через Осетинскую впадину и Сунженский хребет до с. Эльхотово.

Общая длина анализируемого участка профиля составляет 65 км, пространственный шаг между пунктами измерений в среднем составляет 500 м. По получен-

ным точкам построен разрез по технологии ММЗ до глубины 45 км.

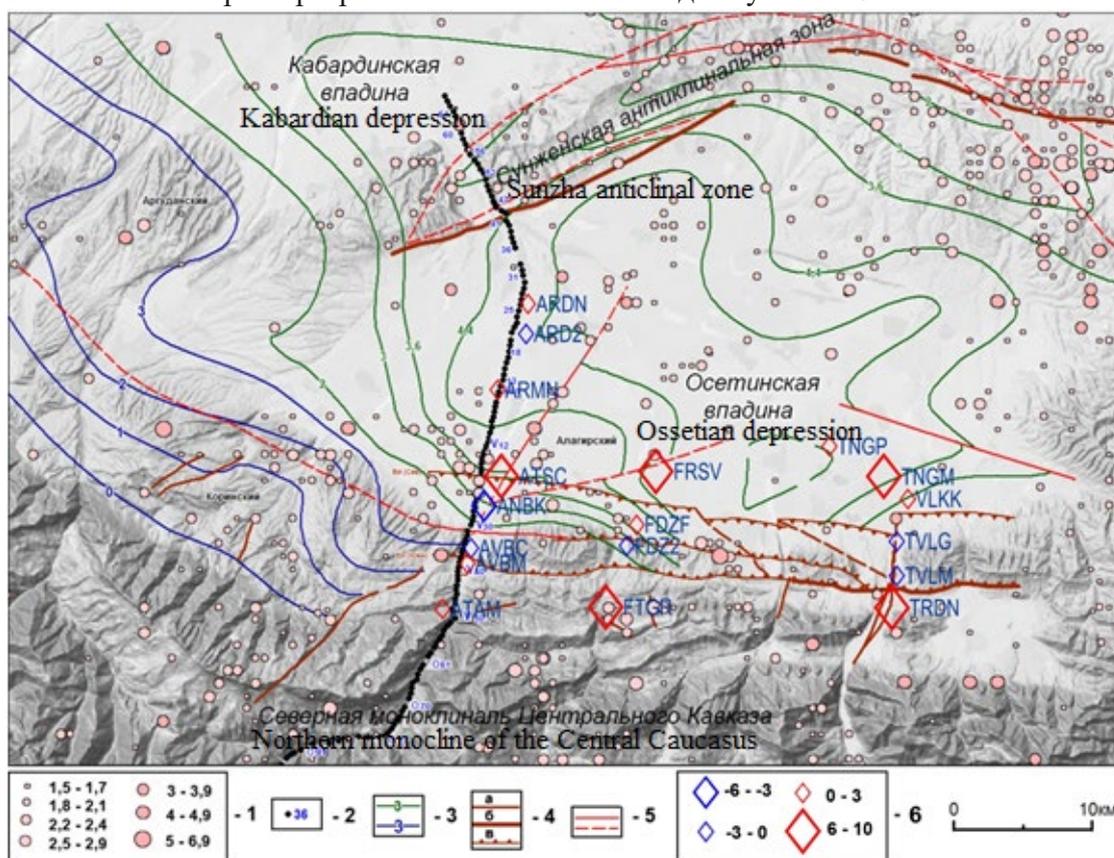


Рис. 1. Схема расположения предгорной части Осетинского профиля ММЗ.
 1 – эпицентры землетрясений соответствующих магнитуд. Кружки более светлого оттенка – по (Электронный каталог) с 2003г., более темного – по (Специализированный каталог) (до 2003г.);
 2 – пикеты профиля ММЗ; 3 – изолинии глубины поверхности меловых по (Коновалов, 1987) и юрских отложений [Летавин и др., 1975] и их значения в км (подписаны названия структурных выступов по поверхностям этих отложений – Аргуданский, Коринский, Алагирский);
 4 – выходы разломов на поверхность: а – второстепенных, б – активных разломов по (Карта активных разломов Евразии http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html), в – ветви Владикавказского разлома [Овсюченко, 2011]; 5 – разломы на поверхности меловых отложений (Государственная геологическая карта.Тектоническая схема, 2021) ; 6 – вертикальные скорости смещений ГНСС-станций относительно эллипсоида WGS84, мм/год /

Fig. 1. Layout of the foothill part of the Ossetian profile of the MMZ.
 1 – epicenters of earthquakes of corresponding magnitudes. Mugs of a lighter shade – according to (Electronic catalogue) since 2003, darker – according to (Specialized catalogue) (until 2003);
 2 – MMZ profile pickets; 3 – isolines of the depth of the surface of Cretaceous (Konovalov, 1987) and Jurassic deposits [Letavin et al., 1975] and their values in km (the names of structural protrusions on the surfaces of these deposits are signed – Argudansky, Korinsky, Alagirsky);
 4 – exposures of faults to the surface: a – minor, b – active faults according to (Map of active faults of Eurasia http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html), c – branches of the Vladikavkaz fault [Ovsyuchenko, 2011]; 5 – faults on the surface of Cretaceous deposits (State geological map. Tectonic scheme, 2021); 6 – vertical displacement rates of GNSS stations relative to the WGS84 ellipsoid, mm/year

Результаты

Разрез по ММЗ показан на рис. 2. Он представляет собой поле вариаций скоростей сдвиговых сейсмических волн относительно сглаженной региональной модели. Желтыми и красными цветами обозначены зоны относительного понижения

скоростей, синими цветами обозначены зоны относительного повышения скоростей. Серые цвета означают, что в этих местах скорости близки к сглаженной скоростной модели. Шкала отклонений скоростей от модели представлена на рисунке справа и выражается в дБ. Отметим, что один и тот же цвет на разных глубинах может означать различные по абсолютной величине скорости, поскольку сглаженная региональная скоростная модель имеет различные скорости на разных глубинах. Используемая региональная модель приводится в работе [Горбатилов и др., 2015].

Отметим несколько особенностей полученного разреза. Так на границе горного сооружения и Осетинской впадины хорошо различается листрическая структура, соответствующая южной ветви Владикавказского разлома. Она имеет относительно низкие скорости сдвиговых волн, что согласуется с раздробленностью этой зоны. Под Северным склоном Кавказа выделяется крупное низкоскоростное тело с кровлей приблизительно на глубине 10 км, которое, как мы считаем, связано с причиной горообразования и обсуждается в работе [Горбатилов и др., 2015].

Обсуждение

На разрезе ММЗ (рис. 2) видно, что зона Сунженского хребта выделяется пониженной скоростью на всю глубину земной коры, что согласуется с представлениями Н.В. Короновского [Короновский, 1990].

Этим фактом подтверждается наличие под ней широкой разломной зоны палеозойского заложения, сохраняющей некоторую современную активность. Решить вопрос о роли вертикальных движений в процессе формирования складчатости по данному разрезу не представляется возможным. Можно только отметить, что отчетливые области пониженной скорости чехла в северо-западном крыле антиклинали имеют тенденцию к опусканию от 8 до 10 км. С другой стороны, по данным ГСЗ в этом месте не выделяется отчетливой разломной зоны, однако на севере разреза границы Конрада и Мохо перестают прослеживаться, а отражающие площадки в гранитном слое на глубине 24-26 км (рис. 2) сильно варьируют по глубине, свидетельствуя о значительной неровности границы.

Сейсмичность района (см. рис. 2) распадается по своим пространственно-энергетическим характеристикам на три отчетливые группы. Каждая из этих групп почти строго соответствует выделенным по ММЗ зонам глубинного строения. 1) Сейсмичность под глыбовым массивом Большого Кавказа характеризуется достаточно случайным разбросом глубин гипоцентров в диапазоне примерно от -2 до -25 км. 2) Сейсмичность под Осетинской впадиной характеризуется достаточно компактной приуроченностью к линии фундамента (предположительно древнего байкальского) на глубине 10-13 км. 3) Сейсмичность под Сунженским хребтом характеризуется существенно более низкой интенсивностью по сравнению с двумя предыдущими зонами. Причем ослабление происходит резко при переходе через субвертикальную высокоскоростную границу при движении с юга на север.

Необходимо отметить несколько обстоятельств, связанных со строением и современными движениями, которые будет важно рассмотреть в их совокупности при формулировании кинематической тектонической схемы в районе исследований:

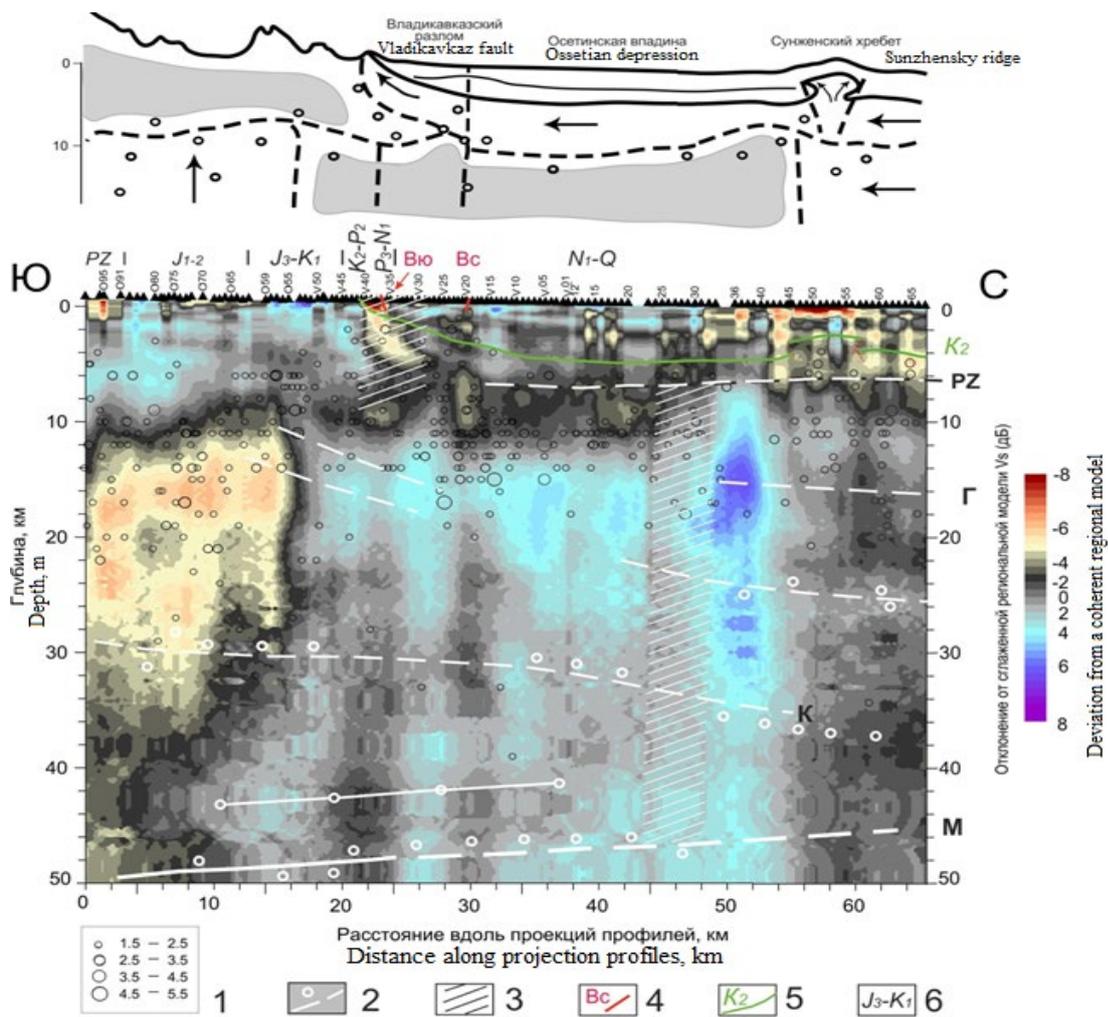


Рис. 2. Глубинный разрез ММЗ по Осетинскому профилю (Северного склона Кавказа, Осетинской впадины и Сунженского хребта).

1 – Проекция очагов землетрясений соответствующих магнитуд в полосе 70 км западнее и восточнее линии профиля. 2 – Глубинные границы, полученные по профилю ГСЗ Степное-Бакуриани (Краснопевцева, 1970): М – Мохоровичича, К – Конрада, Г – поверхность «гранитного» слоя, PZ – преломляющая граница, которая в северной части Предкавказья соответствует поверхности палеозойского фундамента, а в Осетинской впадине близка к поверхности подсолевых верхнеюрских или ниже-среднеюрских терригенных отложений; 3 – разломы по тем же данным; 4 – выходы северной и южной ветвей Владикавказского разлома на поверхность (Овсюченко, 2011). 5 – Кровля меловых отложений по данным МОВ ОГТ (Государственная геологическая карта. (Геологический разрез по линии А₁-А₃), 2021; Коновалов, 1987). 6 – Области выхода на поверхность отложений соответствующего геологического возраста (Государственная геологическая карта, 2021) /

Fig. 2. Depth section of the MMZ along the Ossetian profile (Northern slope of the Caucasus, Ossetian depression and Sunzhensky ridge).

1 – Projections of earthquake sources of corresponding magnitudes in a strip of 70 km west and east of the profile line. 2 – Deep boundaries obtained from the profile of the Stepnoe-Bakuriani deep seismic zone (Krasnopevtseva, 1970): M – Mohorovichich, K – Konrad, G – surface of the “granite” layer, PZ – refractive boundary, which in the northern part of Ciscaucasia corresponds to the surface of the Paleozoic basement, and in the Ossetian depression it is close to the surface of subsalt Upper Jurassic or Lower-Middle Jurassic terrigenous deposits; 3 – faults according to the same data; 4 – exposures of the northern and southern branches of the Vladikavkaz fault to the surface (Ovsyuchenko, 2011). 5 – The roof of the Cretaceous deposits according to the CDP data (State geological map. (Geological section along line A₁-A₃), 2021; Konovalov, 1987). 6 – Areas where sediments of the corresponding geological age come to the surface (State Geological Map, 2021)

Глыбовое строение. Выделенная на глубинах 10-40 км низкоскоростная область (рис. 2, пикеты О55-О97) имеет тенденцию к всплыванию. Очевидным признаком этого является высокая латеральная корреляция между наиболее поднятой частью горного рельефа (имеющая также отражение в морфологии и возрастах пород) и положением низкоскоростной области. Обратим внимание на то, что более простое глыбовое строение северного крыла мегантиклинория Большого Кавказа ассоциируется в плане с низкоскоростным объемом, а складчатое сложно построенное южное крыло с высокоскоростным объемом. Северное крыло Кавказа образовано преимущественно глыбовыми формами, а южное – складчатыми. Наши материалы указывают на необходимость привлекать модель локальной адвекции [Горбатилов и др., 2015].

Складчато-надвиговые деформации северной моноклинали Большого Кавказа. Общее падение мезо-кайнозойских толщ к северу осложнилось несколькими запрокинутыми к югу антиклинальными складками, крылья которых срезаются системой довольно пологих надвигов с общим смещением масс к югу, придающими всей структуре чешуйчатый характер.

На двух ветвях Владикавказского разлома выявлены активные разрывы, преимущественно взбросы с опущенным северным крылом.

Дислокации Сунженской антиклинальной зоны. На современной карте активных разломов Евразии для Сунженского хребта изображен только безымянный разлом, проходящий в основании южного склона хребта. Он характеризуется как активный в плиоцен-четвертичное время взброс с поднятым северным крылом. Сунженским разрывом был назван выявленный по материалам сейсморазведки [Коновалов, 1987] разлом, отделяющий западную часть Сунженской антиклинальной зоны от Алханчуртской и Кабардинской впадин. Амплитуда вертикального смещения по нему уменьшается в западном направлении от 3000 (Карабулак-Ачалукская антиклиналь) до 20-50 м (Аргуданский выступ). На Заманкульском месторождении она составляет 1,5-2 км, а на западной периферии антиклинали в месте прохождения профиля ММЗ амплитуда вертикального смещения кровли мела уменьшается до 500-700 м.

Результаты измерений современных движений в Осетинском регионе [Мионов и др., 2021] указывают на одно интересное обстоятельство. В то время как практически на протяжении всего транскавказского профиля наблюдений, а также в Осетинской впадине в горизонтальных компонентах фиксируется как сжатие, так и растяжение, то вблизи и вдоль ветвей Владикавказского разлома в горизонтальной плоскости растяжения не наблюдаются. Фрагмент результирующей карты приведен на рис. 3. Северный склон Большого Кавказа и предгорный прогиб, включающий Владикавказскую разломную зону, находятся в условиях сжатия с умеренной интенсивностью. В зоне Владикавказского разлома наблюдается сжатие и от восточного крыла к западному происходит изменение ориентации осей с север-северо-западного на север-северо-восточное. Севернее Владикавказского разлома отмечается сжатие-растяжение в направлении север-северо-восток.

Естественно ожидать, что в точках с отсутствием растяжений в горизонтальных осях будут более ярко проявляться вертикальные движения.

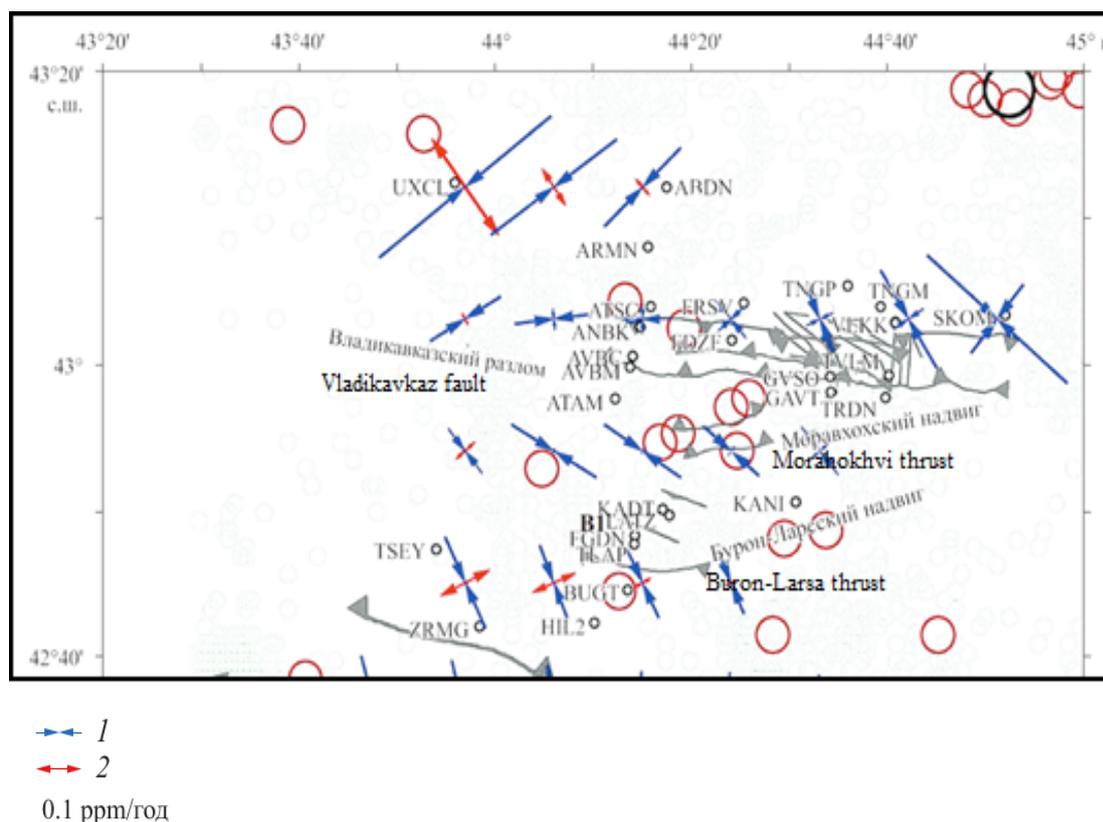


Рис. 3. Фрагмент результирующей карты современных скоростей смещений по [Миронов и др., 2021]. 1- оси сжатия, 2- оси растяжения /

Fig. 3. Fragment of the resulting map of modern displacement rates according to [Mironov et al., 2021]. 1 – compression axes, 2 – tension axes

Вертикальные скорости смещений ГНСС-станций относительно эллипсоида WGS84 были вычислены на международной земной отсчетной основе ITRF2014 по наблюдениям 2012–2022 гг. ARDN, ARD2, LATZ –станции с непрерывными измерениями. Координаты в системе WGS84. Результаты сведены в Таблицу 1.

Эти значения вертикальных скоростей смещений также представлены на сводном рис. 1 в виде цветных ромбов. Размер ромба отражает абсолютное значение скорости смещения, а цвет ромба соответствует направлению. Красный цвет обозначает поднятие, а синий – опускание.

Как видно из таблицы, ошибки измерений в отдельных точках довольно значительны (могут превышать само значение). Тем не менее, распределение значений вертикальных скоростей в плане по отношению к ветвям Владикавказского разлома статистически довольно устойчиво отражают следующую картину. Поднятие северного и южного бортов разлома в настоящее время происходит значительно быстрее, чем его центральной части, лежащей между соответствующими ветвями. Более того, в большинстве точек измерений, лежащих внутри ветвей, наблюдается не только замедление поднятия, но и напротив – опускание (см. рис. 1).

Таблица 1 / Table 1

Вертикальные скорости смещений/ Vertical displacement speeds

Код станции Code stations	Долгота, град Longitude, hail	Широта, град Latitude, hail	Высота, м Height, m	Вертикальная скорость, мм/год Vertical speed, mm/year	Погрешности определения, +/- мм/год Determination errors, +/- mm/year
ARDN	44.29099	43.19988	408.397	1.33	1.21
ARD2	44.28879	43.17636	432.804	-0.92	1.5
ARMN	44.25969	43.13208	491.527	2.53	1.47
ATSC	44.26352	43.06419	586.48	8.18	1.37
ANBK	44.24625	43.04089	629.598	-5.96	3.9
AVBC	44.23297	43.00764	684.025	-2.78	1.5
AVBM	44.22888	42.99575	706.028	2.95	1.38
ATAM	44.20406	42.95967	751.89	0.69	1.68
FRSV	44.42103	43.06797	580.558	8.52	1.23
FDZF	44.4013	43.02614	684.97	1.31	1.86
FDZ2	44.3916	43.00944	732.731	-2.82	2.94
FTGR	44.3698	42.96125	816.097	9.56	6.85
TNGP	44.59759	43.08795	610.069	0.15	1.49
TNGM	44.65286	43.06393	660.813	9.74	1.66
VLKK	44.67736	43.0464	696.98	2.26	0.63
TVLG	44.66586	43.013	723.479	-1.89	1.32
TVLM	44.66632	42.98592	793.203	-1.03	1.33
TRDN	44.66105	42.96074	803.755	6.98	1.18

На основе перечисленных структурных и тектонических особенностей района исследований, а также на основании разреза (рис. 2), содержащего данные по ранним работам ГСЗ, последним работам ММЗ и данным о сейсмичности, мы предлагаем следующую кинематическую схему тектонических движений (она изображена на врезке в верхней части рис. 2).

Под действием нормальной к простиранию Кавказа сжимающих напряжений происходит формирование всех перечисленных структурных элементов. На схеме рис. 2 сжимающие напряжения схематично изображены стрелками в диапазоне глубин 0-20 км. Одновременно с этим под северным флангом Кавказа происходит вертикальное восходящее движение из-за присутствия массивного низкоскоростного (возможно, разогретого) объема. Это движение показано вертикальной стрелкой в левой части врезки.

На наш взгляд, схема позволяет объяснить наличие в тектонической зоне северной моноклинали Кавказа серии падающих на север надвигов и взбросов, по которым юрские отложения надвинуты на меловые. Если рассматривать этот факт в совокупности с присутствием Сунженской антиклинали, а также тем фактом, что вся локальная сейсмичность преимущественно концентрируется в диапазоне глу-

бин 8-11 км, можно предположить, что все эти явления объединены единым процессом. А именно, при наличии коллизии складчато-глыбового горного сооружения Кавказа и Скифской плиты, верхний слой 8-11 км надвигается на Кавказ быстрее, проскальзывая по контакту 8-11 км, и создает листрику Владикавказского разлома, аналогично тому, как создаётся зона выпучивания оползневых тел. Сдвиг идет по поверхности фундамента, что объясняет сейсмичность, приуроченную к границе фундамент-осадки на глубине около 10 км. В районе Владикавказского разлома при столкновении с консолидированным приподнятым массивом Кавказа происходит процесс выпучивания осадочной толщи. Это приводит к вращательному движению в вертикальной плоскости, которое формирует чешуеобразный эшелон вдоль Кавказа. В свою очередь Сунженский хребет является промежуточной складкой этого процесса. Фронт коллизии между осадочной толщей и Кавказом образуется ввиду того, что Кавказ представлен более прочными приподнятыми породами (что обсуждалось в статье [Горбатиков др., 2015]).

Положение Сунженского хребта видимо связано с тем, что на глубине более 6 км расположен консолидированный гранитный массив к югу от Сунженского хребта. Этот массив в разрезе ММЗ виден как темно-синяя консолидированная область.

Аналогичный механизм, только в более сложных условиях можно предположить для объяснения отмеченного выше явления более быстрого поднятия бортов Владикавказского разлома по сравнению с его центральной частью. Что касается южной ветви, то это связано с отмеченным выше задирием осадочного чехла при столкновении с приподнятым глыбовым фронтом Большого Кавказа. Объяснить высокую скорость поднятия северного борта можно, если обратить внимание, что в пределах северной ветви разлома действуют две силы. Во-первых, формируется выдавливающая вверх локальная сила ввиду присутствия глубокой узкой зоны пониженных скоростей (возможно, также более пластичной, чем окружающие породы). Во-вторых, присутствует нормальное к простиранию Кавказа сжимающее напряжение, из-за которого вблизи поверхности может наблюдаться срыв и проскальзывание верхнего слоя, аналогично срыву всего осадочного чехла по границе 8-11 км (рис. 2.). Вследствие этих факторов в настоящее время, мы полагаем, формируется еще одна антиклиналь, активно эродируемая на поверхности, но проявляющаяся в локальной скорости вертикального поднятия. На рис. 2 она условно показана тонкой линией на глубинах 2-4 км над северной ветвью Владикавказского разлома.

ВЫВОДЫ

Применение ММЗ позволило выявить сложную форму поверхности «байкальского» фундамента и обнаружить тенденцию подъема этой поверхности в северо-западном направлении (Кабардино-Осетинский выступ) при приближении к Кабардинской впадине и Терско-Сунженской зоне.

Разрез ММЗ позволяет также выделить погружение в северном направлении относительно низкоскоростных терригенных нижне-среднеюрских отложений (слагающих нижнюю часть альпийского чехла) от полосы их выходов на поверхность в горной части профиля до глубин 6-10 км в предгорной части Терско-Каспийского прогиба. Этого не удавалось сделать ни традиционной сейсморазведкой МОВ из-за ее малой эффективности в горных условиях и ограниченной глубинности, ни глу-

бинной сейсморазведкой методом МОВЗ из-за трудности прослеживания наклонных границ.

Предложена кинематическая схема тектонических движений на основе работ по ММЗ, ГСЗ и данным о сейсмичности, которая позволяет объяснить наличие в тектонической зоне северной моноклинали Кавказа серии падающих на север надвигов и взбросов. При наличии коллизии складчато-глыбового горного сооружения Кавказа и Скифской плиты, верхний слой 8-11 км надвигается на Кавказ быстрее, проскальзывая по контакту 8-11 км, и создает листрику Владикавказского разлома. Сдвиг идет по поверхности фундамента, что объясняет сейсмичность, приуроченную к границе фундамент-осадки на глубине около 10 км. В районе Владикавказского разлома при столкновении с консолидированным приподнятым массивом Кавказа происходит процесс выпучивания осадочной толщи. Это формирует чешуеобразный эшелон вдоль Кавказа. В свою очередь Сунженский хребет является промежуточной складкой этого процесса.

Предложено объяснение более быстрого поднятия бортов Владикавказского разлома по сравнению с его центральной частью. Для южной ветви разлома это связано с задирием осадочной толщи при столкновении с приподнятым глыбовым фронтом Кавказа. Над северной ветвью разлома формируется независимый фронт поднятия.

Литература

1. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // *Физика Земли*. 2008. № 7. С. 66–84.
2. Горбатиков А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзобоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в осетинском секторе по комплексу геофизических данных // *Физика Земли*. 2015. № 1. С. 28–39. DOI: 10.7868/S000233371501007X
3. Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Изучение возможностей метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. 2011. № 4. С. 96–112.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Кавказская. Листы К-38-IX, XV (Владикавказ). Научный редактор Н. Л. Энна. Москва. Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ» 2021.
5. Карта активных разломов Евразии http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html
6. Коновалов В.И., Воцалевский З.С., Яловенко В.И. Перспективы нефтегазоносности юго-западной части Терско-Каспийского прогиба. // *Геология нефти и газа*. 1987, № 8. стр. 17-20
7. Н.В. Короновский, А.И. Гуцин. М. Ю. Никитин. Л.В Панина, А.Н. Стафеев
8. Геологическое развитие и становление современной структуры Терско-Каспийского передового прогиба. // *Тектоника орогенных сооружений Кавказа и Средней Азии*. –М.: Наука, 1990. с. 4-35 (222 с.)
9. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Шевченко В.И. Новая интерпретация данных ГСЗ по профилю Степное-Бакуриани на Кавказе. «Советская геология» 1970. № 8. С.113-120.
10. Летавин А.И., Романов Ю.А., Савельева Л.М., Шумова Т.Ф. Тектоника Восточного Предкавказья. Отв. редактор М.Ф. Мирчинк. М., «Наука», 1975г. 80 с.

11. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
12. Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М., Дробышев В.Н., Кусраев А.Г., Хубаев Х.М. Деформации земной коры в Осетинском регионе Большого Кавказа по данным ГНСС-измерений // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 4. С. 122–137. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.4-8>
13. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Рогожин Е.А. Зона Владикавказского активного разлома на территории РСО-А // Вестник Владикавказского НЦ РАН. 2008. Т. 8, №3. С. 44–56.
14. Овсяченко А.Н., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Ларин Н.В., Рогожин Е.А. Сейсмоструктура и глубинное строение зоны Владикавказского активного разлома. // Геофизические исследования. 2011. Том 12. № 1, с.47-59
15. Сим Л.А., Гордеев Н.А. Сравнение результатов изучения тектонических напряжений Кавказа разными методами // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы–2022. Материалы ЛПТ Тектонического совещания. Т. 2 / Отв. ред. К.Е. Дегтярев. – М.: ГЕОС, 2022. – С. 175–178
16. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. Редакторы В.И.Уломов, Н.С.Медведева ИФЗ РАН. <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf>
17. 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. No2. – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.00322
18. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмоструктура южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. Геология и геофизика Юга России. 2023. 13(1): 76-96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.
19. Цуканов А.А., Горбатиков А.В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений // Физика Земли. 2015. № 4. С. 94–102.
20. Электронный каталог землетрясений ЕГС РАН с 2003г. <http://eqru.gsras.ru/index.php?inc=main>
21. Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2017. № 6. С. 18–23. Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors // Bull. Earthq. Res. Inst. 1957. V. 35. С. 415–456.
22. Heidbach O., Rajabi M., Reiter K., Ziegler M., WSM Team, 2016. World Stress Map Database Release 2016. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/WSM.2016.001> <https://dataservices.gfz-potsdam.de/wsm/showshort.php?id=escidoc:1680899>

References

1. Gorbaticov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Andreeva N.V., Perederin F.V., Dzeboev B.A., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073.
2. Gorbaticov A.V., Tsukanov A.A. Simulation of the Rayleigh waves in the proximity of the scattering velocity heterogeneities. exploring the capabilities of the microseismic sounding method. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2011. Vol. 47. No. 4. pp. 354–369. DOI: 10.1134/S1069351311030013.
3. Enna N.L. (ed.) State geological map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. Caucasian series. Sheets K-38-IX, XV (Vladikavkaz). Moscow. VSEGEI. 2021.
4. Map of active faults in Eurasia http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html
5. Konovalov V.I., Votsalevsky Z.S., Yalovenko V.I. Prospects for oil and gas potential in the

southwestern part of the Terek-Caspian trough. *Geology of Oil and Gas*. 1987, No. 8. pp. 17–20. (In Russ.)

6. Koronovsky N.V., Gushchin A.I., Nikitin M.Yu., Panina L.V., Stafeev A.N. Geological development and formation of the modern structure of the Terek-Caspian foredeep. In: *Tectonics of orogenic structures of the Caucasus and Central Asia*. Moscow. Nauka, 1990. pp. 4–35. (In Russ.)

7. Krasnopevtseva G.V., Matushkin B.A., Shevchenko V.I. New interpretation of DSS data on the Stepnoe-Bakuriani profile in the Caucasus. *Soviet Geology*. 1970. No. 8. pp. 113–120. (In Russ.)

8. Letavin A.I., Romanov Yu.A., Savelyeva L.M., Shumova T.F. *Tectonics of Eastern Ciscaucasia*. Moscow. Nauka, 1975. 80 p. (In Russ.)

9. Milanovsky E.E. *Recent tectonics of the Caucasus*. Moscow. Nedra, 1968. 483 p. (In Russ.)

10. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblov G.M., Drobyshev V.N., Kusraev A.G., Khubaev Kh.M. Crustal deformations in the Ossetian region of the greater Caucasus based on GNSS-measurements. *Geophysical processes and biosphere*. 2021. Vol. 20, No. 4. pp. 122–137. DOI: 10.21455/GPB2021.4-8. (In Russ.)

11. Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Novikov S.S., Rogozhin E.A. Zone of the Vladikavkaz active fault on the territory of North Ossetia-Asia. *Vestnik of Vladikavkaz Scientific Center*. 2008. Vol. 8, No. 3. pp. 44–56. (In Russ.)

12. Ovsyuchenko A.N., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Larin N.V., Rogozhin E.A. Seismotectonics and deep structure of the Vladikavkaz active fault zone. *Geophysical Research*. 2011. Vol. 12. No. 1, pp. 47–59. (In Russ.)

13. Sim L.A., Gordeev N.A. Comparison of the results of studying tectonic stresses of the Caucasus by different methods. In: *Proc. of LIII Tectonic Meeting Tect. and geod. of the Earth's crust and mantle: fund. prob.* Moscow. GEOS, 2022. pp. 175–178 (In Russ.)

14. Ulomov V.I., Medvedeva N.S. (eds.) *Specialized catalog of earthquakes for problems of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation*. IPE RAS.

15. Tsukanov A.A., Gorbatikov A.V. Microseismic sounding method: implications of anomalous Poisson ratio and evaluation of nonlinear distortions. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. No. 4. pp. 548–558. DOI: 10.1134/S1069351315040126.

16. Earthquake Catalog of Geophysical Survey RAS since 2003. <http://eqru.gsras.ru/index.php?inc=main>

17. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. V.12(2). pp. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.00322

18. 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*. (in Russ.). 2023. 13(1): 76-96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.

19. Yanovskaya T.B. On the theory of the microseismic sounding method. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. Vol. 53. No. 6. pp. 819–824. DOI: 10.1134/S1069351317060076.

20. Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.* 1957. Vol. 35. pp. 415–456.

21. Gorbatikov A.V., Montesinos F.G., Arnosó J., Stepanova M.Yu., Benavent M., Tsukanov A.A. New features in the subsurface structure model of El Hierro Island (Canaries) from lowfrequency microseismic sounding. An insight into the 2011 seismo-volcanic crisis. *Surveys in Geophysic*. 2013. Vol. 34. No. 4. pp. 463–489.

22. Heidbach O., Rajabi M., Reiter K., Ziegler M., WSM Team, 2016. World Stress Map Database Release 2016. GFZ Data Services. DOI: 10.5880/WSM.2016.001 <https://dataservices.gfz-potsdam.de/wsm/showshort.php?id=escidoc:1680899>

УДК 504.054: 550.83.045

DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004

Оригинальная статья

Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики

И.А. Керимов^{1,2}, А.С. Эльжаев¹, А.А. Додуев¹

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г.Грозный, пр. им. Х.А. Исаева, 100;

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Россия, 123242, г.Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1,
e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Статья поступила: 16.06.2023, доработана: 27.08.2023, принята в печать: 05.09.2023

Резюме: Актуальность работы. В последнее время значительно возрос интерес исследователей всего мира к проблеме климатических изменений и сохранения окружающей среды. С недавнего времени в России реализуется проект по созданию карбоновых полигонов и карбоновых ферм. Чеченская республика вошла в число первых семи регионов, в которых созданы карбоновые полигоны для реализации мер контроля климатических активных газов. WAYCARBON – карбоновый полигон Чеченской республики, одним из операторов которого является Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ). Территория полигона (на которой проводят научные исследования специалисты ГГНТУ) имеет площадь 470 га и охватывает шесть эталонных участков, находящихся в различных природных зонах с уникальной экосистемой. Немаловажную роль в решении проблем геоэкологии играют геофизические исследования, получившие широкое применение в решении таких задач как изучение территорий захоронения различных твердых отходов и других загрязненных (в том числе нефтепродуктами) территорий, негативно влияющих на состояние окружающей среды. Данная статья посвящена геофизическим исследованиям, проведенным на эталонном участке «Карбоновая ферма», а также на экспериментальном нефтезагрязненном участке. Представлены результаты исследований. **Цель работы.** Проведение геофизических исследований на участках Карбонового полигона Чеченской Республики для изучения техногенных факторов и воздействия их на окружающую среду. **Методы исследования.** На «Карбоновой ферме» проведена сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ) в виде отдельных сейсмозондирований по сетке профилей, каждый из которых отработан 3-4 расстановками (по 94 м) сейсмоприемников. Экспериментальный нефтезагрязненный участок был изучен электротомографией (ЭТ) и методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). **Результаты исследования.** В процессе исследований получен качественный материал, позволивший построить сейсмические разрезы, карту мощности техногенного грунта, карты-срезы распределения удельных электрических сопротивлений, геоэлектрические разрезы.

Ключевые слова: геофизические исследования, экология, карбоновый полигон, сейсморазведка, продольные и поперечные волны, электротомография.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № FZNU-2021-0012 «Комплексная интерпретация геофизических и геоэкологических данных для изучения баланса парниковых газов».

Для цитирования: Керимов И.А., Эльжаев А.С., Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 49-62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004.

DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004

Original paper

Geophysical research on the carbon polygon of the Chechen Republic

I.A. Kerimov^{1,2}, A.S. Elzhaev¹, A.A. Doduev¹

¹Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, 100 Ave. H.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation;

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation, e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Received: 16.06.2023, revised: 27.08.2023, accepted: 05.09.2023

Abstract: Relevance. The global scientific community has recently shown a heightened interest in climate change and environmental conservation. In response to this, a project has been launched in Russia to establish carbon polygons and carbon farms. The Chechen Republic was among the first seven regions to create carbon polygons for the management of climate-active gases. The Grozny State Oil Technical University (GSOTU), named after academician M.D. Millionshchikov operates one such carbon polygon, known as WAYCARBON. The polygon spans 470 hectares and encompasses six reference sites located in various natural zones with unique ecosystems. An important role in solving the problems of geoecology is played by geophysical research, which is widely used in solving such problems as studying the territories of burial of various solid wastes and other contaminated (including oil) territories that negatively affect the state of the environment. This article is devoted to geophysical studies carried out at the reference area “Carbon Farm”, as well as at the experimental oil-contaminated area. The research results are presented. **Aim.** Carrying out geophysical methods in the areas of the carbon polygon of the Chechen Republic to study man-made factors and their impact on the environment. **Methods.** At the carbon farm, seismic exploration by the method of refracted waves (RW) was carried out in the form of separate seismic soundings along a grid of profiles, each of which was worked out by 3-4 arrangements (94 m each) of seismic receivers. The experimental oil-contaminated area was studied by electrotomography (ET) and vertical electrical sounding (VES). **Results.** In the process of research, high-quality material was obtained, which made it possible to build seismic sections, a map of the thickness of technogenic soil, maps-sections of the distribution of electrical resistivity distribution and geoelectric sections.

Keywords: geophysical research, ecology, carbonic polygon, seismic prospecting, longitudinal and transverse waves, electrotomography.

Acknowledgments: *The work was performed within the state task No FZNU-2021-0012 «Complex interpretation of geophysical and geoecological data for studying the balance of greenhouse gases».*

For citation: Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Geophysical research on the carbon polygon on the Chechen Republic. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(3): 49-62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004.

Введение

Как известно, карбоновые полигоны – это один или более участков с уникальной экосистемой, используемых для проведения актуальных научных исследований в сфере экологии. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ), как один из операторов Карбонового полигона Чеченской республики, имеет шесть эталонных [Керимов и др., 2021] и один экспериментальный нефтезагрязненный участок с разными типами ландшафтов и растительности общей площадью 472,4 га:

- «Ханкала (Кампус)» – 18 га;
- «Карбоновая ферма» – 23 га;
- «Старопромысловский» – 41 га;
- «Толстой-Юрт» – 94 га;
- «Рошни-Чу» – 243 га;
- «Галанчож» – 51 га;
- «Поселок Кирова» (нефтезагрязненный участок) – 2,4 га.

Проблемы экологии (геоэкологии) достаточно давно изучаются геофизикой, объектом исследования которой является Земля с ее оболочками. В инженерной геофизике, как в одном из направлений прикладной геофизики, изучаются проблемы эндогенных (внутренних) и экзогенных (внешних), медленных и катастрофических природных геодинамических процессов (сейсмичность, выветривание, оползни, обвалы и т.п.), антропогенно-техногенных проявлений, (взрывов, аварий, техногенного загрязнения и т.д.), загрязнения геологической среды вещественного (химического), например отходами промышленного, городского и сельского хозяйства, или энергетического (физического), например за счет роста интенсивности акустических (шумовых), электромагнитных, тепловых, ядерных полей, влияющих на здоровье людей [Богословский и др., 2000].

Отличительной особенностью геофизических методов является возможность быстрого и детального изучения физических полей геологической среды в условиях сильных техногенных нагрузок.

Методы, основанные на изучении физических полей, обеспечивают наибольшую пространственную и временную плотность наблюдений, что является существенным положительным моментом при изучении антропогенной нагрузки на геологическую среду. Основными задачами геофизических методов являются: 1) районирование территорий по признаку чувствительности горных пород к различным видам загрязнения; 2) нахождение очагов загрязнения и определение границ распространения этого загрязнения; 3) получение количественных показателей, характеризующих степень воздействия загрязнителя на геологическую среду; оценка тенденций развития загрязнения с течением времени; 5) прогноз воздействия антропогенной деятельности на конкретные экосистемы [Огильви, 1990].

В последнее время геофизические методы нашли широкое применение в решении таких экологических (геоэкологических) задач как изучение территорий захоронения различных твердых отходов, хвостохранилищ промышленных предприятий и других загрязненных территорий, негативно влияющих на состояние окружающей среды. По мнению ряда авторов [Заалишвили и др., 2018; Попов, Попова, 2021] экологические задачи оценки геологической среды в районах повышенной экологической опасности решаются с помощью сейсмического мониторинга.

В рамках проекта Карбонового полигона Чеченской Республики сотрудниками лаборатории геофизических исследований НИИ геоэкологии и природопользования ГГНТУ проведены исследования на эталонном участке «Карбоновая ферма» и экспериментальном участке, загрязненном нефтепродуктами.

Методика исследования

1. Сейсмические исследования на «Карбоновой ферме». В административном отношении участок исследования расположен на северо-восточной окраине г. Грозного на территории бывшей городской свалки, рекультивированной путем засыпки отходов грунтом и высадки деревьев.

Задача исследования – уточнение границы подошвы техногенного грунта с целью последующего определения его толщины.

Для решения поставленной задачи проведена сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ). Выбор метода обусловлен несколькими причинами, основными из которых являются: во-первых, низкие информативность и разрешающая способность на данном участке наиболее распространенного в инженерной геофизике метода электроразведки – разрез характеризовался как высокоомный, с нелогичными значениями УЭС, что, скорее всего, связано с наличием среди отходов металлических включений; во-вторых, эффективность МПВ при решении задач выделения неглубоких границ и определения скорости волн в отдельных слоях [Романов и др., 2018].

Для оценки основных структурно-геологических особенностей, показателей свойств, состояния и состава нескальных грунтов используются, в основном, скорости продольных и поперечных сейсмических волн.

Сейсморазведка выполнялась в виде отдельных сейсмозондирований по системе профилей. Для корректного построения карт сеть профилей выбиралась максимально равномерной и плотной [Романов, 2015].

Отработка каждого профиля включала от трех до четырех расстановок сейсмоприёмников по 94 метра каждая. Регистрация волн производилась с использованием 48-канальной линейной сеймостанции ЛАККОЛИТ-48М4. Шаг сейсмоприёмников составлял 2 метра, а общая длина годографа – 94 м, что позволило изучить разрез до глубины 20 м. Всего выполнялось по 11 физических наблюдений (ФН) на пикетах пунктов возбуждения (ПВ). Последовательно выполнялась регистрация (табл. 1) продольных и поперечных волн. Возбуждение сейсмических волн осуществлялось ударами кувалды массой 8 кг по металлической пластине, установленной на грунт. Поперечные волны возбуждались разнонаправленными ударами по системе +YY и –YY.

Система наблюдений – встречные и нагоняющие годографы. Полевые исследования выполнены в соответствии с техническими требованиями к производству геофизических работ [РСН 66-87. Технические требования, 1987]. Схема сейсмических профилей исследуемого участка показана на рисунке 2. Система профилей равномерно покрывает территорию с шагом 85–90 м.

Таблица 1. / Table 1.

**Параметры регистрации /
Registration parameters**

Параметры регистрации / Registration Settings	
частота дискретизации / sampling frequency	2000
длина записи, сек. / record length, sec.	2,56
ФНЧ, Гц / Low pass filter, Hz	выключен / switched off
ФВЧ, Гц / High-pass filter, Hz	$\frac{3}{4} N \text{ min}$
режекторный фильтр, Гц / Notch filter, Hz	выключен / switched off
усиление, дБ / gain, dB	12
формат записи / recording format	IEEE – SEG D

Камеральная обработка сейсморазведочных данных заключалась в следующем: построение годографов волн; определение скоростей волн в слоях и мощностей слоев; расчет и построение сейсмических разрезов.

Обработка данных производилась на ПЭВМ с использованием программы «ZOND» в следующей последовательности: составление паспортов профилей; редакция сейсмограмм; корреляция первых вступлений и фаз продольных и поперечных волн; обработка и редакция наблюдаемых годографов, составление систем сводных встречных и нагоняющих годографов; определение скоростных законов и вычисление граничных скоростей и построение преломляющих границ способом пластовых скоростей; обработка и редакция преломляющих границ, составление окончательных глубинных разрезов.

Распознавание и прослеживание сейсмических волн проводилось по комплексу динамических и кинематических характеристик, среди которых наибольшее значение имеет повторяемость формы записи на соседних трассах и плавное изменение интенсивности записи от трассы к трассе.

Результаты сейсмических исследований

В процессе полевой обработки данных получены сейсмограммы, по которым проводилась корреляция первых вступлений и фаз продольных и поперечных волн и построены сейсмические разрезы указанных волн [Керимов и др., 2022] для каждого профиля, представленные на рисунке 1.

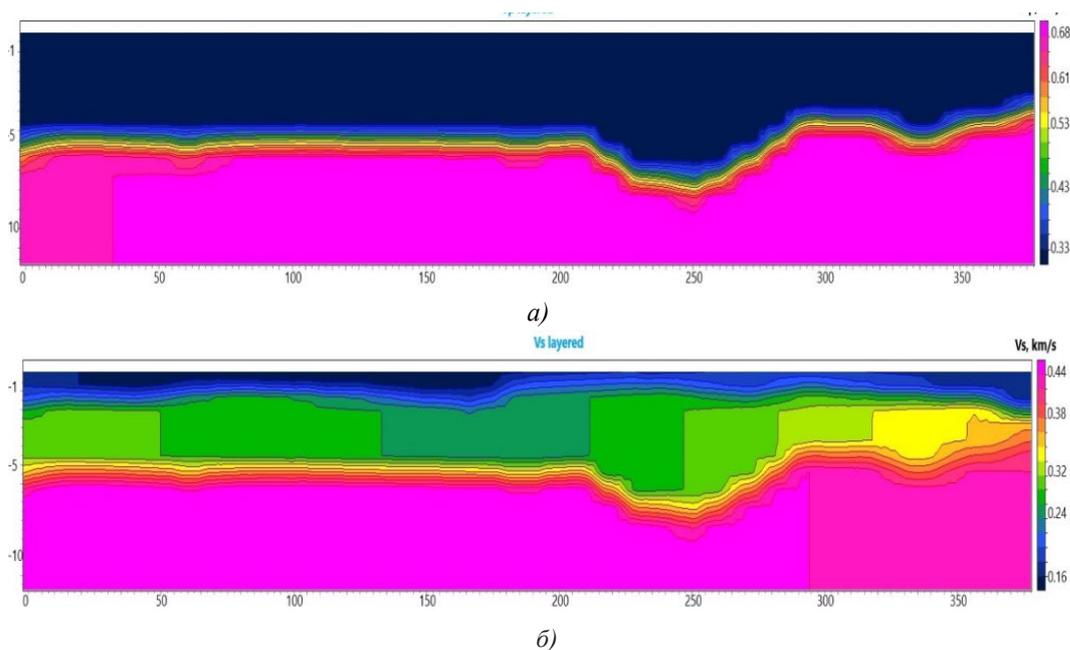


Рис. 1. Пример сейсмических разрезов продольных (а) и поперечных (б) скоростей профиля 1 /
Fig. 1. An example of seismic sections of longitudinal (a) and transverse (b) profile velocities 1

На полученных разрезах отчетливо отражаются подошва насыпного и кровля нетронутого грунта. Эта граница однозначно выделяется по дифференциации скоростей. Границы выделяются как по продольным V_p , так и по поперечным V_s скоростям, идентичны и наблюдаются на одной глубине. Это, в свою очередь, свидетельствует о том, что грунтовые воды расположены на глубинах ниже исследованных.

На разрезе, построенном по данным поперечных скоростей, выделяется также насыпной слой, которым была проведена герметизация отходов.

Построена карта мощности насыпного грунта (рис. 2).

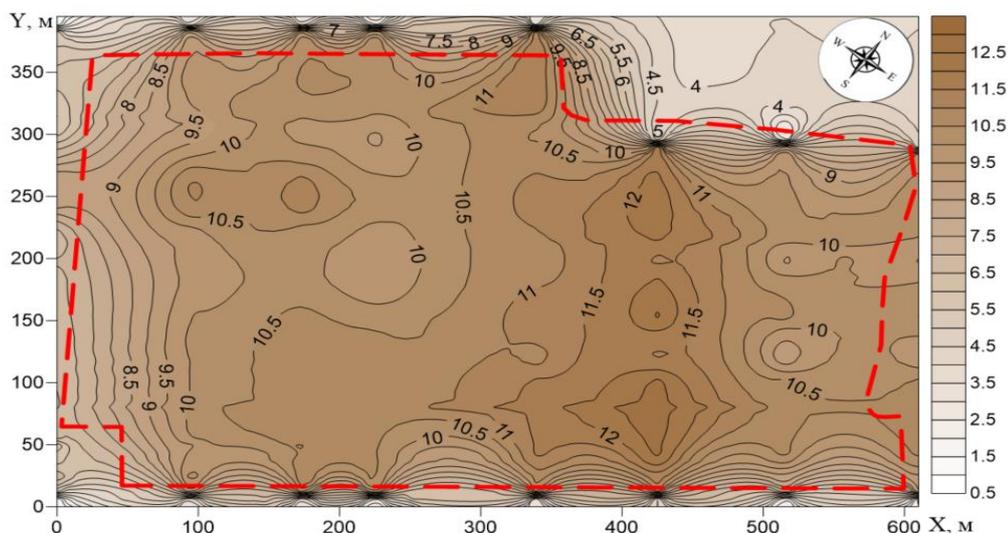


Рис. 2. Карта мощности насыпного грунта /

Fig. 2. Bulk soil power map

Выводы по результатам сейсмических исследований

Анализ результатов сейсмических исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Граница, разделяющая ненарушенный и техногенный грунты, уверенно выделяется на всех разрезах за счет различия в скоростях. Для техногенного грунта характерны скорости продольных волн от 240 до 330 м/с в поле поперечных волн от 110 до 240 м/с.
2. Наиболее уверенно и детально особенности залегания грунтов выделяются на разрезах поперечных скоростей.
3. По соотношению величины скоростей до глубины 11-12 метров разрез представляется неоднородным.
4. Сравнение полученных значений скоростей техногенной природы с литературными источниками и опытом ранее выполненных работ свидетельствует об уплотнении слоя отходов за последнее время, практически до состояния естественного грунта.

2. Электротомографические исследования на нефтезагрязненном участке.

Наибольшее распространение среди методов инженерной геофизики получила электроразведка и ее модификации. Так, в работе [Пыстин и др., 2022] приводятся результаты электротомографии, которые позволили с высокой степенью достоверности выявить загрязнения окружающей среды нефтепродуктами и определить их площадное распространение.

Опыт применения электротомографии для оценки объемов веществ хвостохранилищ горнодобывающих предприятий описан в [Карин и др., 2021]. Возможность применения геофизики, в том числе и электрических исследований, при изучении почв рассмотрены в работах зарубежных коллег [Rabotetal., 2018; Romero-Ruizetal., 2018; Wangetal., 2016; Doolittle, Brevik, 2014; Binley, Kemna, 2005; Youngetal., 1998].

Исследуемый участок административно расположен в Шейх-Мансуровском районе г. Грозный на территориях бывших нефтеперерабатывающего завода имени Анисимова, Грозненского химического завода имени 50-летия СССР и нефтепере-

рабатывающего завода имени Шерипова. В настоящее время участок представляет собой экологически опасный объект, состоящий из пяти площадок (рис. 3) – накопителей отходов (хвостохранилищ) производства указанных предприятий.

Визуальный осмотр участка показал, что территория вокруг хвостохранилищ, включая их борты, заросли кустарниковой и злаково-разнотравной растительностью, содержащиеся в чашах хвостохранилищ нефтеотходы ранее подвергались отжигу, о чем свидетельствует тот факт, что на поверхности каждой зоны сформировалась плотная корка, представленная продуктами горения нефтеотходов и минерального грунта, черного и коричневого цвета с характерным запахом гари. Толщина корки до 5–7 см, под ней обнаруживаются слои до 25–50 см серого цвета нефтеотходов, маслянистой консистенции, смешанных с грунтом, ниже находится вода. Поверхность шламонакопителей неустойчива, при движении по поверхности происходит колебание грунта [Маркарова и др., 2022].

С целью выявления возможного наличия утечек загрязнения из хвостохранилищ в окружающую среду на одной из площадок нефтезагрязненного участка были проведены электрические исследования – электротомография (ЭТ) и измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) с использованием зонда ВЭЗ 4-х-электродной мини-установки Виннера. Ставились задачи: 1. Анализ распределения УЭС в чаше хвостохранилища; 2. Оценка фильтрационных свойств бортов (дамб) хвостохранилища.

Исследования проводились с использованием измерителя электромагнитных полей МЭРИ-24, электроразведочного генератора Астра-100, коммутирующего модуля для электротомографии CommDD2 и соответствующего программного обеспечения.

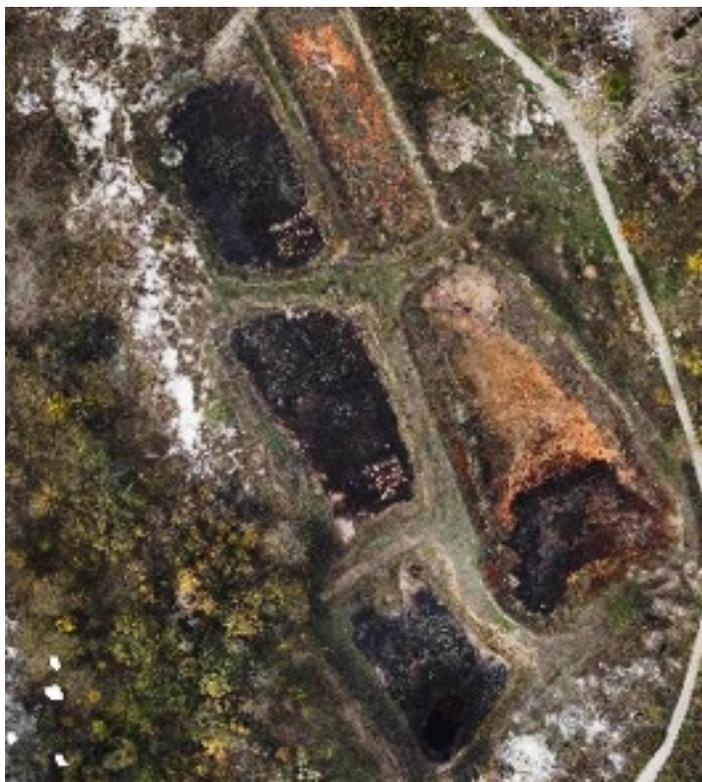


Рис. 3. Ортофотоплан участка исследований по данным аэрофотограмметрической съемки /

Fig. 3. Orthophoto map of the study area according to aerial photogrammetric survey data

На исследуемом участке с целью подбора оптимальной установки для электротомографии выполнено ВЭЗ на переменном токе частотой 4,88 Гц. Величина разносов АВ/2 принималась равной – 1,5, 2, 3, 4, 6, 9,11, 15, 20,30, 40.В качестве источника тока использован генератор Астра с рабочей частотой 4,88 Гц, с режимом автоматической стабилизации выходного тока и внутренним калибровочным устройством. Заземление производилось латунными электродами на глубину 20–25 и 50 см. Величина токовой утечки определялась на максимальном разносе АВ/2.

Вычисление кажущегося электрического сопротивления ρ_k производилось по формуле:

$$\rho_k = \kappa \frac{\Delta U}{I}, \quad (1)$$

где $\kappa = 2\pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$ – коэффициент установки; ΔU – напряжение на измерительных электродах; I – ток, протекающий по цепи АВ.

Вычисление УЭС и построение графиков ρ_k в логарифмическом масштабе 6,25 выполнялось в процессе измерений. Ошибка измерений по результатам контрольных измерений составила не более 4,4% (при допустимой $m=5\%$).

Для проведения на данном участке электротомографии была собрана электро-разведочная мини-установка, состоящая из двух питающих и двух измерительных электродов.

Для анализа распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) в чаше хвостохранилища и оценки фильтрационных свойств бортов шламоохранилища на предмет наличия возможных утечек была проведена электротомография (ЭТ) и измерения УЭС с использованием зонда ВЭЗ 4-хэлектродной мини-установки Виннера с шагом электродов 0,1 м. Диапазон полученных значений УЭС (на глубинах 25 и 65 см. от дневной поверхности) составил $0.5 \div 2$ Омм, что нетипично для естественных и характерно для техногенных грунтовых условий, особенно с фактором химического загрязнения верхней части грунтовой толщи.

Схема профилей и точек измерения представлены на рисунке 4.

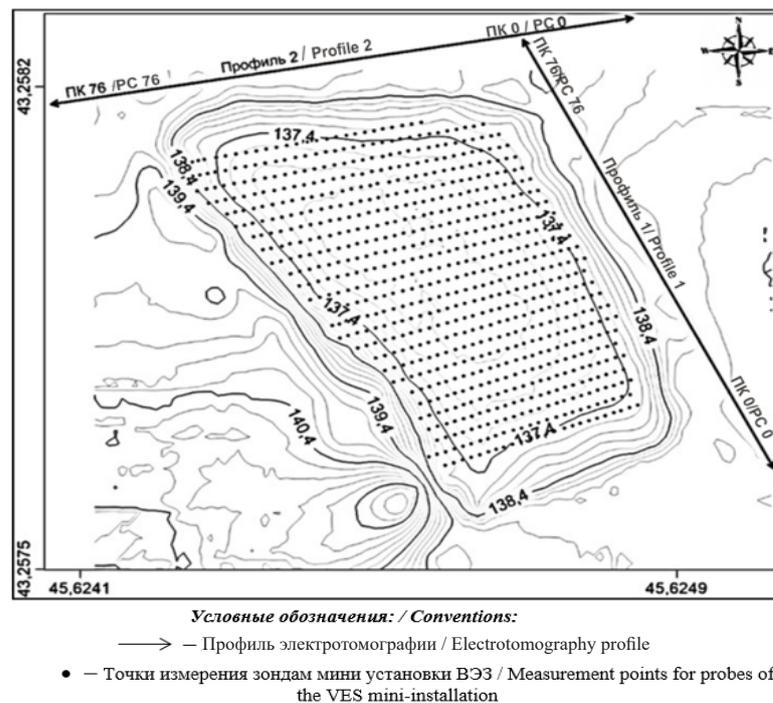


Рис. 4. Схема профилей ЭТ и точек измерений зондом мини-установки ВЭЗ /
Fig. 4. Scheme of ET profiles and points of measurement by the probe of the VES mini-installation

Результаты электрических измерений

Структурный анализ распределения УЭС на построенных картах-срезах выявил линейно вытянутую аномалию с ЮЗЗ на СВВ в середине чаши исследуемого хвостохранилища (порядка 1 Ом на обоих уровнях глубин), которая более контрастно выражена на глубине 65 см. от дневной поверхности (рис. 5). Более высокие (относительно полученного диапазона, порядка 1,2–1,6 Ом) УЭС приурочены к подповерхностной части, а на глубине 65 см. локализуются в районе линейно вытянутой аномалии.

Наблюдаемая аномалия, вероятно, приурочена к внутренней перегородке хвостохранилища, делящей чашу на две практически равные части, и выполненной, скорее всего, из глинистого материала. Ширина аномалии в натуре – порядка 2 метров, что вполне соответствует габаритам предполагаемого конструктива.

В северной части чаши также фиксируется локально ограниченная аномалия (1 Ом и менее), природу которой возможно установить только лишь после зондировочного бурения и отбора проб на химический анализ.

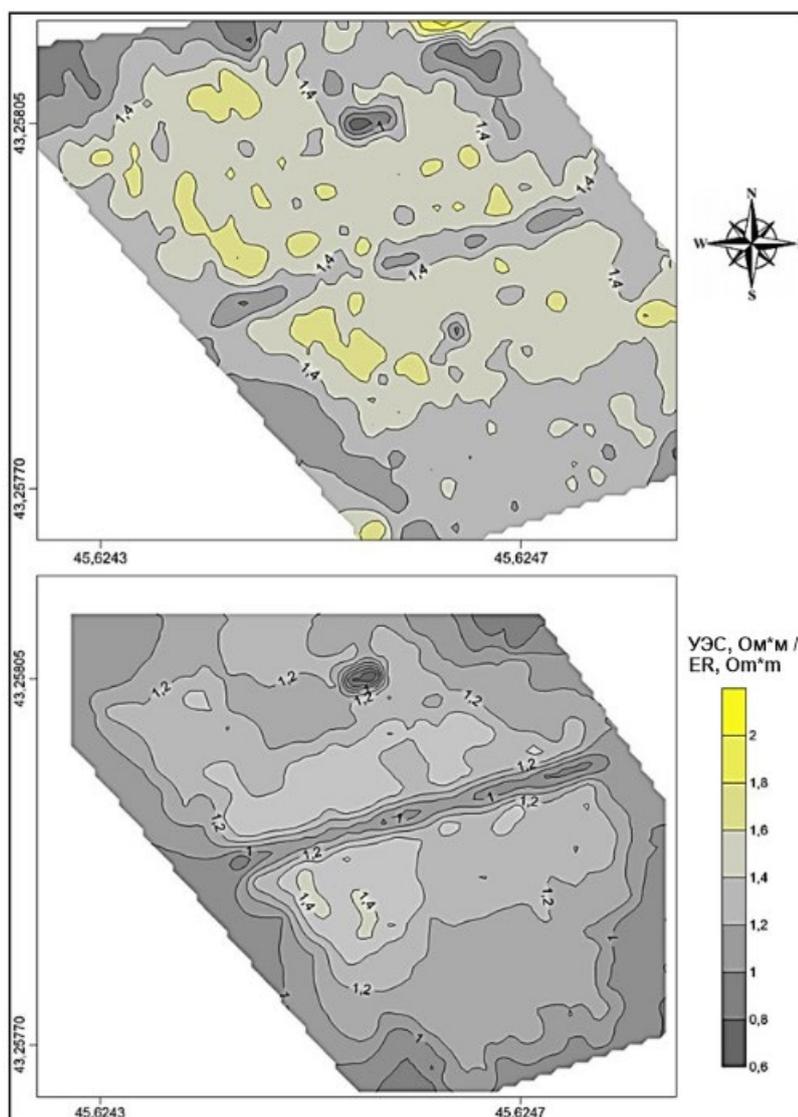


Рис. 5. Карты-срезы распределения УЭС на глубинах 25 и 65 см /
Fig. 5. Maps-slices of resistivity distribution at depth of 25 and 65 cm

В результате инверсии полевых данных метода электротомографии получены геоэлектрические разрезы (рис. 6, рис. 7). На профилях по гребням восточного и северного бортов (дамб), ограждающих чашу хвостохранилища, разрезы структурно практически идентичны друг другу. Первый от дневной поверхности слой геоэлектрического разреза восточной дамбы (рис. 6) имеет мощность порядка 0,7–1,0 м и УЭС в диапазоне 60–250 Омм, второй слой характеризуется диапазоном УЭС от 10–35 Омм и мощностью около 1,7–2,0 м, УЭС третьего слоя – в диапазоне 25–110 Омм. Глубина исследования на восточной дамбе порядка 4 м и на северной дамбе порядка 4.5 м от дневной поверхности.

Следует отметить, что УЭС второго (10–35 Омм) и третьего (45–110 Омм) слоёв на ЭТ-разрезе по северной дамбе (рис. 7) в среднем в 1.7 раза меньше значений УЭС тех же слоёв (10–20 Омм и 25–75 Омм соответственно) на ЭТ-разрезе восточной дамбы.

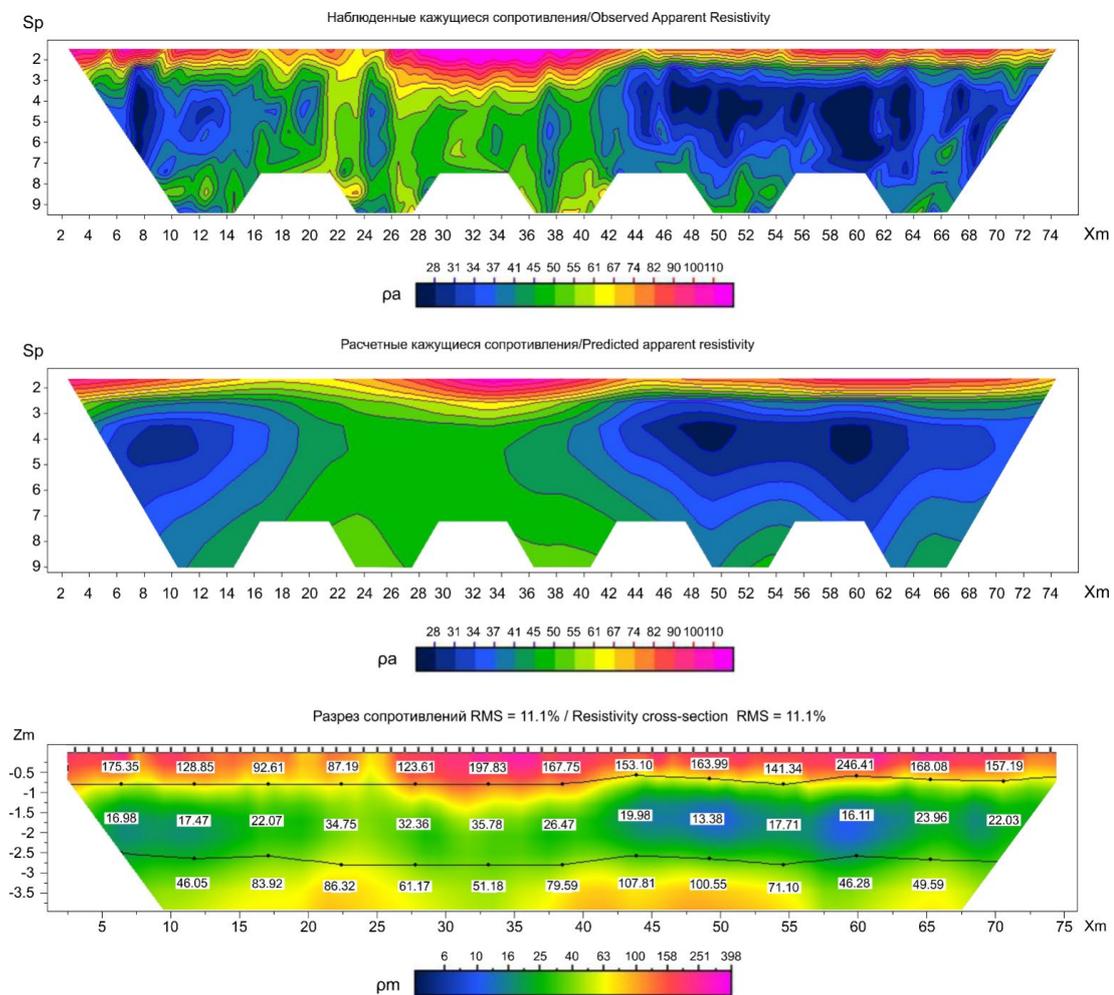


Рис. 6. Геоэлектрический разрез восточной дамбы /

Fig. 6. Goelectricsection of the eastern dam

Таким образом, первый геоэлектрический слой, вероятно, исполнен маловлажными насыщенными грунтами суглинистого происхождения. Второй геоэлектрический слой сложен или влажными грунтами суглинистого типа, или глинистыми грунтами. Третий слой, предположительно, представлен грунтами суглинистого типа, но естественной влажности.

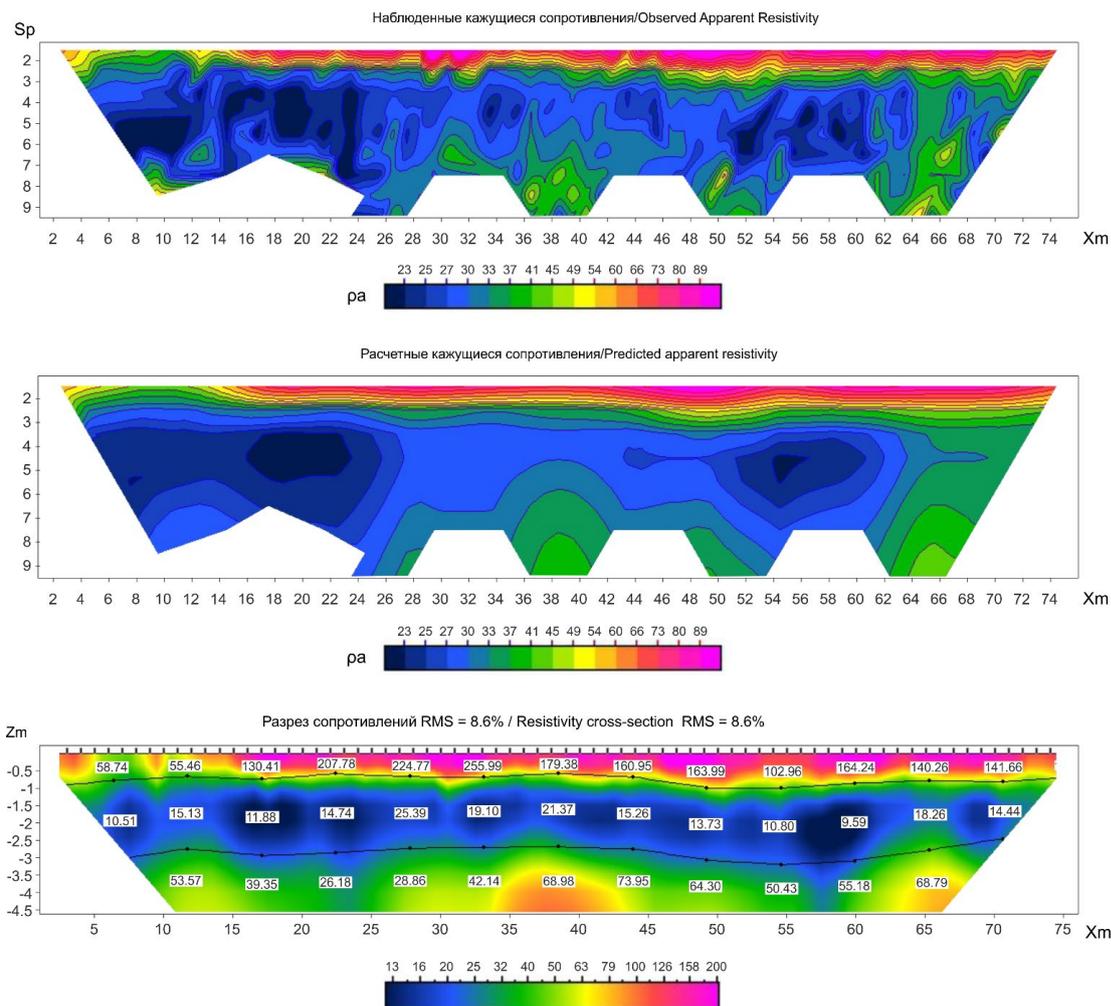


Рис. 7. Геоэлектрический разрез северной дамбы /
 Fig. 7. Geoelectricsection of then orthern dam

В результате визуального обследования физического состояния бортов и чаши изучаемого хвостохранилища зафиксированы просадки грунта в чаше хранилища и на внутренних бортах ограждающих дамб – вдоль ПК 44-65 восточного ЭТ-профиля и вдоль ПК 23-57 северного ЭТ-профиля. С учётом низких значений УЭС второго слоя на обоих ЭТ-разрезах на этих пикетах можно предположить, что водоупорный экран в телах ограждающих дамб нарушен и идёт миграция флюидов из чаши за пределы хранилища.

Выводы по результатам электротомографических измерений

1. В результате проведения электротомографии на исследуемом участке зарегистрированы значения УЭС, характерные для загрязненных отходами нефтехимического производства;
2. На построенных картах-срезах отчетливо наблюдаются две аномалии – большая (линейно вытянутая), пересекающая хранилище отходов нефтехимического производства по середине, и маленькая (локально ограниченная) – в северной части участка. Первая аномалия с большой долей вероятности указывает на наличие под техногенным грунтом глинистой перегородки;

3. С внутренней стороны бортов хранилища обнаружены просадки грунта, что указывает (по результатам анализа геоэлектрических разрезов) на нарушение водопорного экрана, вследствие чего вероятно распространение загрязнения за пределы шламохранилища.

Литература

1. Бекузарова С.А., Бурдзиева О.Г., Качмазов Д.Г., Майсурадзе М.В. Экологические проблемы на территориях с горнодобывающей промышленностью и активная рекультивация токсических почв. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2018. – №4. – С. 7–17. DOI:10.23671/VNC.2018.4.20130
2. Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмелевской В.К. Экологическая геофизика. // Учебное пособие. – М.: МГУ. – 2000. – 254 с.
3. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. // *Геология и геофизика*. – 1997. – Т. 38. №4. – С. 804–815.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Макиев В.Д. Макросейсмическое проявление сейсмических событий, обусловленное влиянием грунтовых условий и формирование карт сейсмического микрорайонирования. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2018. – №1. – С. 48–55. DOI: 10.23671/VNC.2018.1.11247
5. Карин Ю.Г., Юркевич Н.В. Подход к обработке данных электротомографии для оценки объемов веществ хвостохранилищ. // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2021. – Т. 2. №2. – С. 62–66.
6. Керимов И.А., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. – 2021. – Т. 6. №3(25). – С. 35–47.
7. Керимов И.А., Махмудова Л.Ш., Мячина К.В., Придача В.Б., Эльжаев А.С., Бадаев С.В., Батукаев А.А., Додуев А.А., Дускаев М.З., Мамадиев Н.А. Карбоновый полигон Чеченской Республики: II. Методы исследования и первые результаты. // *Грозненский естественно-научный бюллетень*. – 2022. – Т. 7. №4(30). – С. 62–78.
8. Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Керимов И.А., Эльжаев А.С., Мамадиев Н.А. Анализ парниковых газов на нефтезагрязненных территориях и разработка методов их биорекультивации (на примере г. Грозный). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. №4. – С.153–168. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.77.012
9. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. – М.: Недра. –1990. – 501 с.
10. Попов М.Г., Попова О.Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности. // *Геология и Геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 152–164. DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011
11. Пыстин В.Н., Тупицына О.В., Букин А.А., Чертес К.Л. Геофизические изыскания и критерии применимости биологических методов при рекультивации нефтезагрязненных территорий. // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – М.: Изд. дом «Губкин». – 2022. – №3(306). – С. 12–19.
12. Романов В.В. Инженерная сейсморазведка. – М.: ЕАГЕ Геомодель, 2015. – 278 с.
13. Романов В.В., Иванов А.А., Кауркин М.Д. Инженерная сейсморазведка при изучении полигонов ТБО. // *Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии*. – М.: РУДН. –2018. – С. 142-146.
14. РСН 66-87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка. – М.: МосЦТИСИЗ, 1987. – 54 с.
15. Binley A., Kemna A. DC resistivity and induced polarization methods. In Y. Rubin & S.S. Hubbard (Eds.), *Hydrogeophysics*. – Dordrecht, Netherlands: Springer, 2005. – pp. 129-156.
16. Doolittle J.A., Brevik, E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. // *Geoderma*. – 2014. – Vol. 223. – pp. 33-45. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.01.027.

17. Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, – 2018 –pp.122-137.
18. Romero-Ruiz A., Linde N., Keller Th., Or D. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. // *Reviews of Geophysics*. – 2018. – Vol. 56. – pp. 672-696.
19. Young, I. M., Blanchart, E., Chenu, C., Dangerfield, M., Fragoso, C., Grimaldi, M., Ingram, J., Monrozier, L. J. The interaction of soil biota and soil structure under global change. *Global Change Biology* – 1998 – 4(7), pp. 703-712.
20. Wang, P., Hu, Z., Zhao, Y., Li, X. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals. *Journal of Applied Geophysics*, 126 – 2016 – pp. 128-137.

References

1. Bekuzarova S.A., Burdzieva O.G., Kachmazov D.G., Maisuradze M.V. Ecological problems in areas with mining industry and active remediation of toxic soils. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2018. No. 4. pp. 7-17.
2. Bogoslovsky V.A., Zhigalin A.D., Khmelevskoy V.K. Ecological geophysics. Tutorial. Moscow: Moscow State University. 2000. 254 p.
1. Geek L. D. Physical modeling of seismic wave propagation in porous and fractured media. *Geology and Geophysics*. 1997. No.4. Vol. 38. pp. 804-815. (In Russ.)
2. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Makiev V.D. Macroseismic manifestation of seismic events due to the influence of soil conditions and the formation of maps of seismic microzoning. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2018. No. 1. pp. 48-55.
3. Karin Yu.G., Yurkevich N.V. An approach to the processing of electrical tomography data for estimating the volumes of substances in tailings. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021. V. 2. No. 2. pp. 62-66.
4. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure.
5. Kerimov I.A., Makhmudova L.Sh., Myachina K.V., Pridacha V.B., Elzhaev A.S., Badaev S.V., Batukaev A.A., Doduev A.A., Duskaev M.Z., Mamadiev N.A. Carbon polygon of the Chechen Republic: II. Research methods and first results. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2022. V. 7. No. 4 (30). pp. 62-78.
6. Markarova M.Yu., Makhmudova L.Sh., Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Mamadiev N.A. Analysis of greenhouse gases in oil-contaminated areas and development of methods for their bioremediation (on the example of the city of Grozny). *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2022. 12(4). pp.153-168.
7. Ogilvi A.A. Fundamentals of engineering geophysics. M.: «Nedra». 1990. 501 p.
8. Popov M.G., Popova O.G. The possibility of a comprehensive study of the geological environment during seismo-ecological monitoring in areas of increased environmental hazard. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. No. 2. pp. 152-166.
9. Pystin V.N., Tupitsina O.V., Bukin A.A., Chertes K.L. Geophysical surveys and criteria for the applicability of biological methods in the reclamation of oil-contaminated territories. *Protection of the environment in the oil and gas complex*. M.: Ed. House “Gubkin” 2022. No. 3 (306). pp. 12-19.
10. Romanov V.V., Ivanov A.A., Kaurkin M.D. Engineering seismic exploration in the study of MSW landfills. Materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Publishing house of the Peoples’ Friendship University of Russia. 2018. pp. 142-146.
11. Romanov V.V. Engineering seismic. Publishing house of EAGE GeomodelLLC. 2015. 278 p.
12. RSN 66-87. Engineering surveys for construction. Technical requirements for the production of geophysical works. Seismic exploration. «Moscow Central Trust for Engineering and Construction Surveys». 1987. 54 p.

13. Binley A., Kemna A. DC resistivity and induced polarization methods. In Y. Rubin & S.S. Hubbard (Eds.), *Hydrogeophysics*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2005. pp. 129-156.
14. Doolittle J.A., Brevik, E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*. 2014. Vol. 223. pp. 33-45. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.01.027.
15. Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 2018. pp.122-137.
16. Romero-Ruiz A., Linde N., Keller Th., Or D. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56. pp. 672-696.
17. Young, I. M., Blanchart, E., Chenu, C., Dangerfield, M., Fragoso, C., Grimaldi, M., Ingram, J., Monrozier, L. J. The interaction of soil biota and soil structure under global change. *Global Change Biology* 1998 4(7). pp. 703-712.
18. Wang, P., Hu, Z., Zhao, Y., Li, X. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals. *Journal of Applied Geophysics*, 2016. pp. 128-137.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.348

DOI: 10.46698/VNC.2023.99.42.005

Original paper

Tectonics of source zones of strong earthquakes in the southeastern part of the Greater Caucasus

T.Ya. Mammadli , **R.B. Muradov** 

Republican Seismic Survey Center, Azerbaijan National Academy of Sciences, Azerbaijan,
AZ1001, Baku, 25, Nigar Rafibeyli str., e-mail: m-tahir@mail.ru

Received: 16.06.2023, revised: 29.08.2023, accepted: 07.09.2023

Abstract: Relevance of the work: One of the main tasks of modern seismology is to determine the focal zones of strong earthquakes and their maximum magnitudes in these zones. This is necessary to assess the seismic hazard of territories. **Purpose of the study:** To study the features of the distribution of earthquake sources on the territory of Azerbaijan. **Research results:** It has been established that the sources of strong earthquakes are confined to zones of concentration of weak seismic tremors, inherent in active faults, characterized by contrasting tectonic movements. This shows that by identifying zones of concentration of sources of weak seismic shocks, it is possible to determine the focal zones of strong earthquakes. **Research methods:** Using the relationship between the length (L) of focal zones and the observed magnitudes (M) of earthquakes. The obtained result allows us to determine the maximum magnitude in the areas of potential sources of strong earthquakes.

Keywords: earthquakes, seismotectonics, tectonics of source zones, active faults, longitudinal and transverse structures, concentration of seismic shocks, potential source zones.

For citation: Mammadli T.Ya., R.B. Muradov. Tectonics of source zones of strong earthquakes in the southeastern part of the Greater Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 63-72. DOI: 10.46698/VNC.2023.99.42.005.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2023.99.42.005

Оригинальная статья

Тектоника очаговых зон сильных землетрясений юго-восточной части Большого Кавказа

Е.Я. Маммадли , **Р.Б. Мурадов** 

Республиканский Центр Сейсмологической Службы при Национальная академия наук
Азербайджана, Азербайджан, Az 1001, г. Баку, ул. Н.Рафибейли 25,
e-mail: m-tahir@mail.ru

Статья поступила: 16.06.2023, доработана: 29.08.2023, принята к публикации: 07.09.2023

Резюме: Актуальность работы: Одной из основных задач современной сейсмологии является определение очаговых зон сильных землетрясений и их максимальных магнитуд в этих зонах. Это необходимо для оценки сейсмической опасности территорий. **Цель исследования:** Изучить особенности распределе-

ния очагов землетрясений на территории Азербайджана. **Результаты исследования:** Установлено, что очаги сильных землетрясений приурочены к зонам концентрации слабых сейсмических толчков, присущим активным разломам, характеризующимся контрастностью тектонических движений. Это показывает, что путем выявления зон концентрации источников слабых сейсмических толчков можно определить очаговые зоны сильных землетрясений. **Методы исследования:** Использование связи между длиной (L) очаговых зон и наблюдаемыми магнитудами (M) землетрясений. Полученный результат позволяет определить максимальную магнитуду в зонах потенциальных очагов сильных землетрясений.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмостектоника, тектоника очаговых зон, активные разломы, продольные и поперечные структуры, концентрация сейсмических толчков, потенциальные очаговые зоны.

Для цитирования: Маммадли Т.Я., Мурадов Р.Б. Тектоника очаговых зон сильных землетрясений юго-восточной части Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 63-72. DOI: 10.46698/VNC.2023.99.42.005.

Introduction

Studies of the distribution of strong and destructive earthquakes in the world show that they are confined to deep fault zones [7, 10, 11, 22, 24, 2]. This allowed specialists to consider all large faults as zones of sources of strong earthquakes. Based on this, in 1950, I.E.Gubin proposed a seismotectonic method [11] for identifying earthquake source zones, according to which a narrow quasi-homogeneous seismic zone with a certain length is distinguished along each geological fault, and it is believed that these faults are active throughout their entire length. This method also assumes that at each point of a given fault, earthquakes with a magnitude (M) equal to the magnitude of the maximum observed (M_{\max}) earthquake here can occur.

Thus, according to the seismotectonic method, all existing tectonic faults are active and seismostatistical data can be extrapolated along their entire length.

However, this method does not always justify itself. First, without any reason, he assumes that the faults are active along their entire length. Secondly, in fault zones where strong earthquakes have not been observed or are not available, the possibility of such earthquakes in the future is excluded.

Geological faults of Azerbaijan and seismicity of the territory

It is known that a geological fault means a discontinuity of rocks, without displacement (crack) or with displacement of rocks along the fracture surface. Earthquakes are the result of the rapid sliding of rocks along a fault line in zones of contrasting tectonic movement which is characteristic of active faults.

Studies show that faults are not always active along their entire length and earthquakes may not occur at all fault points [16,17, 18]. This can also be observed on the fault structures of the territory of Azerbaijan.

A number of zones of geological faults have been identified on the territory of Azerbaijan by various geological and geophysical methods [8 ,9]. These fault zones are clearly distinguished on the map of the deep structure of the Black Sea-South-Caspian region of regional subsidence, compiled under the editorship of K.M.Kerimov and A.Sh. Shikhalibeyli [19]. Figure 1 shows the Azerbaijani part of this map. It can be seen from the map that a number of longitudinal (all-Caucasian direction) and transverse (anti-Caucasian direction) faults are distinguished on the territory of the republic.

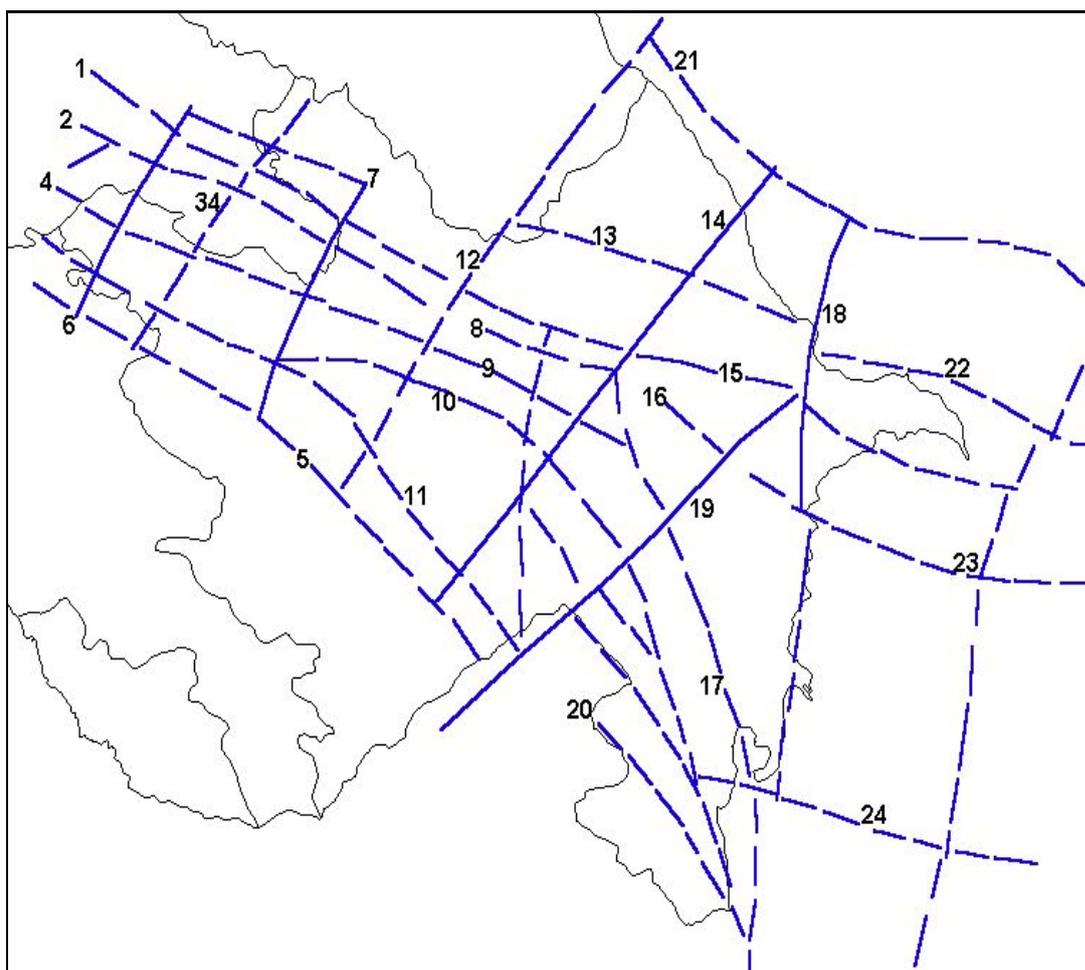


Fig. 1. Deep faults in the territory of Azerbaijan
 (from the map "Deep structure of the Black Sea-South-Caspian region of regional subsidence"
 M.1:1000000/Editor-in-chief K.M.Kerimov, E.Sh.Shikhalibeyli, Baku, 1992)

Symbols:

- 1 – Vandam; 2 – Gagro-Dzhavsky; 3-4 – Tovuz-Aliabad; 5 – Front Lesser Caucasus; 6 – Gazakh-Signakh; 7 – Gandja-Alazan; 8 – North Adjinour; 9 – Geokchay; 10 – Mingachevir-Saatli; 11 – Kura;
 12 – Arpa-Samur; 13 – Imishli-Gabala; 13 – Siyazan; 14 – Gyzylbogaz-Divichi (Shabran);
 15 – Germian; 16 – Adzhichay-Alyat; 17 – West Caspian; 18 – Yashmin;
 19 – Lower-Araz (Palmyr-Absheron); 20 – Talysh; 21 – Central Caspian;
 22 – Absheron-Near Balkhan; 23 – Sangachal-Ogurchi; 24 – Mil

The seismotectonic method [11] assumes that these faults are active along their entire length and each point in them can become a source of seismic shocks.

On Figure 2 a map of the epicenters of strong earthquakes (with $M \geq 5.0$) in the territory of Azerbaijan for the period 427-2020 is given. This map shows that the number of such earthquakes in the republic is not so high; here strong earthquakes occurred rarely and not everywhere (or are not known everywhere). Therefore, data on strong earthquakes are not sufficient to judge the seismicity of individual areas, especially the activity of faults.

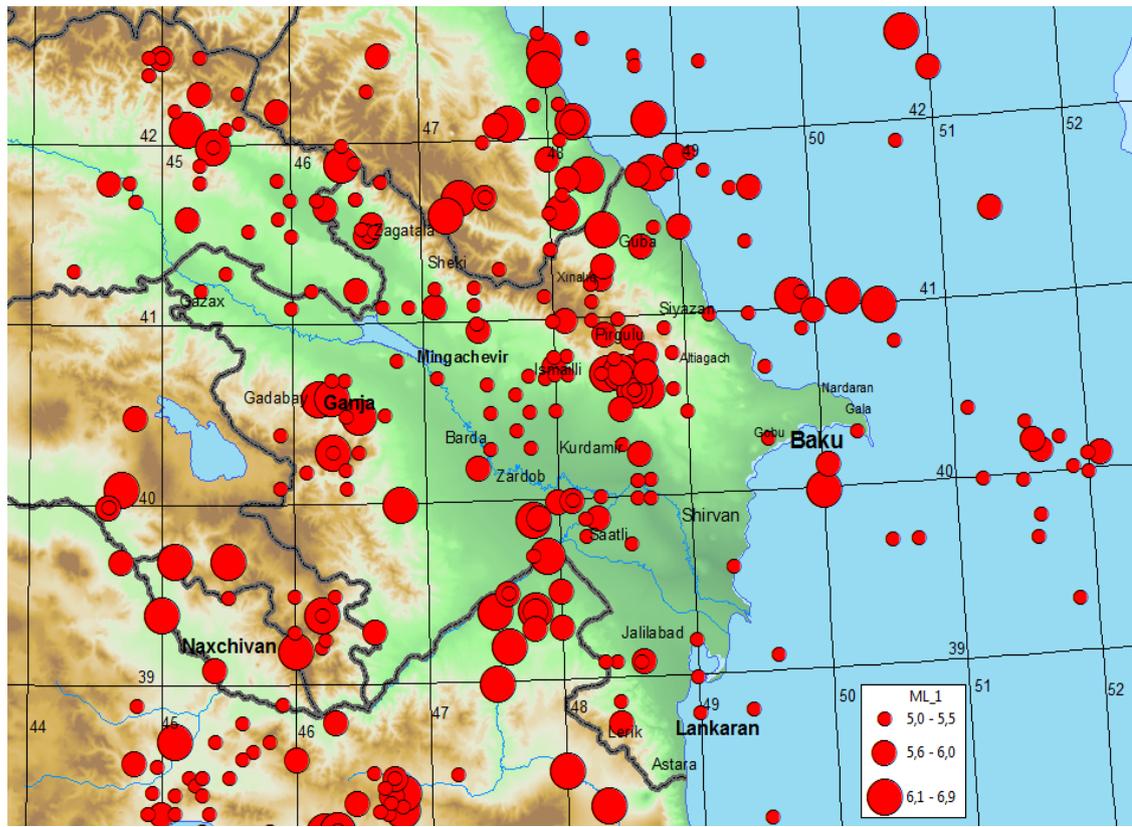


Fig. 2. Map of epicenters of earthquakes with $M \geq 5.0$ on the territory of Azerbaijan for the period 1947-2020

Figure 3 shows a map of the epicenters of earthquakes with $M \geq 3.0$ on the territory of Azerbaijan for the period 1980-2020. The map shows that the earthquake sources are distributed extremely unevenly. They are mainly concentrated on the southern slope of the Greater Caucasus (from the Balakan region in the northwest of the republic to the Gobustan region in its southeast). It can also be seen on the map that uneven distribution is also observed within the most highly active regions. Condensation of earthquake epicenters in some places and their small number or even absence in others is noted. An increased accumulation of epicenters is observed in the area between the cities of Balakan and Zagatala, in the Oghuz district, to the east of the Gabala meridian, in the districts of Ismayilli and Shamakhi. To the east of the meridian 49°E , including on the Apsheron Peninsula, there are single epicenters of seismic shocks or are completely absent. Areas of increased seismicity also extend to the north and south. Within the Kura Depression, the southern continuation of the areas with an increased level of seismicity is clearly traced. However, a less dense accumulation of earthquake epicenters is observed here.

The above mentioned is another evidence that tectonic faults cannot be considered active along their entire length and, accordingly, strong earthquakes may not occur at all of their points.

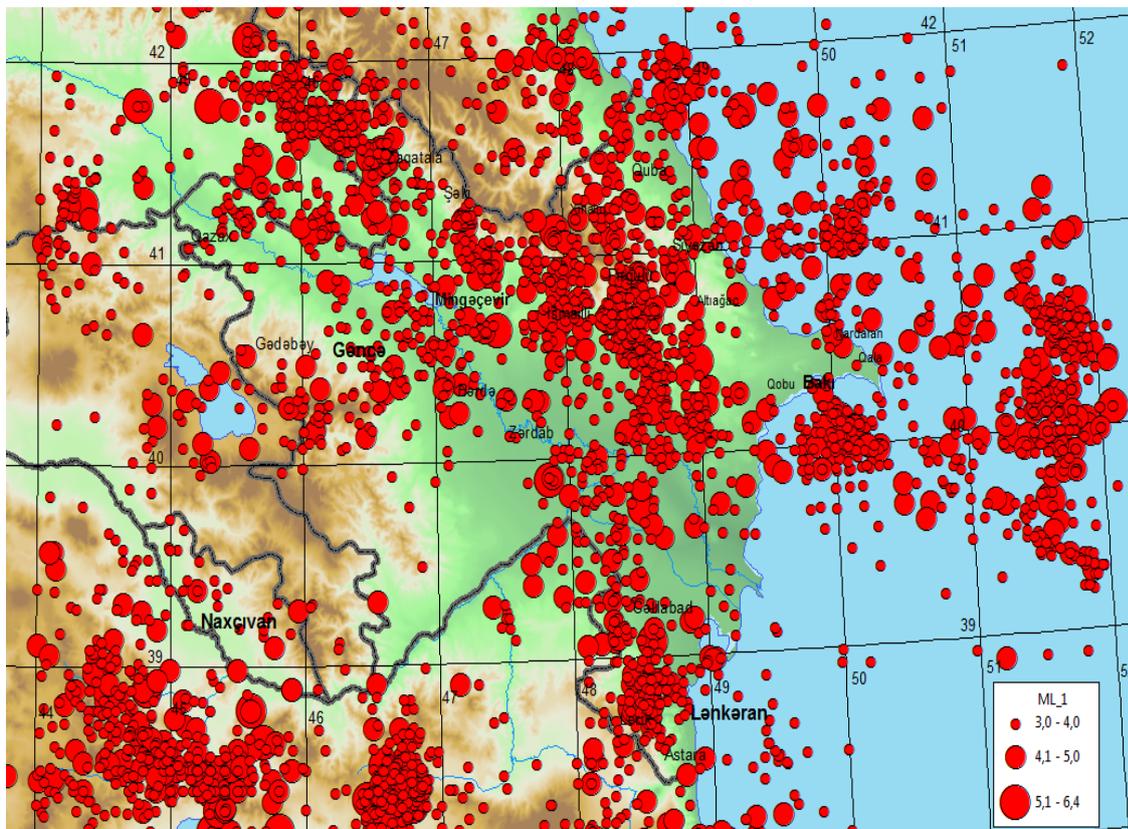


Fig. 3. Map of epicenters of earthquakes with $M \geq 3.0$ on the territory of Azerbaijan for the period 1980-2000

According to the currently widely used probabilistic seismic hazard assessment method, similarly to the seismotectonic method, each fault identified by geological and geophysical methods is considered active along its entire length without any reason, and each of its points is taken as a potential source zone. This method estimates the probability of occurrence of an earthquake and possible excess (usually 10%, 5%, 1%) of various magnitudes of earthquakes in the source zone within 50 years [3, 6, 15].

Source zones of strong earthquakes and their tectonic substantiation

T.Ya.Mammadli developed another method for determining seismogenic (active) zones of deep faults by weak seismicity, which allows more accurate determination of the spatial positions of real source zones of strong earthquakes [18]. This method is based on the concept of seismogenic structures, which are active faults that delimit tectonic structures with different tectonic development regimes and accumulate all strong and the bulk of weak and medium earthquakes. According to this technique, a lot of source (seismogenic) zones with different lengths and directions were identified in the study area (Fig. 4).

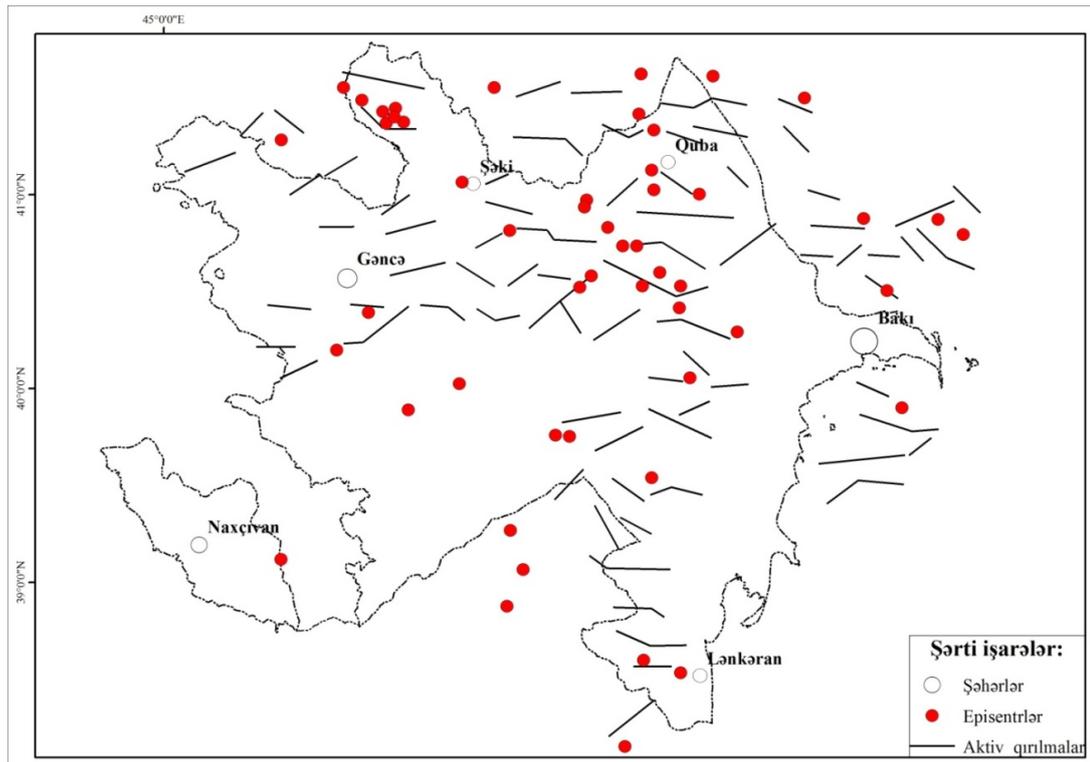


Fig. 4. Map-scheme of source (seismogenic) zones of the territory of Azerbaijan

The analysis showed that these source (seismogenic) zones correspond to individual segments of longitudinal (all-Caucasian direction) and transverse (anti-Caucasian direction) faults, previously identified by geological and geophysical methods [1, 4, 5].

The sizes of seismogenic lines indicate that active segments of faults in the territory of Azerbaijan are of small extent (up to 70 km).

Note that the seismogenic lines and epicenters of strong earthquakes that occurred here ($M > 5.0$) have a high spatial coincidence (see Fig. 4.), which indicates the high accuracy of the method. The explanation for such a high spatial coincidence provides the results of the tectonic analysis of the region. It is known that an indispensable condition for the occurrence of strong earthquakes is contrasting tectonic movements, which are characteristic of fault zones that separate areas with different, and sometimes sharply changing, directions of tectonic movements. And the areas within the geological structures are characterized by a common tectonic regime (without contrasting movements) and, therefore, there are no conditions for the occurrence of strong earthquakes.

An analysis of the relationship between the structural plans of the longitudinal and transverse zones in the area of the junction of the southern slope of the Greater Caucasus with the Alazan-Agrichay imposed trough showed that here the tendency for the development of tectonic movements in the Quaternary is characterized by the growth of subsidence areas to the north (Reisner 1982). In areas where the longitudinal structural zones of the southern slope experience the greatest transverse deflection, the areas of subsidence penetrated the limits of the mountain-fold system most far. And in the areas of transverse uplifts, which manifest themselves within the longitudinal zones, the front of this process is delayed. Thus, certain segments of deep faults in the Quaternary time remain inside the areas of subsidence or uplift. No longer being the boundaries of structures (zones of contrasting movements) with different directions of tectonic movements, these

parts of the faults do not show seismic activity. On the other hand, segments of deep faults separating zones with different directions of tectonic movements remain zones of contrasting movements and are characterized by high seismic activity.

Comparison of seismogenic (active) zones of the South-Eastern Caucasus (territory of Azerbaijan), identified by weak seismicity (see Fig. 3) with structural plans of longitudinal tectonic zones (see Fig. 1) shows that they correspond to segments of deep faults separating the zones with different directions of tectonic movements. Thus, the observed seismogenic (active) zones between the cities of Balakan and Zagatala, in the area of the city of Oghuz, between the cities of Gabala and Ismayilli, as well as between the village of Basghal and the city of Shamakhi, are connected by active segments of the Vandam fault, separating different parts of the anticlinorium of the same name from the Alazan-Agrichay trough.

A number of researchers [1,14,23] identified on the territory of the Greater Caucasus relatively elevated and lowered transverse structures. These transverse structures are separated by a chain of mud volcanoes and disturbing the linearity of the longitudinal structures by areas of folding flexural subsidence. An analysis of the distribution of sources of weak earthquakes shows that in some places of these areas, delimiting the transverse structures, there is a concentration of weak seismic shocks, which can be associated with differentiated vertical movements and can be identified as seismogenic zones of the anti-Caucasian direction. Thus, the seismogenic zone traced in the anti-Caucasian direction, in the area south of the city of Zagatala, is identified with the active segment of the Gazakh-Signakh transverse fault, which separates the Sheki uplifted transverse block, located east of Zagatala, and the western Balakan subsided block. The seismogenic zone, passing several kilometers east of the city of Sheki, can be identified as the active part of the Gandja – Alazan anti-Caucasian fault, separating the Sheki uplifted and Oghuz lowered transverse blocks. The seismogenic zone identified in the area east of the city of Gabala can be identified as the active parts of the Arpa-Samur transverse fault, which separates the Oghuz block from the Gabala – Ismayilli uplifted transverse block. To the east of the latter, there are not extended seismogenic zones, which can be identified by the active parts of the West Caspian transverse fault, separating the Gabala – Ismayilli uplifted transverse block and the lowered Baskal-Mayash block.

When approaching the West Caspian transverse fault, the hinge of the Vandam anticlinorium plunges sharply, to the east of it the southern Gandob uplift is completely covered by the Paleogene of the Shamakhi-Gobustan synclinorium. The northern Nialdagh uplift, affected by a transverse fault, east of Girdymanchay, retains the characteristic features of the structures of the southern slope. Deep faults of the all-Caucasian direction to the east of meridian 49° are buried under the Paleogene deposits of the Shamakhi-Gobustan synclinorium and do not show activity. In this regard, single epicenters of seismic shocks are observed here or are completely absent.

An analysis of the data on the extent of seismogenic (source) zones (L) and the observed magnitudes of earthquakes in them allowed T.Ya.Mammadli to make the following equation [18]:

$$\lg Lkm = 0.366M - 0.883 \quad (1)$$

The relationship between the length of the source (L) and the magnitude of earthquakes (M) was also identified by other researchers [10, 25, 27, 28]. However, the lengths of source zones were determined by them from macroseismic and aftershock data of strong

earthquakes. Identified by T.Ya.Mammadli formula, when comparing these ratios, gives dependences of the source length L on the magnitude M that are quite close to real values [18].

Analysis of the obtained results

An analysis of the size (extension) of source zones in the territory of Azerbaijan shows that they have a small extent (mainly up to 50 km). Large destructive Gandja (427, 1139), Shamakhi (1559, 1872, 1902) earthquakes with $M \sim 7.0$ repeatedly occurred in these sources in the past. According to formula (1), the extent of the Shamakhi earthquake of 1902 ($M=6.9$) can be estimated at 43-45 km.

However, in the Shamakhi-Ismayilli region, a seismogenic (source) zone is distinguished, the length of which reaches up to 70 km. According to formula (1), the maximum magnitude of the expected earthquake is $M \sim 7.4$.

A.A.Nikonov [5, 21], having collected data from numerous historical manuscripts in an attempt to determine the magnitude and macroseismic area of earthquakes that occurred in the vicinity of the city of Shamakhi in 1667–69, came to the conclusion that in 1668 an earthquake with a force of 10 points occurred, the magnitude of which was $M=8$. In his opinion, the earthquake source was at a great depth ($H=50-60$ km), so the earthquake covered a very large area – the length of the 10-point zone was 80 km, the length of the 9-point zone was 270 km. Our calculations show that an earthquake with $M > 7.5$ cannot occur in this zone. However, if we take into account that on the southern slope of the Greater Caucasus the depths of strong earthquakes do not exceed $H=10-15$ km [12] and, using the equations of the macroseismic field of N.V.Shebalin [26], we can confidently assume that in 1668 in Shamakhi a catastrophic 11-point (according to the MSK-64 scale) earthquake occurred in the area. The high macroseismic effect covered a fairly large area. The length of the 11-point zone was 100-120 km, the length of the 10-point zone was about 150 km, and the 9-point zone occupied even more area. According to historical data, this earthquake with its subsequent aftershocks led to great destruction, claimed 80,000 human lives [21]. The analysis shows that such an earthquake with a magnitude of $M \sim 7.5$, a depth of $H=10-15$ km, and covering a wide area of high macroseismic effect (the length of high-point zones is 150-200 km) could lead to such numerous victims. It should be noted that an earthquake of approximately the same magnitude ($M=7.7$) occurred on February 06, 2023 in Turkey. The earthquake was one of the biggest disasters to hit the region in recent times. Tens of thousands (more than 50,000) of people died and were injured, there were changes in the relief. Thus, the length of the seismogenic (source) zone, the results of the analysis of numerous historical data and their comparison with macroseismic manifestations of a recent earthquake of approximately the same magnitude ($M=7.7$) allow us to confirm the existence of a potential large source in the Shamakhi-Ismayilli region.

Conclusions

1. In the South-Eastern Caucasus (territory of Azerbaijan), active deep faults of the all-Caucasian and anti-Caucasian directions are distinguished. Faults of the all-Caucasian direction correspond to zones separating longitudinal structures with different directions of tectonic movements. Faults of the anti-Caucasian direction are connected by differentiated vertical movements of relatively uplifted and lowered transverse structures.

2. The size (length) of most active faults (sources) in the territory of Azerbaijan is small (from 20 to 50 km) and they can generate strong earthquakes with a magnitude of $M \sim 6.0 \div 7.0$. These earthquakes due to their small depths on the Earth's surface appear up to 7-9 points on the MSK-64 scale.

3. In the Shamakhi-Ismayilli region, a source zone has been identified, the length of which reaches 70 km. The maximum magnitude of the expected earthquake in this source is $M \sim 7.4$. The macroseismic effect of such earthquakes can reach 11 points on the MSK-64 scale.

References

1. Agamirzoev R.A., Grigoryants B.V., Koop M.L., Kurdin N.N. Transverse faults of the Southeastern Caucasus and their expression on satellite images. Universities ed. Geology and exploration, 1976. No. 11. pp. 42-53.
2. Ahmedbeyli F.S. Neotectonics and some aspects of late orogenic geodynamics of Azerbaijan. Baku. Nafta-Press, 2004. 270 p.
3. Bazzurro P., Cornell C.A. Disaggregation of Seismic Hazard. Bull. Seism. Soc. Am. 1999. Vol. 89. No. 2. pp. 501–520.
4. Borisov A.A., Shenkareva G.A. Seismological and geophysical characteristics of the Caucasus and the west of Central Asia. Bull. MOIP. dep. Geol. 1972. Vol. 47. No. 6. pp. 5-16.
5. Borisov B.A. Strong earthquakes in the Eastern Caucasus: interpretation of historical data and analysis of the geological situation. Physics of the Earth. 1982. No. 9. pp. 107–122.
6. Danciu L., Şeşetyan K., Demircioglu M., Gulen L., Zare M., Basili R., Elias A., Adamia Sh., Tsereteli N., Yalcın H., Utkucu M., Khan M.A., Sayab M., Hessami Kh., Rovida A.N., Stucchi M., Burg J.-P., Karakhanian A., Babayan H., Avanesyan Mh., Mammadli T., Al-Qaryouti M., Kalafat D., Varazanashvili O., Erdik M., Giardini D. The 2014 earthquake model of the Middle East: Seismogenic sources. Bull. Earthquake Engineer. 2018. Vol. 16. No. 8. pp. 3465–3496
7. Gamburtsev G.A. Status and prospects of work in the field of earthquake prediction. Bulletin Seismology Council. 1955 No. 1. pp. 7–14.
8. Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Izvekova M.L., Keilis-Borok V.I. On the criteria for high seismicity. Report Academy of Sciences of the USSR. 1972. Vol. 202. No. 6. pp. 1317–1320.
9. Gorshkov A.I. Recognition of places of strong earthquakes in the Alpine-Himalayan belt. Moscow. Science, 2010. 472 p. (Series Computational seismology 2010. Issue 40.
10. Gubin I.E. Geology and earthquakes. – In the book: Seismotectonics of the southern regions of the USSR. Ed. I.E. Gubina, Moscow: Science, 1978. pp. 5–26.
11. Gubin I.E. Seismotectonic method of seismic zoning. Moscow. Science, 1950. pp. 1–53. (Tr. SI AS USSR. 1950. Vol. 140. Issue 13)
12. Hasanov A.G., Mammadli T.Ya. On the features of the manifestation of seismicity in Azerbaijan and the assessment of seismic risk in large cities. ISSN 1609-0586 Bulletin of the Baku University. Series “Natural Sciences”, Baku University Publishing House No. 1. Baku, 2005. p. 121-127
13. Khain V.E., Shardanov A.N. Geological history and structure of the Kura depression. Baku. AS Azerb.SSR, 1952. 346 p.
14. Kirillova I.V. On the transverse differentiation of modern tectonic movements in the zone of the southern slope of the Eastern Caucasus. Bull. MOIP, dep. Geol. 1961. No. 1. pp. 24-39.
15. Mammadli T.Y., Rogozhin E.A. On tectonic character of the connection zones of the Earth's crust in the South Caspian basin and Scythian–Turanian plate based on seismological data. Seismic Instruments. 2017. Vol. 53. No. 2. pp. 124–133.
16. Mammadli T.Ya. A new technique for identifying source zones of strong earthquakes and determining their maximum magnitudes (M_{max}) from weak seismicity (on the example of the territory of Azerbaijan) – Proceedings of the XVII Russian conference with international participation September 20-24, 2011, Voronezh-Moscow-M.: IFZ, 2011. pp. 337-341.

17. Mammadli T.Ya. Determination of Seismogenic Zones for Analysis of Seismotectonic Activity of Deep Faults: Seismic Hazard Assessment for the Territory of Azerbaijan. ISSN 0016-8521 *Geotectonics*. 2022. Vol. 56. No.2, Pleiades Publishing, Inc.. pp.191-199
18. Mammadli T.Ya. Identification of source zones of strong earthquakes in Azerbaijan and determination of their maximum magnitudes (M_{max}) from the weak seismicity of Baku. *Izv. ANAS. Ser.: Earth sciences*. 2005. No. 4. pp. 60–64.
19. Map of the deep structure of the Black Sea-South-Caspian region of regional subsidence M.1: 1000000. Ch. ed. K.M. Kerimov, E.Sh. Shikhalibeyli. Baku, 1992.
20. New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR. Ed. N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin. Moscow. Science, 1977. 535 p.
21. Nikonov A.A. The strongest earthquake in the Greater Caucasus on January 14, 1668. *Physics of the Earth*. 1982. No. 9. pp. 90–106.
22. Rantsman E.A. Locations of earthquakes and morphostructure of mountainous countries. Moscow. Science, 1979. 170 p.
23. Reisner G.N. Features of the Quaternary tectonics of the southern slope of the Eastern Caucasus. *Problems of Geodynamics of the Caucasus*. Moscow. Science, 1982. p p. 94-99.
24. Riznichenko Yu.V. Dimensions of the source of a crustal earthquake and seismic moment. In the book: *Studies in the physics of earthquakes*. Moscow. Science, 1976. pp. 9–27.
25. Riznichenko Yu.V. Sizes of the source of a crustal earthquake and seismic moment. *Studies in the physics of earthquakes*. Moscow. Science, 1976. pp. 9-27.
26. Shebalin N.V. Sources of strong earthquakes in the territory of the USSR. Moscow. Science, 1974. 53 p.
27. Toksoz M.N., Shakal A.F., Mishael A.J. Space-time migration of earthquake along the North Anatolian fault zone and seismic gaps. *Pure and Appl. Geophys*. 1979. Vol.117. pp. 1258-1270.
28. Utsi T. A statistical study of the occurrence of aftershocks. *Geophys. Mag*. 1961. Vol. 30. No4. pp. 521-605.

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006

Оригинальная статья

Региональное тепловое поле и геотермальные ресурсы Кавказского региона

М.Д. Хуторской 

Геологический институт Российской академии наук,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер, 7, стр.1,
e-mail: mdkh1@yandex.ru

Статья поступила: 27.05.2023, доработана: 31.08.2023, принята к публикации: 04.08.2023

Резюме: Актуальность: Возросший в последние десятилетия в мире интерес к альтернативным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) обусловлен не только истощением запасов углеводородного топлива, но и необходимостью решения ряда экологических проблем. **Целью статьи** является выявление перспектив использования термальных вод. **Методы работы:** При всех способах разработки месторождений термальных вод Северный Кавказ по нескольким причинам следует отнести к числу наиболее перспективных регионов для широкого вовлечения теплоэнергетических вод в топливно-энергетический баланс. На всей территории региона – от Дагестана на востоке до Краснодарского края на западе – выявлены значительные ресурсы природных теплоносителей с различным тепловым потенциалом. Климатические условия и преимущественно агропромышленная специализация теплопотребителей обеспечивают благоприятные предпосылки для использования теплоэнергетических вод дополнительно или в некоторых случаях взамен традиционных источников энергии. И наконец, в пределах Северного Кавказа проведены значительные объемы геологоразведочных работ и выявлено большое число месторождений термальных вод. **Результаты работы:** Рассмотрены особенности теплового поля Кавказского региона и перспективы утилизации геотермальных (гидро- и петротермальных) ресурсов, как одного из перспективных альтернативных и возобновляемых источников энергии. Подчеркнута связь распределения теплового потока с историей тектонического развития региона.

Ключевые слова: термальные воды, гидротермальные ресурсы, петротермальные ресурсы, геотермическое поле.

Благодарности: Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского научного Фонда (проект № 23-17-00019).

Для цитирования: Хуторской М.Д. Региональное тепловое поле и геотермальные ресурсы Кавказского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 73-88. DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006

DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006

Original paper

Regional thermal field and geothermal resources of the Caucasus region

M.D. Khutorskoy 

Geological Institute, Russian Academy of Sciences,
Russia, 119017, Moscow, Pyzhevsky lane, 7, building 1,
e-mail: mdkh1@yandex.ru

Received: 27.06.2023, revised: 31.07.2023, accepted: 04.08.2023

Summary: Relevance: The growing interest in alternative renewable energy sources (RES) in the world in recent decades is due not only to the depletion of hydrocarbon fuel reserves, but also to the need to solve a number of environmental problems. **The aim** of the article is to identify the prospects for the use of thermal waters. **Methods of work:** With all methods of developing thermal water deposits, the North Caucasus, for several reasons, should be considered one of the most promising regions for the widespread involvement of thermal energy waters in the fuel and energy balance. Throughout the region – from Dagestan in the east to the Krasnodar Territory in the west – significant resources of natural coolants with different thermal potential have been identified. Climatic conditions and the predominantly agro-industrial specialization of heat consumers provide favorable prerequisites for the use of thermal energy waters additionally or, in some cases, instead of traditional energy sources. And finally, significant amounts of geological exploration work have been carried out within the North Caucasus and a large number of thermal water deposits have been identified. **Results of the work:** The features of the thermal field of the Caucasus region and the prospects for the utilization of geothermal (hydro- and petrothermal) resources as one of the promising alternative and renewable energy sources are considered. The connection between the distribution of heat flow and the history of the tectonic development of the region is emphasized.

Keywords: thermal waters, hydrothermal resources, petrothermal resources, geothermal field.

Acknowledgments: *The work was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00019).*

For citation: Khutorskoy M.D. Regional thermal field and geothermal resources of the Caucasus region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 73-88. DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006

Введение

Объективные факторы (резервы ископаемого топлива и урана, а также изменения среды, вызванные традиционной огневой и атомной энергетикой) позволяют утверждать, что переход к новым способам и формам получения энергии является неизбежным. Чем раньше будет сделан прорыв в этом направлении, тем менее болезненным он будет для всего общества и тем более выгодным для страны, где такой прорыв произойдет.

Неисчерпаемая тепловая энергия Земли – геотермальная энергия – занимает среди альтернативных энергетических источников одно из лидирующих мест. Геотермальная энергетика – это отрасль энергетики, производящая тепловую или электрическую энергию за счет использования глубинного тепла Земли на основе природно-техногенных систем, обеспечивающих отбор тепла из естественных или

искусственных подземных резервуаров. Непрерывная генерация внутриземного тепла за счет радиоактивного распада долгоживущих изотопов (в первую очередь, ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K), содержащихся в геосферах Земли, а также переход энергии гравитационной дифференциации в глубинных оболочках планеты в тепло компенсируют его внешние потери в виде теплового потока, излучаемого в атмосферу, и определяют возобновляемость геотермальных ресурсов.

Весьма богатые по сравнению с другими странами топливные ресурсы России пока обеспечивают развитие отечественной энергетики, поэтому освоение новых нетрадиционных источников энергии еще не стало у нас действительно острой необходимостью и социально значимой проблемой. Это объясняет, но отнюдь не оправдывает недостаточное внимание государственных структур к программам освоения нетрадиционных возобновляемых энергоресурсов, в том числе, и геотермальных.

Однако надо все же учесть, что из всех ВИЭ геотермальная энергия – наиболее сложный в использовании вид. Исследование регионального теплового поля, определение теплофизических свойств горных пород, их водонасыщенности, моделирование процессов тепломассопереноса в геологической среде выполняют геологи, геофизики и гидрогеологи. Бурение геотермальных скважин и обустройство месторождений осуществляют специалисты по бурению. Обратная закачка отработанного геотермального теплоносителя в объемахкратно больших, чем при добыче нефти, требует специальных компетенций. Геотермальные воды имеют сложный химический и газовый состав, который в сочетании с высокими температурами обуславливает необходимость разработки специальных методов защиты от отложения солей и коррозии как в стволе скважин, так и на глубинах 2–3 км. Создание геотермальных систем теплоснабжения требует учёта таких специфических особенностей теплоносителя, как стабильная в течение всего срока эксплуатации температура, переменный в течение срока эксплуатации дебит скважин, необходимость подбора потребителей для максимально возможной загрузки скважин в течение года, необходимость защиты окружающей среды при сбросе отработанного флюида от теплового и химического загрязнения [Бутузов и др., 2018].

Гидротермальные ресурсы

Гидротермальные ресурсы считаются одним из самых надежных видов теплоносителей, так как они постоянно пополняются за счет круговорота воды в природе и участвуют в теплообмене с вмещающими породами. Тепло, генерируемое недрами Земли, доступно в любое время года и в любую погоду.

По условиям теплового питания гидротермальные ресурсы можно разделить на две группы: а) формирующиеся в аномальных геотермических условиях под действием современных вулканических и магматических процессов; б) формирующиеся в региональном тепловом поле. К первым относятся гидротермальные системы, приуроченные к пористым осадочным образованиям и к трещинным зонам, а вторым – пластовые подземные воды обширных артезианских бассейнов. По химическому и газовому составу выделяются сероводородно-углекислые, водородные, углекислые, азотные, азотно-углекислые, метановые и азотно-метановые гидротермальные ресурсы. Различные типы термальных вод и парогидротерм различаются по своему тепловому потенциалу, что обуславливает выбор той или иной технологии их практического использования.

В верхних 5–10 км земной коры подземные воды циркулируют под действием

силы тяжести, или напора и постоянно обмениваются с поверхностными водами. С глубиной ухудшается проницаемость коры, снижаются напоры, что приводит к уменьшению подвижности вод. На некоторых глубинах (зоны замедленного водообмена или застойных вод) подвижность воды снижается настолько, что её роль в теплопереносе становится несущественной. Происходит уже не конвективный теплоперенос, а диффузионный или кондуктивный перенос тепла.

Гидротермальные ресурсы составляют лишь 1% от общих ресурсов геотермальной энергии, но в силу относительной технологической простоты их извлечения утилизация этого вида внутриземных ресурсов началась более ста лет назад и с успехом продолжается до настоящего времени. Однако районы их возможного энергетического использования приурочены к зонам современного вулканизма, где подземные воды приобретают дополнительный тепловой потенциал при соприкосновении с магматическими телами и циркулируют на относительно небольшой глубине, доступной для буровой техники сегодняшнего дня. Правда, срок службы скважин во многих странах не достигает и десяти лет. Использование термальных высокоминерализованных вод в качестве теплоносителя приводит к химической кольматации скважин, солеотложению и коррозии оборудования. Кроме того, все источники гидротермальной энергии в подавляющем большинстве случаев отдалены от потребителя. Это во многом ограничивает их утилизацию, хотя следует указать на значительный прирост в последнее двадцатилетие доли гидротермальной энергии в таких странах, как Мексика, Филиппины, Япония, Новая Зеландия, Китай, Сальвадор и др. В России общая инсталлированная мощность геотермальных электростанций составляет 73 МВт, хотя до 2000 г. электроэнергия производилась только на Паужетской геотермальной теплоэлектростанции (ГеоТЭС) мощностью 11 МВт на юге Камчатки. До указанного значения мощность возросла после пуска на Камчатке в 2000 г. Верхне-Мутновской – мощностью 12 МВт и в 2001 г. Мутновской ГеоТЭС мощностью 50 МВт.

Опыт подтверждает, что при наличии неглубоких коллекторов природного пара ГеоТЭС представляют собой наиболее выгодный вариант использования геотермальной энергии. По предварительным оценкам на территории России прогнозные запасы термальных вод с температурой 40–250°C, минерализацией 35–200 г/л и глубиной залегания до 3 км возможно извлекать с дебитом 21–22 млн м³/сут., что эквивалентно сжиганию 30–40 млн т у.т./год [Поваров и др., 1994].

Опыт, накопленный различными странами, в том числе и Россией, относится в основном к использованию природного пара и термальных вод, вместе называемых парогидротермами. Они остаются пока наиболее реальной базой геотермальной энергетики. Применение парогидротерм и термальных вод в ряде стран давно уже приняло промышленные масштабы. Гидротермальные месторождения успешно разрабатываются более чем в 100 странах мира, лидерами среди которых являются США, Филиппины, Мексика, Индонезия, Италия, Исландия, Новая Зеландия, Япония, Китай, Франция, Венгрия и др. Наша страна по объему используемых гидротермальных ресурсов занимает «почетное» 19-е место.

Большие запасы тепла могут быть аккумулированы в гидротермальных системах, формирующихся в региональном тепловом поле. К таким системам можно отнести Северо-Кавказский и Закавказский бассейны. Температура вод в этих регионах на глубинах до 1 км достигает 100°–120°C. Этих условий недостаточно для производства электроэнергии даже с применением бинарного цикла, но достигнутые на глубине температуры вполне пригодны для теплоснабжения, в парниково-

тепличном хозяйстве, в сельскохозяйственных и промышленных производствах.

На Северном Кавказе термальные воды образуют многослойные артезианские бассейны в осадках мезозоя и кайнозоя предгорных прогибов и Скифской плиты. Минерализация и температура этих вод широко варьируют – в прогибах на глубине 1–2 км от 0,5 до 65 г/л и от 70 до 100°C, а на плите на глубинах до 4–5 км от 1 до 200 г/л и от 50°C до 170 °C.

Примерами использования термальных вод для теплоснабжения в кавказском регионе могут быть эксплуатируемые системы в городах Махачкала, Кизляр, Избербаш, Тарумовка, Грозный (Ханкала), Лабинск. Горячим геотермальным водоснабжением пользуются около 400 тыс. человек. В Тернаире, Кизляре, Ханкале, Мостовском и других районах Северного Кавказа расположены большие тепличные комплексы, отапливаемые термальными водами. Термальные воды используются для обогрева коровников, свиноферм и птичников. Используются они также на нескольких курортах. В табл. 1 приведены сведения об использовании термальных вод в регионах Кавказа.

Таблица 1 / Table 1

**Прямое использование геотермальных ресурсов Кавказского региона
(на 31 декабря 2020 г.) / Direct use of geothermal resources of the Caucasus region
(as of December 31, 2020)**

Район / Area	Тип ¹⁾ / Type	Максимальное использование / Maximum usage			Мощность (МВт) / Power(MW)	Среднегодовое использование / Average annual use		
		Дебит (кг/сек) / Debit (kg/sec)	Температура(°C) / Temperature			Средний дебит, кг/сек / Average flow rate, kg/sec	Энергия, ТДж/ год Energy, TJ/ear	Фактор нагрузки Load factor
на входе / at the entrance	на выходе / at the exit							
СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ / NORTH CAUCASUS								
<i>Скифская плита / Scythian plate</i>								
Краснодарский край Krasnodar region	ИСЖТБП	370	80	30	77	222	1 465	0,6
Ставропольский край Stavropol region	СТП	60	100	30	18	36	335	0,6
Адыгея Adygea	СТ	49	80	30	10	25	162	0,5
<i>Предгорные прогибы / Foothill troughs</i>								
Кабардино-Балкария Kabardino-Balkaria	П	70	70	30	2	6	33	0,5
Дагестан Dagestan	ИТБП	339	80	30	71	203	1 340	0,5
Карачаево-Черкесия Karachay-Cherkessia	Г	25	65	30	4	13	58	0,5
Северная Осетия North Ossetia	Г	21	60	30	3	10	41	0,5
ВСЕГО TOTAL		>1 466			327	> 888	> 6135	

Примечания. ¹⁾ И = промышленные процессы; С = сушка продуктов сельского хозяйства (зерна, овощей, фруктов); Ж = животноводство и рыбозаготовление; Т = теплоснабжение; Б = бальнеолечебницы, бассейны; П = парниково-тепличные хозяйства; Г=горячее водоснабжение;

Перспективны запасы термальных вод в соседней Грузии, которые допускают

расход в сутки 300–350 тыс. м³ с температурой до 80°C. Столица Грузии находится над месторождением термальных вод с метан-азотным и сероводородным составом и температурой до 100°C.

Петротермальные ресурсы

Огромное значение для энергетики будущего имеет извлечение тепловой энергии, заключенной в «сухих» горных породах – то есть петротермальных ресурсов. Это наиболее крупные и широко распространенные источники энергии, потому что горячие скальные породы, залегающие, правда, на разных глубинах, есть повсюду. Геотермальная энергия, заключенная в твердых горячих породах, составляет около 99% от общих ресурсов подземной тепловой энергии [Гнатусь, Хуторской, 2010].

Отечественная идея извлечения основных геотермальных ресурсов, заключенных в твердых породах, была высказана еще в 1915 году К.Э. Циолковским [1989].

В 1920 году В.А. Обручевым в незавершенной им повести «Тепловая шахта» описана геотермальная циркуляционная система (ГЦС) в горячем гранитном массиве на глубине 3000 м.

Большой вклад в развитие идей по извлечению и использованию петротермальных ресурсов в нашей стране внесли профессор Ленинградского горного института им. Г.В. Плеханова Ю.Д. Дядькин, академики АН УССР А.Н. Щербань и О.А. Кремнев и представители созданных ими школ [Дядькин, 1974, 1989; Тепло ..., 1974]. Они заложили основы новой научной дисциплины – геотермальной теплофизики, в которой обосновываются физические предпосылки для моделирования переноса массы и энергии в различных структурных средах, приводятся методики тепловых и гидродинамических расчетов циркуляционных систем с естественными и искусственными коллекторами, а также дается теплофизический анализ работы систем извлечения энергоресурсов из массива горячих горных пород. Кроме перечисленных фундаментальных вопросов геотермии, в их трудах изложены технологические основы и инженерные решения по извлечению геотермальной энергии из природных и искусственных подземных тепловых коллекторов.

По имеющимся данным, общий ресурс тепловой энергии Земли, размещенной на глубинах до 10 км, эквивалентен тепловому потенциалу сжигания $34,1 \cdot 10^9$ млрд тонн условного топлива. Это в несколько тысяч раз больше тепловой способности всех известных запасов топлива на Земле.

Разумеется, что практический интерес вызывает не общий потенциал геотермальной энергии, а та его часть, которая отвечает современным техническим возможностям проникновения в недра планеты. Ориентируясь на достигнутые успехи традиционной технологии глубокого и перспективные технологии свехглубокого бурения, резонно ограничить технически доступные ресурсы геотермальной энергии общим теплосодержанием верхних 10–12 км земной коры в пределах суши.

На глубине до 5–6 км в активных геодинамических провинциях можно встретить массивы с температурой 250–300°C. Но глубинные температуры 100–150°C в этом интервале глубин встречаются на территории планеты почти повсеместно. При таких температурах утилизация петротермальных ресурсов для целей

энергетики и, особенно, теплоснабжения становится актуальной и рентабельной. Однако, пространственное распределение петротермальных ресурсов не однородно.

Извлечение петротермальных ресурсов неизменно сопровождается уменьшением начального теплосодержания отдельных участков земной коры, которое в силу низкой теплопроводности литосферы восстанавливается в течение весьма длительного времени, во много раз превышающего время извлечения.

В этом смысле петротермальные ресурсы следует понимать, как невозобновляемые ресурсы, имеющие ряд общих черт с полезными ископаемыми.

Разработка петротермальных ресурсов представляет собой одну из областей горного дела и предполагает использование разнообразных технических систем. Под системой их извлечения понимается комплекс естественных технических средств, обеспечивающих вывод тепла из недр на земную поверхность или превращение в другие виды энергии.

Для выполнения своего назначения система должна состоять из следующих основных элементов:

1) подземный тепловой котел-коллектор (природный теплообменник) – часть массива горных пород, в котором в результате эксплуатации системы нарушается естественное тепловое поле и происходит полная или частичная передача тепла подвижному теплоносителю;

2) подвижный теплоноситель для отбора и переноса тепла;

3) вскрывающие каналы (чаще всего в виде буровых скважин) для транспортировки тепла или разогретого флюида на земную поверхность.

Одним из возможных вариантов такого рода систем является петротермальная циркуляционная система (ПЦС) извлечения тепла Земли, в которой для переноса тепла используется циркуляция техногенного теплоносителя через скважины и проницаемую зону земного теплового котла-коллектора (рис. 1).

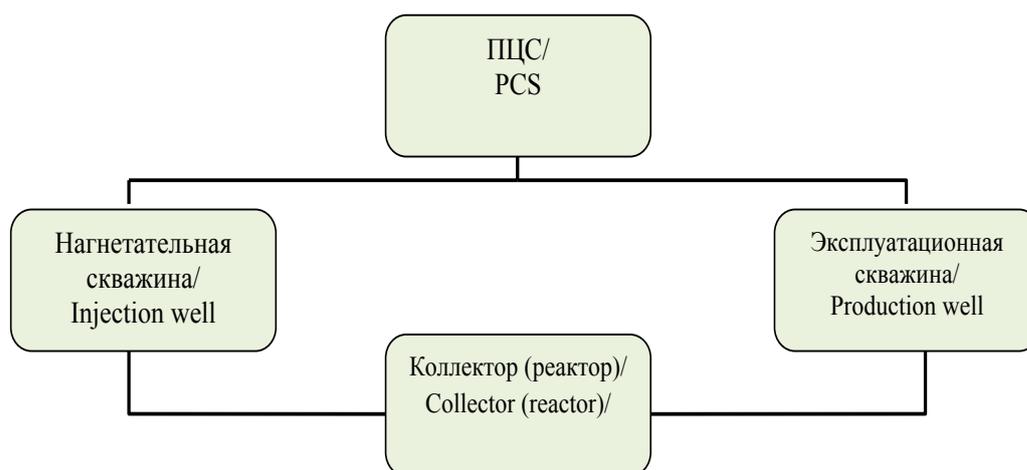


Рис. 1. Петротермальная циркуляционная система (ПЦС) /

Fig. 1. Petrothermal circulation system (PCS)

ПЦС состоит из нагнетательной и эксплуатационной скважин, подземного котла-коллектора (реактора) с зоной фильтрации, а также из поверхностного комплек-

са, в который могут входить турбинный зал, градирни, конденсаторы, промежуточные теплообменники, трубопроводы и насосные установки (рис. 2).

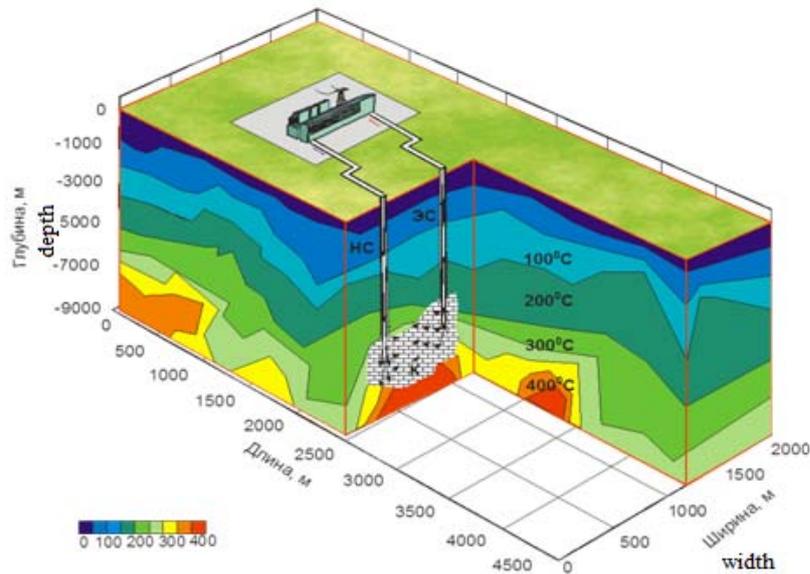


Рис. 2. 3D-модель распределения температур и расположение циркуляционной системы извлечения энергии твердых горных пород с естественным проницаемым коллектором
НС – нагнетательная скважина, ЭС – эксплуатационная скважина, К – коллектор /

Fig. 2. 3D model of temperature distribution and location of a circulation system for extracting energy from solid rocks with a natural permeable reservoir
NS – injection well, ES – production well, K – reservoir

Для эффективной работы циркуляционных систем необходимо иметь или создать в зоне отбора тепла достаточно развитую теплообменную поверхность. Такой поверхностью обладают или встречающиеся на различных глубинах пласты пористых пород и зоны естественной трещиноватости, проницаемость которых обеспечивает принудительную фильтрацию теплоносителя с эффективным теплообменом и извлечением тепловой энергии горных пород, или искусственно созданные методом гидравлического разрыва (гидроразрыва) теплообменные поверхности в слабопроницаемых массивах (рис. 3). Известны примеры гидроразрывов, образующих трещины протяженностью до 2–3 км.

Механизм гидроразрыва представляет собой хрупкое разрушение пород с расширением природных трещин и с образованием новых трещин в результате растягивающих или сдвигающих деформаций массива под влиянием давления рабочей жидкости (воды), приложенного к его обнажению – стенке скважины, а далее – к борту растущей трещины, причем избыточный объем жидкости служит гидравлическим клином.

Теоретические основы механики гидроразрыва в СССР разработаны академиком С.А. Христиановичем, его сотрудниками и учениками [Христианович и др., 1957; Христианович, 1960]. Наиболее широко гидроразрывы применяются при разработке нефтегазовых пластов и, практически, повсеместно при добыче сланцевой нефти.

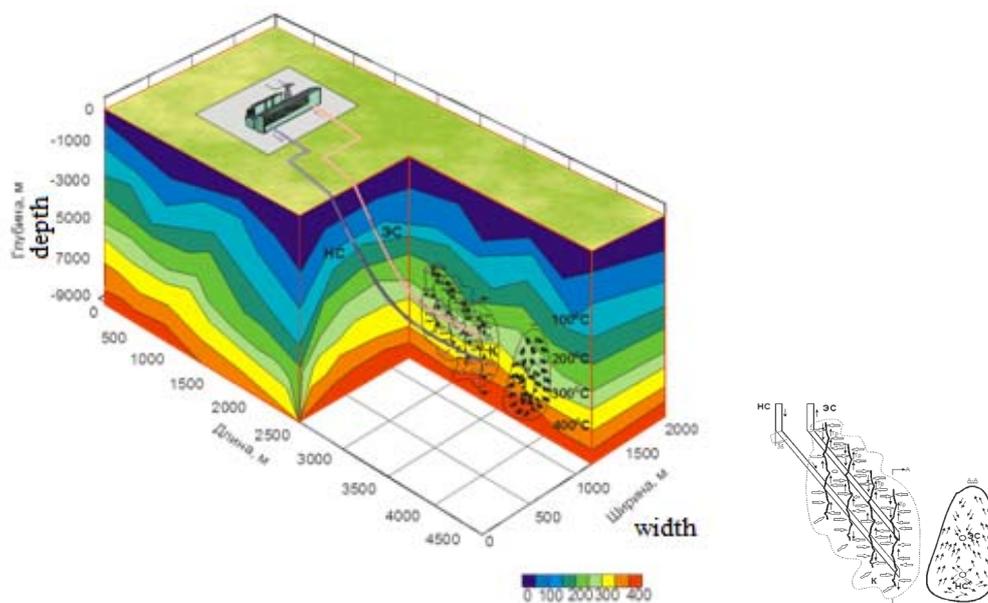


Рис. 3. 3D-модель температуры и расположение циркуляционной системы извлечения петротермальной энергии с искусственным коллектором – серией вертикальных трещин гидроразрыва (вид сбоку и сверху)

НС – нагнетательная скважина, ЭС – эксплуатационная скважина, К – коллектор /

Fig. 3. 3D temperature model and location of the petrothermal energy extraction circulation system with an artificial reservoir – a series of vertical hydraulic fractures (side and top views)

NS – injection well, ES – production well, K – reservoir

На основе созданных ПЦС осуществляется строительство петротеплоэлектростанций, максимально приближенных к потребителю.

Основными техническими и затратными задачами, связанными с созданием ПЦС, являются бурение циркуляционных скважин и образование проницаемой зоны подземного теплового котла.

Производительность и срок службы циркуляционных систем зависят от объема естественной или искусственно созданной зоны проницаемости массива с развитой поверхностью теплообмена «горячих» пород и фильтрационного потока теплоносителя. Разумеется, там, где возможно, следует использовать природные пористые или трещинные коллекторы.

При сооружении петротеплоэлектростанций (ПетроТЭС) для теплоснабжения коммунальных и промышленных объектов необходимо иметь на поверхности пар или пароводяную смесь с температурой до 150°C. Такое значение температуры закачанная с поверхности вода может приобрести на глубине 3 км при очень высоком геотермическом градиенте, до 50 мК/м. Эти высокие градиенты температуры редко встречаются на территории России. Ценно, что они обнаруживаются на территории Северного Кавказа (Ставропольский свод, Восточное Предкавказье), а также в некоторых районах Западной Сибири, в Тункинской впадине Прибайкалья и в Курило-Камчатском регионе. При фоновом температурном градиенте 25 мК/м, который встречается почти повсеместно [Хуторской, 1996], для получения на забое температуры 150°C нужна уже скважина глубиной 6 и более км. Если же речь идет о выработке электроэнергии на петротеплоэлектростанциях (ПетроТЭС), то на забое нужно достичь температуры 250–280°C, т.е. бурить на 10 км.

Перечислим преимущества и недостатки этого вида энергии. К преимуществам петротермального источника энергии можно отнести следующие:

- повсеместное распространение,
- неисчерпаемость,
- приближенность и приспособляемость к потребителю,
- безотходность, безопасность в эксплуатации, экологическая чистота.

К недостаткам петротермального объекта нужно в первую очередь отнести большие капиталовложения при бурении глубоких скважин и организации гидроразрыва пласта. Кроме того, может возникнуть необходимость в процессе эксплуатации бурения нового дуплета скважин, т.к. в первоначальном дуплете возникает охлаждение массива пород из-за инъекции поверхностных вод. Если ориентироваться на глубину коллектора 3 км, то трудно рассчитывать на высокую энтальпию пласта. На этом фоне такие недостатки как не транспортабельность, невозможность складирования и отсутствие опыта промышленного освоения в России кажутся второстепенными.

Оценка возможности и рентабельности создания ПЩС основывается на знании параметров регионального теплового поля, которые необходимы для расчета глубинных температур. В этой связи рассмотрим особенности геотермического поля Кавказского региона.

Геотермическое поле и сейсмичность Кавказа

Основная закономерность распределения теплового потока (ТП) на территории Кавказского региона выражается в тесной связи геотермических параметров с геолого-тектоническим строением. Минимальные измеренные значения теплового потока приурочены к докембрийским выступам фундамента, например, таким как Ростовский выступ Русской платформы, а также к областям с большой скоростью седиментации, где происходит экранирование глубинного теплового потока накапливающимися «холодными» осадками (Индоло-Кубанский и Терско-Каспийский прогибы). В этих районах значения теплового потока изменяются от 36 до 60 мВт/м². Максимальный тепловой поток фиксируется в мегантиклинории Большого Кавказа, а также в структурах транскавказского простирания: Минераловодский, Майкопский выступы, где тепловой поток достигает 80–100 мВт/м².

Распределение теплового потока на территории Западного Предкавказья наиболее представителью изучено в Индоло-Кубанском прогибе и в зоне его сочленения с мегантиклинорием Большого Кавказа. В Индоло-Кубанском прогибе выполнено 14 определений теплового потока. Четыре измерения приурочены к южной бортовой зоне сочленения прогиба с мегантиклинорием Большого Кавказа, шесть – к локальным положительным нефтегазоносным структурам, четыре – к центральной погруженной части прогиба, где ТП составляет всего 39 мВт/м². Скорость седиментации за неоген–четвертичный период в осевой части прогиба оценивается как 0,1 мм/год. При этом величина искажения теплового потока за счет экранирующего эффекта седиментации достигает 20–25%. Таким образом, фоновый ТП из фундамента прогиба можно представить величиной 47–49 мВт/м², что не отличается от теплового потока Восточно-Европейской платформы. На антиклинальных структурах Индоло-Кубанского прогиба значения ТП варьируют от 49 до 64 мВт/м², причем девять из 14 значений лежат в пределах 50–57 мВт/м². Повышение теплового потока в этих структурах объясняется преимущественно рефракцией тепла в

контрастных по теплопроводности толщах. Наиболее высокие значения теплового потока во внутренней зоне прогиба (до 64 мВт/м^2) отмечаются на Ново-Дмитриевском месторождении, где, по-видимому, происходит восходящая миграция флюидов, в том числе и углеводородов [Тепловой режим..., 1970]. На рис. 4 приведена трехмерная картина распределения температур в Западном Предкавказье.

Следует подчеркнуть отмеченное на рисунке наличие положительной аномалии температур с амплитудой $+30^\circ\text{C}$ на глубине 4 км в районе Адыгейского выступа, которая продолжается в области Черного моря и Западно-Кубанского прогиба, а также зоны сочленения Армавири-Невинномысского вала и Ставропольского свода. Температура, так же, как и тепловой поток увеличиваются с северо-запада в юго-восточном направлении, достигая своих максимальных значений в области Западно-Кубанского бассейна и Ставропольского свода. Такое аномальное повышение температур приурочено к молодым структурам Кавказа и главным контролирующим разломам Западно-Кубанского прогиба, где сосредоточено основное количество месторождений углеводородов.

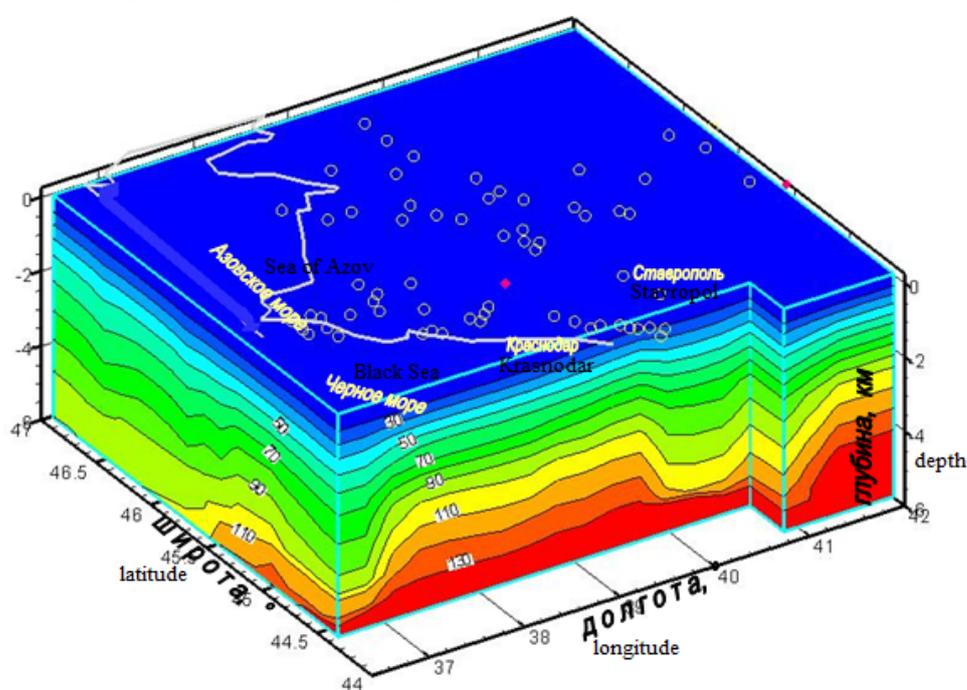


Рис. 4. Трехмерная термотомографическая модель Западного Предкавказья. Изотермы, ($^\circ\text{C}$). Кружками показана локализация нефтегазовых месторождений /

Fig. 4. Three-dimensional thermotomographic model of Western Ciscaucasia. Isotherms, ($^\circ\text{C}$). Circles show the localization of oil and gas fields

Можно высказать предположение о существовании здесь мантийного диапира. Эта идея не беспочвенна. Исследования изотопного отношения гелия под Эльбрусом [Поляк и др., 1998] показали, что именно здесь отмечается присутствие мантийной компоненты в структуре изотопного отношения гелия.

Отчетливо прослеживаются температурные аномалии в виде нескольких локальных куполов в северном и северо-восточных направлениях, имеющих вытянутую форму и совпадающих в тектоническом плане с Адыгейским выступом и Азовско-Каневским поясом поднятий (см. рис. 4). Там же расположены некоторые нефтегазоносные структуры, которые на рисунке отмечены красными точками.

В Терско-Каспийском прогибе по восьми надежным определениям теплового потока его среднее значение составляет 37 мВт/м² (разброс данных – от 27 до 46 мВт/м²). Термическая аномалия – 81 мВт/м² характеризует Октябрьское нефтяное месторождение. Геотермическая аномалия по данным [Геологическое изучение..., 2010] объясняется вулканизмом, продукты которого найдены в отложениях плиоцена.

Данные о тепловом потоке в пределах Майкопского выступа (71–90 мВт/м²), Ставропольского свода (59–115 мВт/м²) и Невинномысского вала (59–111 мВт/м²) свидетельствуют о том, что ареал влияния тепловой аномалии этих структур намного превышает их геоморфологические проявления. Следовательно, эти аномалии имеют глубинную (по-видимому, мантийную) природу.

На южном склоне Большого Кавказа соблюдается та же тенденция, т.е. тепловой поток на выступах транскавказского простирания выше, чем в межгорных впадинах с высокой скоростью осадконакопления. Так, в Рионской и Нижнекуринской впадинах тепловой поток изменяется от 32 до 65 мВт/м², а в Аджаро-Триалетии, Армянской глыбе – достигает 80–85 мВт/м².

Прилегающая с севера к Кавказскому региону платформенная область, Грузинская глыба и некоторые другие стабильные участки характеризуются значениями теплового потока от 42 до 60 мВт/м². Велика при этом роль тектонического фактора. Так, в Индоло-Кубанском прогибе не встречены аномально низкие значения теплового потока из-за влияния складчатой системы Большого Кавказа и Ставропольского поднятия, а средние значения в центре Терско-Каспийской впадины обусловлены Терско-Сунженским поднятием. В Армении высокие значения отмечаются в области развития гранитоидов с повышенным содержанием радиоактивных элементов и с активной верхней мантией, вызывающей новейшую тектономагматическую перестройку.

Структуры Кавказа обладают большой тектонической неоднородностью, что обуславливает также неоднородность теплового поля. Из-за этого на границах тектонических зон длительное время существуют полосы резких горизонтальных температурных градиентов. Они создают термоупругие напряжения, которые обуславливают живучесть глубинных разломов кавказского и транскавказского простираний, а также сейсмическую активность.

За период с 1980 по 2018 год в районе складчатого пояса Большого Кавказа произошло четыре крупных сейсмических события с $M_w > 6$. Для районов эпицентров этих землетрясений характерны небольшие значения ТП – 34–44 мВт/м². Землетрясения являются коровыми, их гипоцентры находились на глубинах от 10 до 15 км. Большинство же землетрясений с меньшей магнитудой характеризовались более высокими значениями теплового потока. Таким образом, наметилась качественная антибатная корреляция между сейсмичностью и тепловым потоком.

Согласно историческим сведениям, в Кавказском регионе ощущались землетрясения с магнитудой более 7 – это события 1668, 1406 и 1139 гг. По результатам моделирования возможных мест сильных землетрясений в Черноморско-Каспийском регионе предполагается, что большая их часть приурочена к зонам сочленения Большого и Малого Кавказа с граничащими структурами [Новикова, Горшков, 2018]. Отметим, что это области со значениями теплового потока от 40 до 55 мВт/м² [Хуторской и др., 2022]. Данный факт и тепловой поток в районах исторических землетрясений подтверждает, что большие значения магнитуд землетря-

сений соответствуют меньшим значениям ТП, т.е. подтверждается антибатная связь между значениями теплового потока и магнитудой землетрясений, выделенная нами за период 1980–2018 гг.

Для проверки статистической значимости этой зависимости мы рассчитали коэффициент корреляции Пирсона по формуле:

$$t_{yiii} = \frac{|r|\sqrt{n-1}}{1-r^2} \quad (1)$$

Если это значение окажется больше критического значения t -критерия Стьюдента, при числе степеней свободы $k=n-2$ и с уровнем значимости $(1-\alpha)$, то коэффициент корреляции значим.

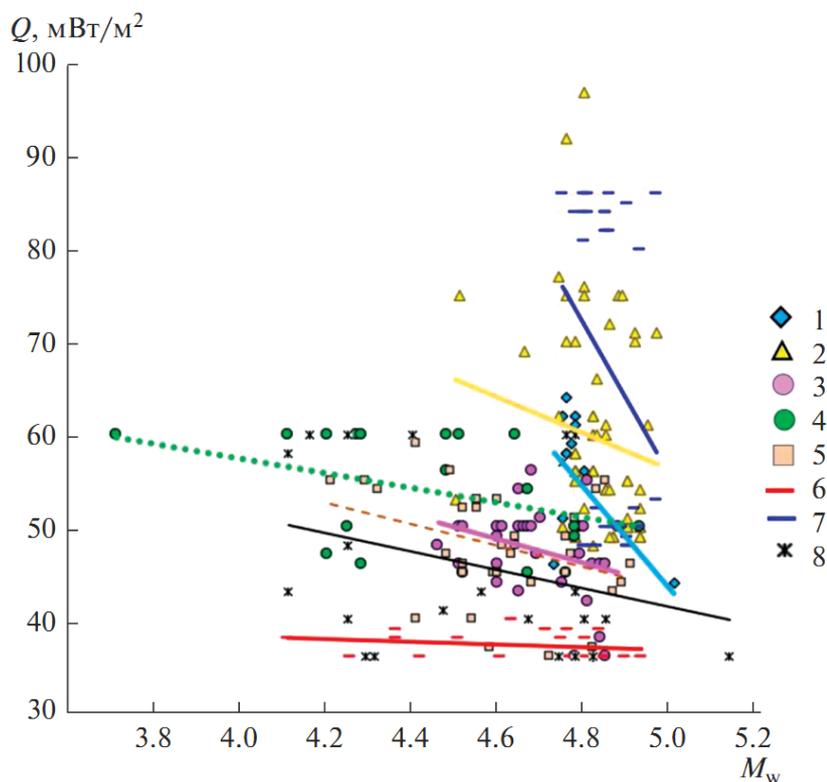


Рис. 5. Графики зависимостей средних значений теплового потока и унифицированных магнитуд для некоторых структурно-тектонических элементов Кавказско-Каспийского региона.

1 – Прикаспийская впадина; 2 – Среднекаспийская синеклиза; 3 – Большой Кавказ; 4 – Малый Кавказ; 5 – Куринская впадина; 6 – Кусаро-Девиченский прогиб; 7 – Апишерон-Прибалханская система поднятий; 8 – Аджаро-Триалетская складчатая зона /

Fig. 5. Graphs of the dependences of average heat flow values and unified magnitudes for some structural and tectonic elements of the Caucasus-Caspian region.

1 – Caspian depression; 2 – Middle Caspian syncline; 3 – Greater Caucasus; 4 – Lesser Caucasus; 5 – Kura depression; 6 – Kusaro-Devichensky trough; 7 – Absheron-Pribalkhan system of uplifts; 8 – Adzhar-Trialeti folded zone.

Заметим, что связь “сейсмичность–тепловой поток” для геодинамических зон, характеризующихся высокой сейсмичностью, была описана во многих публикациях [Антоновская и др., 2018; Гейнс и др., 1971; Хуторской и др., 2022; Filippucci et al., 2019; Khutorskoy et al., 2019; Lenkey, 1999; Papadakis et al., 2016; Tanaka, 2004]. Но в данном исследовании мы акцентировали внимание на существовании такой

связи в районе, который относится к категории слабосейсмичных, или даже асейсмичных в некоторых структурно-формационных зонах.

Выводы

Однако практическое освоение месторождений термальных вод в регионе осуществляется крайне медленными темпами, причем разрыв между количеством разведанных ресурсов и запасов вод и их практическим использованием постоянно увеличивается.

Такое положение объясняется несколькими причинами. Во-первых, разработка продуктивных горизонтов пока осуществляется (за исключением Ханкальского месторождения в г. Грозном) самоизливом, при котором происходит монотонное уменьшение пластовых давлений и, как следствие, постепенное снижение производительности водозаборов. Во-вторых, из-за того, что термальные воды в большинстве случаев имеют повышенную минерализацию и содержат ряд компонентов в количествах, превышающих норму по ГОСТу и ПДК, сброс отработанных вод в поверхностные водоемы и водотоки недопустим. Это не позволяет подготовить месторождения к промышленному освоению в соответствии с существующими экологическими требованиями.

Единственной альтернативой преодоления сложившегося неблагоприятного положения с использованием ресурсов термальных вод является обратная закачка отработанных вод в продуктивные водоносные горизонты после снятия их термического потенциала. Некоторый опыт создания и эксплуатации гидроциркуляционной системы (ГЦС) имеется в Чечне (Ханкальское месторождение) и в Дагестане (Тернаирское, Тарумовское и Кизлярское месторождения).

Проблема рационального использования гидротермальных ресурсов для решения широкого круга социально-экономических задач связана в первую очередь с достоверной их оценкой, надежным гидрогеологическим обоснованием их охраны от негативного техногенного воздействия и прогноза изменения их качества и количества во времени.

Кавказский регион несомненно является наиболее перспективным в европейской части России для развития геотермальной энергетики, что обусловлено высокими температурами в земной коре, большими ресурсами подземных вод, благоприятной геологической обстановкой для их динамики, а также субъективными факторами – наличием опытных специалистов и бизнесменов, заинтересованных в развитии альтернативной энергетики в промышленности и в сельском хозяйстве.

Литература

1. Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Конечная Я.В. Распределение сейсмичности и аномалии теплового потока Баренцевоморского региона. // Геотектоника. – 2018. – №1. – С. 52–62.
2. Бутузов В.А., Амерханов Р.А., Григораш О.В. Геотермальное теплоснабжение в мире и в России: состояние и перспективы. // Теплоэнергетика. – 2018. – №5. – С. 21–34.
3. Гейнс В.А., Грабенников А.В., Куликов Г.В. и др. Результаты изучения режима термальных вод в районе г. Ташкента в связи с Ташкентским землетрясением. // Ташкентское землетрясение 26.04.66. – Ташкент: Фан, 1971. – С. 200–208.
4. Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д. Тепло «сухих» горных пород – неисчерпаемый возобновляемый источник энергии. // Литология и полезные ископаемые. – 2010. – №6. – С. 6–15.

5. Дядькин Ю.Д. Теплообмен в глубоких скважинах и зонах фильтрации при извлечении тепла сухих горных пород. – Л.: Наука, 1974. – 38 с.
6. Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений. – М.: Недра, 1989. – 228 с.
7. Новикова О.В., Горшков А.И. Высокосейсмичные пересечения морфоструктурных линейментов Черноморско-Каспийского региона. // Вулканология и сейсмология. – 2018. – №6. – С. 23–31.
8. Поваров О.А., Томаров Г.В., Кошкин Н.А. Состояние и перспектива развития геотермальной энергетики в России. // Теплоэнергетика. – 1994. – №2. – С. 15–22.
9. Поляк Б.Г., Каменский И.Л., Прасолов Э.М., Чешко А.Л., Барабанов Л.Н., Буачидзе Г.И. Изотопы гелия в газах Северного Кавказа: следы разгрузки тепломассопотока из мантии. // Геохимия. – 1998. – №4. – С. 383–397.
10. Тепловой режим недр СССР. / Под ред. Ф.А. Макаренко и Б.Г. Поляка. – М.: Наука, 1970. – 249 с.
11. Тепло Земли и его извлечение. / Под ред. Щербань А.Н. – Киев: Наукова думка, 1974. – 263 с.
12. Христианович С.А., Желтов Ю.П., Баренблатт Г.И. О механизме гидравлического разрыва пласта. // Нефтяное хозяйство. – 1957. – № 1. – С. 44–53.
13. Христианович С.А. Исследования механизма гидравлического разрыва пласта. // Тр. Института геологии и разработки горючих ископаемых. Т. 2. Материалы по разработке нефтяных и газовых месторождений. – М.: Изд-во ИМГРЭ, 1960. – С. 159–165.
14. Хуторской М.Д. Введение в геотермию. – М.: Изд-во РУДН, 1996. – 155 с.
15. Хуторской М.Д., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Тевелева Е.А. Сейсмичность и тепловой поток в обрамлении Восточно-Европейской платформы. // Вулканология и сейсмология. – 2022. – №2. – С. 54–74.
16. Циолковский К.Э. Будущее Земли и человека. Научный и технический прогресс будущего. // Промышленное освоение космоса. – М.: Наука, 1989. – С. 167–173.
17. Filippucci M., Tallarico A., Dragoni M., de Lorenzo S. Relationship between depth of seismicity and heat flow: the case of the Gargano area (Italy). // Pure Appl. Geophys. – 2019. – Vol. 176. – pp. 2383–2394.
18. Khutorskoy M., Kostova N., Hristov V., Benderev A. Heat flow and depth temperatures in the earth crust of Bulgaria based on numerical modeling. // Review of the Bulgarian Geological Society. – 2019. – Vol. 80. Part 2. – pp. 443–452.
19. Lenkey L. Geothermics of the Pannonian Basin and its bearing on the tectonics of basin evolution. – Amsterdam: Netherlands Research School of Sedimentary geology, 1999. – 215 p.
20. Papadakis G., Vallianatos F., Sammonds P. Non-extensive statistical physics applied to heat flow and the earthquake frequency–magnitude distribution in Greece. // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2016. – Vol. 456(C). – pp. 135–144.
21. Tanaka A. Geothermal gradient and heat flow data in and around Japan (II): Crustal thermal structure and its relationship to seismogenic layer. // Earth Planets Space. – 2004. – Vol. 56. – pp. 1195–1199.

References

1. Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Konechnaya Y.V. Distribution of seismicity and heat flow anomalies in the Barents Sea region. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No. 1. pp. 45–55. DOI: 10.1134/S001685211801003X.
2. Butuzov V.A., Amerkhanov R.A., Grigorash O.V. Geothermal heat supply in Russia. *Thermal Engineering*. 2020. Vol. 67. No. 3. pp. 145–156.
3. Gaines V.A., Grabennikov A.V., Kulikov G.V. et al. Results of studying the thermal water regime in the area of the city of Tashkent in connection with the Tashkent earthquake. *Tashkent earthquake 04.26.66*. Tashkent, Fan, 1971. pp. 200–208. (In Russ.)
4. Gnatus N.A., Khutorskoy M.D. Hot dry rocks: an inexhaustible and renewable source of

energy. *Lithology and Mineral Resources*. 2010. Vol. 45. No. 6. pp. 593–600. DOI: 10.1134/S0024490210060064.

5. Dyadkin Yu.D. Heat exchange in deep wells and filtration zones when extracting heat from dry rocks. Leningrad. Nauka, 1974. 38 p. (In Russ.)

6. Dyadkin Yu.D. Development of geothermal deposits. Moscow. Nedra, 1989. 228 p. (In Russ.)

7. Novikova O.V., Gorshkov A.I. High seismicity intersections of morphostructural lineaments: the Black-Sea–Caspian region. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2018. Vol. 12. No. 6. pp. 379–387. DOI: 10.1134/S0742046318060064.

8. Povarov O.A., Tomarov G.V., Koshkin N.A. State and prospects for the development of geothermal energy in Russia. *Thermal energy*. 1994. No. 2. pp. 15–22. (In Russ.)

9. Polyak B.G., Kamensky I.L., Prasolov E.M., Cheshko A.L., Barabanov L.N., Buachidze G.I. Helium isotopes in gases of the North Caucasus: traces of unloading of heat and mass flow from the mantle. *Geochemistry*, 1998, No. 4, 383–397. (In Russ.)

10. Makarenko F.A., Polyak B.G. (ed.) Thermal regime of the subsoil of the USSR. Moscow. Nauka. 1970. 249 p. (In Russ.)

11. Shcherban A.N. (ed.) Heat of the Earth and its extraction. Kiev, Naukova Dumka, 1974. 263 p. (In Russ.)

12. Khristianovich S.A., Zheltov Yu.P., Barenblatt G.I. On the mechanism of hydraulic fracturing. *Oil industry*. 1957. No. 1. pp. 44–53. (In Russ.)

13. Khristianovich S.A. Research on the mechanism of hydraulic fracturing In: Proc. of IGIRGI. Vol. 2. Mat. on the dev. of oil and gas fields. Moscow. IMGRE, 1960. pp. 159–165. (In Russ.)

14. Khutorskoy M.D. Introduction to Geothermy. Moscow. RUDN, 1996, 155 pp. (In Russ.)

15. Khutorskoi M.D., Teveleva E.A., Antonovskaya G.N., Basakina I.M. Seismicity and heat flow along the periphery of the East European platform. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2022. Vol. 16. No. 2. pp. 150–167.

16. Tsiolkovsky K.E. The future of the Earth and man. Scientific and technical progress of the future. Industrial space exploration. Moscow. Nauka, 1989. pp. 167–173. (In Russ.)

17. Filippucci M., Tallarico A., Dragoni M., de Lorenzo S. Relationship between depth of seismicity and heat flow: the case of the Gargano area (Italy). *Pure Appl. Geophys.* 2019. Vol. 176. pp. 2383–2394.

18. Khutorskoy M., Kostova N., Hristov V., Benderev A. Heat flow and depth temperatures in the earth crust of Bulgaria based on numerical modeling. Review of the Bulgarian geological Society. 2019. Vol. 80. Part 2. pp. 443–452.

19. Lenkey L. Geothermics of the Pannonian Basin and its bearing on the tectonics of basin evolution. Amsterdam: Netherlands Research School of Sedimentary geology, 1999. 215 p.

20. Papadakis G., Vallianatos F., Sammonds P. Non-extensive statistical physics applied to heat flow and the earthquake frequency–magnitude distribution in Greece. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2016. Vol. 456(C). pp. 135–144.

21. Tanaka A. Geothermal gradient and heat flow data in and around Japan (II): Crustal thermal structure and its relationship to seismogenic layer. *Earth Planets Space*. 2004. Vol. 56. pp. 1195–1199.

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC.2023.52.78.007

Оригинальная статья

Среднеюрские вулканогенные породы южной окраины Большого Кавказа и Абхазо-Рачинской зоны Закавказского срединного массива: геодинамическая типизация и минерагения

В.М. Газеев^{1,2}, А.Г. Гурбанов^{1,2}, И.А. Кондрашов¹

¹Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35,
e-mail: ag.gurbanov@yandex.ru;

²Владикавказский научный центр Российской академии наук,
Россия, 363110, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1,
e-mail: vik.gaz.54@mail.ru

Статья поступила: 27.06.2023, доработана: 11.08.2023, принята в печать: 15.09.2023

Резюме: Актуальность работы. На южной окраине Большого Кавказа (БК) и смежной с ним Абхазо-Рачинской зоны Закавказского срединного массива распространены среднеюрские вулканиты и ассоциирующие с ними колчеданно-полиметаллические, медно-пирротиновые и свинцово-цинковые рудные объекты. Геохимическое изучение этих вулканитов необходимо для уточнения особенностей развития региона в этот временной период. **Целью исследования** является получение аналитических данных, уточнение геодинамической позиции и рудной специализации вулканитов. Объектом исследований являлись байосские эффузивные породы «Порфиритовой серии» (ПС), распространенные в Южной Осетии, Абхазии и Краснодарском крае. **Методы исследования** включали: петрографическое описание пород и их анализы количественными методами *XRF, ICP-MS*; расчеты геохимических характеристик, анализ дискриминационных диаграмм. **Результаты исследования.** Установлено, что вулканогенные породы ПС это умеренно- и низкомагнезиальные базальты, трахибазальты, андезибазальты, трахиандезибазальты с калина-тровым и натровым типами щелочности. Их исходные расплавы образовались при 1–5% плавлении шпинелевых перидотитов. Производные этих расплавов близки к базальтам *E-MORB* типа – $La_n/Yb_n=1,3–5,4$, но от которых, на мультиэлементных диаграммах концентраций несовместимых элементов, они отличаются наличием отрицательных *Ta, Nb* аномалий, положительной аномалией *K*, а также более высокими концентрациями крупноионных элементов *Rb, Ba, Th, U* и *Sr*. На дискриминационных диаграммах фигуративные точки пород группируются в полях пород островных дуг и активных континентальных окраин. Отмечено, что вулканиты ПС, по своим характеристикам близки к породам среднеюрского «Задугового» дайкового пояса БК, но образовались они в более обогащенной флюидными компонентами зоне.

Ключевые слова: петрография, геохимия, геодинамическая типизация, минерагения.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ИГЕМ РАН, рег. № ЕГИСУ НИОКТР 121041500222-4 и госзадания КНИО ВНЦ РАН, рег. № АААА-А19-119040190054-8.

Для цитирования: Газеев В.М., Гурбанов А.Г. Кондрашов И.А. Среднеюрские вулканогенные породы южной окраины Большого Кавказа и Абхазо-Рачинской зоны Закавказского срединного массива: геодинамическая типизация и минерагения. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 89-101. DOI: 10.46698/VNC.2023.52.78.007.

DOI: 10.46698/VNC.2023.52.78.007

Original paper

Middle Jurassic volcanogenic rocks of the southern margin of the Greater Caucasus and the Abkhazian-Racha zone of the Transcaucasian median massif: geodynamic typification and minerageny

V.M. Gazeev^{1,2}, A.G. Gurbanov^{1,2}, I.A. Kondrashov¹

¹Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry RAS,
35 Staromonethy Lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: ag.gurbanov@igem.ru;

²Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1 Williams str., Prigorodny
district, Mikhailovskoye village 363110, Russian Federation, e-mail: vik.gaz.54@mail.ru

Received: 27.06.2023, revised: 11.08.2023, accepted: 15.09.2023

Abstract: Relevance. On the southern margin of the Greater Caucasus (GC) and the adjacent Abkhaz-Racha zone of the Transcaucasian median massif, Middle Jurassic volcanic rocks and associated pyrite-polymetallic, copper-pyrrhotite and lead-zinc ore objects are common. The geochemical study of these volcanites is necessary to clarify the features of the development of the region during this time period. **The aim of the study** is to obtain analytical data, clarify the geodynamic position and ore specialization of volcanic rocks. The object of research was the Bajocian effusive rocks of the "Porphyrite Series", common in South Ossetia, Abkhazia and the Krasnodar Territory. **Research methods** included: petrographic description of rocks and their analysis by quantitative methods XRF, ICP-MS; calculations of geochemical characteristics, analysis of discrimination. **Results.** It has been established that the volcanic rocks of PS are moderately and low magnesian basalts, trachybasalts, andesite basalts, trachyandesite basalts with potassium and sodium types of alkalinity. Their initial melts were formed at 1-5% melting of spinel peridotites. The derivatives of these melts are close to E-MORB type basalts – $L_n/Yb_n = 1.3-5.4$, but from which, on the multi-element diagrams of the concentrations of incompatible elements, they differ in the presence of negative Ta and Nb anomalies, positive K anomalies, as well as higher concentrations of large-ionic elements Rb, Ba, Th, U and Sr. On the discrimination diagrams, figurative rock points are grouped in the rock fields of island arcs and active continental margins. It is noted that PS volcanic rocks are similar in their characteristics to the rocks of the Middle Jurassic "Behind the arc" dike belt GC, but they were formed in a zone more enriched in fluid components.

Keywords: petrography, geochemistry, geodynamic typification, minerageny.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task of the IGE M RAS, reg. No. EGISU NIOKTR 121041500222-4 and state orders of the KNIO VSC RAS, reg. No. AAAA-A19-119040190054-8.

For citation: Gazeev V.M., Gurbanov A.G. Kondrashov I.A. Middle Jurassic volcanogenic rocks of the southern margin of the Greater Caucasus and the Abkhaz-Racha zone of the Transcaucasian median massif: geodynamic typification and minerageny. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(3): 89-101. DOI: 10.46698/VNC.2023.52.78.007.

Введение

Петролого-геохимическое изучение ранне-, среднеюрских вулканогенных образований, распространенных на южной окраине Большого Кавказа (БК) и в Абхазо-

туффиитов с горизонтами лав, лавобрекчий авгитовых порфиритов (Ацетукская свита до 800 м); чередованием туфов, туфобрекчий с редкими горизонтами лав основного состава (Рицинская свита до 500 м); переслаиванием туфов, туфопесчаников и туфогравелитов и в верхней части перекрываемых аргиллитами (Ризгинская свита, более 330 м). Общая мощность ПС достигает 2000 м. Байосский возраст принят условно, по находкам *Adabofoloceras* sp. (ex gr. *abichi* Uhlig), *Parkinsonia* «*depressa*» Qu., *P. djanelidzei* Kakh., *Nannolytoceras tripartitum* Rasn [Лаврищев и др., 2001]. В бассейне р. Бзыби разрез пород ПС состоит из переслаивающихся слоев туфов базальтового состава, подушечных лав, лавовых потоков, полосчатых туффиитов и туфобрекчий. Часто встречаются дайки и силлы [Менгел и др., 1993].

Восточнее в бассейне р. Ингури вулканогенная толща сложена пирокластитами, лавобрекчиями, в меньшей степени лавами и субвулканическими телами. Нижние горизонты толщи сложены преимущественно спилитами, выше залегают авгитплагиоклазовые порфириты. Ими же сложены дайки, межпластовые и субвулканические тела. Аналогичный разрез ПС, состоящий из спилитов, шаровых лав, порфиритов и их туфов, наблюдается в междуречье Большая Лиахви–Джоджора. Мощность вулканогенной толщи Южного склона достигает 3,0–3,5 км [Борсук, 1979]. Мощные вулканические процессы в средней юре протекали и на Малом Кавказе, где в байосском ярусе выделяют два этапа в проявлении вулканизма. В нижнебайосское время формировалась толща, состоящая из пирокластитового материала, лавовых потоков и субвулканических тел андезитового и андезибазальтового состава. В верхнебайосское время изливались кислые лавы [Абдуллаев, 1963].

Материал и методы его исследования

Изучена коллекция образцов пород, собранная в 2010–2018 гг. при исследовании разрезов «Порфиритовой серии» по долинам рек Большая Лиахви, Лопанис–Цкали, Паца, Грамула. Аналитические данные получены в ЦКП «ИГЕМ-Аналитика»: рентгено-флуоресцентным анализом (*XRF*) на спектрометре «Респект-100» (15 проб) и спектроскопией с индукционно–связанной плазмой (*ICP-MS*) на масс-спектрометре *X-Series II* (10 проб). Контроль точности анализов осуществлялся российскими и международными стандартами. Дополнительно (*XRF*) анализы по вулканитам ПС Абхазии заимствованы из литературных источников [Менгел и др., 1993].

Результаты работы и их обсуждение

На классификационной диаграмме ($Na_2O + K_2O$)– SiO_2 (рис. 2) фигуративные точки (ФТ) составов пород ПС группируются преимущественно в поле трахибазальтов и в меньшей мере – базальтов и андезибазальтов, в единичных случаях – в полях трахиандезитов и андезитов. Состав пород в Абхазии ($\Sigma/39$ проб): $SiO_2 = 48,0\%$, $TiO_2 = 1,0\%$, $Al_2O_3 = 16,9\%$, $Na_2O = 3,6\%$, $K_2O = 1,5\%$, а в Южной Осетии ($\Sigma/10$ проб): $SiO_2 = 49,5\%$, $TiO_2 = 0,9\%$, $Al_2O_3 = 17,2\%$, $Na_2O = 4,2\%$, $K_2O = 1,3\%$ (таблица 1) не претерпел существенных изменений. Преобладающие базальты, трахибазальты, андезибазальты и трахиандезибазальты встречаются совместно и образуют единую группу пород. Их структура сериальнопорфировая, гломеропорфировая или микродиабазовая и диабазофитовая. Во вкрапленниках: плагиоклаз и моноклинный пироксен (авгит). Плагиоклаз представлен кристаллами нескольких генераций. Наиболее крупные выделения размером до $0,5 \times 2,0$ см представлены лабрадором с ха-

рактерной ситовидной структурой, вторая генерация – андезин. Иногда плагиоклаз серицитизирован, деанортизирован и альбитизирован. Авгит отмечается в виде реликтов вкрапленников замещенных буроватым идингсито–подобным веществом в промежутках между кристаллами плагиоклаза первой генерации. В некоторых случаях он имеет пойкилитовое строение, и содержит включения рудного минерала и плагиоклаза. Основная масса микролитовая, интерсертальная, реже гиалопилитовая. Состоит из микролитов олигоклаз-андезина, рудных минералов (магнетита, пирита), хлорита, апатита, реже встречаются амфибол, калиевый полевой шпат и эпидот. Вторичные минералы выполняют миндалины, микропрожилки и новообразования в основной массе. Они представлены карбонатом, хлоритом, идингситом, пренитом, редко гиролитом. Андезиты имеют сериально-порфировую и гломеро-порфировую структуры. Вкрапленники представлены плагиоклазом и реликтами темноцветных минералов: роговой обманки и реже авгита. Плагиоклаз первой генерации с размером зерен до 1,5–3,0 мм, представлен кристаллами серицитизированного олигоклаз-андезина и ситовидного лабрадора, в ядерной части которого отмечается олигоклаз. Вторая генерация с размером зерен до 0,3–0,5 мм представлена лабрадором. Основная масса аллотриаморфная, кварц-полевошпатовая с примесью амфибола, хлорита, рудного минерала, апатита с многочисленными микропрожилками карбоната.

Таблица 1 / Table 1

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

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	50,87	46,73	43,99	52,77	48,19	48,51	50,21	49,29	54,25	49,98
TiO ₂	1,02	1,16	0,98	0,48	0,91	1,12	0,97	0,87	0,80	0,96
Al ₂ O ₃	16,17	16,95	15,46	15,62	17,22	16,94	18,28	21,15	18,23	15,75
Fe ₂ O ₃	9,96	9,20	6,86	2,83	11,00	11,99	9,75	9,06	9,25	11,49
MnO	0,19	0,09	0,18	0,08	0,15	0,19	0,17	0,14	0,12	0,21
MgO	5,52	4,77	4,73	1,18	5,12	5,14	4,85	2,59	2,71	6,07
CaO	5,26	9,42	11,72	10,54	6,92	4,08	6,87	10,98	6,31	4,78
Na ₂ O	4,44	2,04	2,04	7,80	4,48	5,41	4,62	2,40	4,15	5,20
K ₂ O	1,94	0,58	4,24	0,36	1,12	1,34	0,73	0,92	0,93	0,53
P ₂ O ₅	0,25	0,18	0,26	0,18	0,18	0,24	0,15	0,20	0,09	0,12
ппп	4,18	8,71	9,25	8,07	4,52	4,82	3,25	2,21	3,03	4,76
Сумма / Sum	99,8	99,83	99,71	99,91	99,81	99,78	99,85	99,81	99,87	99,85
Cr	105	19	130	18	38	30	35	13	10	79
V	192	302	218	108	266	266	242	258	149	263
Co	18	21	20	20	38	32	27	27	20	43
Ni	37	12	52	29	33	20	16	14	10	25
Cu	81	24	78	61	235	390	83	220	94	158
Zn	76	93	92	34	83	134	84	70	73	104
Pb	10	10	10	14	10	12	10	10	10	10
Rb	46	17	82	10	22	31	22	24	28	14
Sr	382	340	426	119	249	256	269	467	197	92

Ba	176	178	609	61	176	179	98	156	148	70
Zr	145	116	73	132	55	75	62	42	64	69
Y	40	37	26	19	27	33	29	23	29	29
Li	32	67,8	50	6,9	13,9	28,1	13,9	3,2	13,8	16,9
Be	0,9	0,7	0,7	0,6	0,5	0,7	0,4	0,5	0,5	0,4
Sc	40,6	37,2	36,6	33	44,2	41,6	44,7	40,1	41,8	52,4
Ti	6377	6998	6212	3299	6824	7753	6629	6195	5532	6927
Nb	7,1	4,8	6,8	5,3	1,7	2,1	1,9	1,5	2	1,6
Mo	1,2	0,8	1,3	2	1,4	1,7	1,2	1,5	1,4	1,3
Ag	1,0	0,9	0,7	0,9	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4
Cd	0,4	0,6	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Cs	0,7	1,6	4,2	0,3	3	2,9	0,8	0,2	1,4	0,5
La	15,4	12,3	13	13	8	10	6,3	9,1	4,8	4,7
Ce	36	27,6	28,8	28,6	18,5	23,9	15,8	20,8	11,6	12,1
Pr	4,6	3,6	3,6	3,4	2,5	3,1	2,2	2,8	1,7	1,8
Nd	20,3	16,2	15,8	13,8	11,8	14,8	10,6	13	8,4	8,8
Sm	4,8	4,2	3,7	2,8	3,1	4	3	3,4	2,7	2,7
Eu	1,4	1,4	1,5	0,7	1,1	1,3	1,1	1,2	1,1	1
Gd	5,1	4,6	4,4	3	3,3	4,2	3,3	3,6	3,1	3
Tb	0,9	0,8	0,7	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
Dy	4,8	4,8	3,8	2,6	3,4	4,2	3,8	3,5	4	3,7
Ho	1	1	0,8	0,6	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8
Er	3	3	2,4	1,7	2,1	2,6	2,4	2,1	2,6	2,4
Tm	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3
Yb	3	2,9	2,3	1,7	2	2,4	2,2	2	2,6	2,3
Lu	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3
Hf	3,8	3,1	2,5	2,3	1,6	2,1	1,8	1,7	1,8	1,7
Ta	0,6	0,4	0,5	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
W	0,9	0,8	0,9	0,8	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,5
Bi	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Th	5,3	3,1	2,7	7,3	1,5	2,2	1,2	1,8	1,1	0,8
U	1,5	1,2	4,3	1,4	0,4	0,6	0,3	0,5	0,3	0,3

Примечание: 2, 8 – базальт (*basalt*); 1, 3, 5, 6, 7, 10 – трахибазальт (*trachybasalt*); 9 – андезибазальт (*andesibasalt*); 4 – трахиандезибазальт (*trachyandesibasalt*).

На AFM диаграмме $(Na_2O+K_2O)-FeOt-MgO$ (рис. 2) ФТ рассматриваемых вулканитов группируются в поле пород известково-щелочной серии. На диаграммах SiO_2 – петрогенные элементы видна отрицательная корреляция TiO_2 , MgO с SiO_2 . Содержания Na_2O , K_2O , CaO существенно варьируют при одних и тех же значениях SiO_2 . Это умеренно-титанистые, умеренно- и низкомагнезиальные, с невысоким сильно варьирующим $Mg^{\#}$ (0,36–0,57), умеренно- и высокоглиноземистые ($Al^I=0,89–3,89$), умеренно- и высококалиевые образования с калинатовым и натровым типами щелочности $Na_2O/K_2O=2,2–6,3$. U/Th отношение в большинстве случаев $0,3 < 1,0$ указывает на неизменность составов пород наложенными процессами.

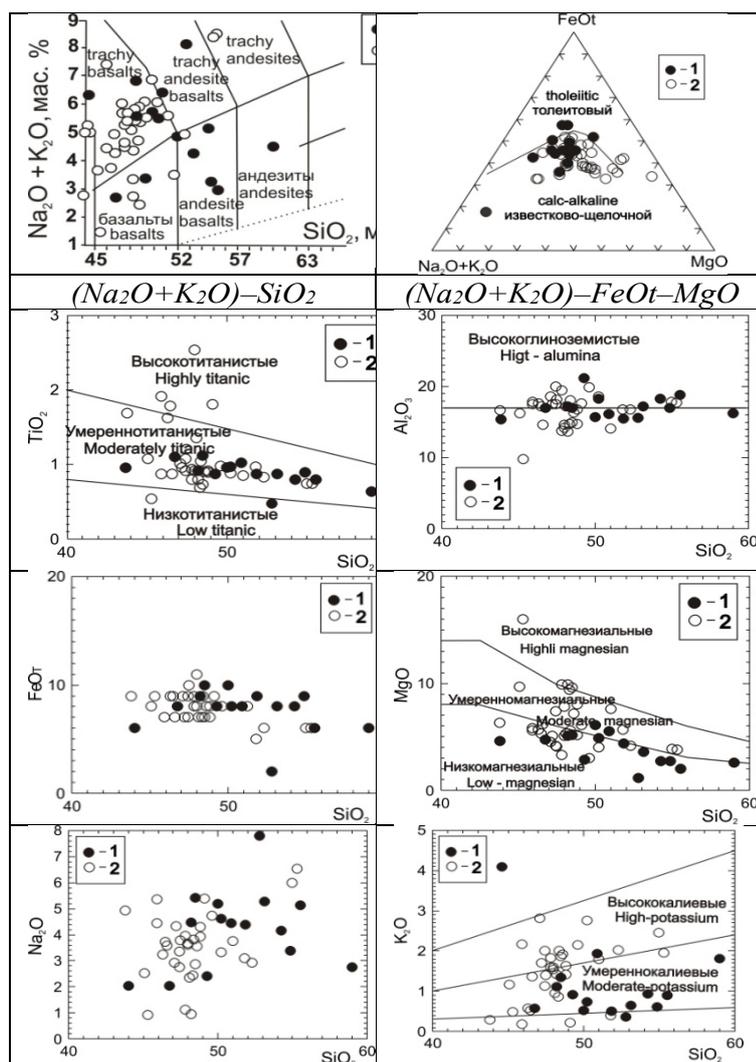


Рис. 2. Составы вулканитов на классификационных диаграммах и диаграммах концентраций петрогенных компонентов (в мас. %).

Условные обозначения: Районы опробования вулканитов (1) Южная Осетия; (2) Абхазия [Менгел и др., 1993] /

Fig. 2. Compositions of volcanics on classification diagrams and diagrams of concentrations of petrogenetic components (in wt.%). Symbols: Volcanic sampling areas (1) – South Ossetia; (2) – Abkhazia [Mengel et al., 1993]

На дискриминационной диаграмме (ДД) $Y/15 - La/10 - Nb/8$ [Cabanis, Lecomte, 1989] (рис. 3) ФТ пород располагаются в полях толеитовых и известково-щелочных базальтов вулканических дуг и континентальных базальтов. K/Rb отношение, часто используемое чтобы показать зависимость между мощностью гранитного слоя и металлогенией, в породах ПС варьирует от 428 до 282, что соответствует континентальным базальтам (400) и андезитам (250). На ДД $Nb \times 2 - Zr/4 - Y$ [Meschede, 1986] ФТ расположены в полях базальтов $N-MORB$ и $E-MORB$ типов. На ДД $TiO_2 - K_2O$ [Мионов и др., 1999] ФТ сгруппированы в полях базальтов островных дуг и частично задуговых зон спрединга. На ДД $Th/Yb - Ta/Yb$ [Gorton, Schandl, 2000] – в поле АСМ – пород активных континентальных окраин. На ДД $Nb/Y - Zr/Y$ [Condie, 2005], где выделены геодинамические обстановки и компоненты дающие вклад в образование базальтов, ФТ группируются вблизи линии ΔNb в поле базальтов оке-

анических плато и островодужных базальтов, между точками РМ – примитивной мантии и EN – мантии с обогащенной компонентой. На ДД $Sm/Yb - La/Sm$ [Школьник и др., 2009] ФТ группируются вдоль тренда плавления шпинелевых перидотитов. Степень плавления субстрата в пределах 1–5%. Отношение Ni/Co варьирует в интервале 0,3–5,6 со средними значениями: в Южной Осетии 1,0; в Абхазии и Краснодарском крае 1,9. $Ni/Co \geq 3$ свидетельствует о мантийном генезисе магм и вероятно о их дифференциации в промежуточных очагах ($Ni/Co < 2.5$) [Мустафаев, 2003].

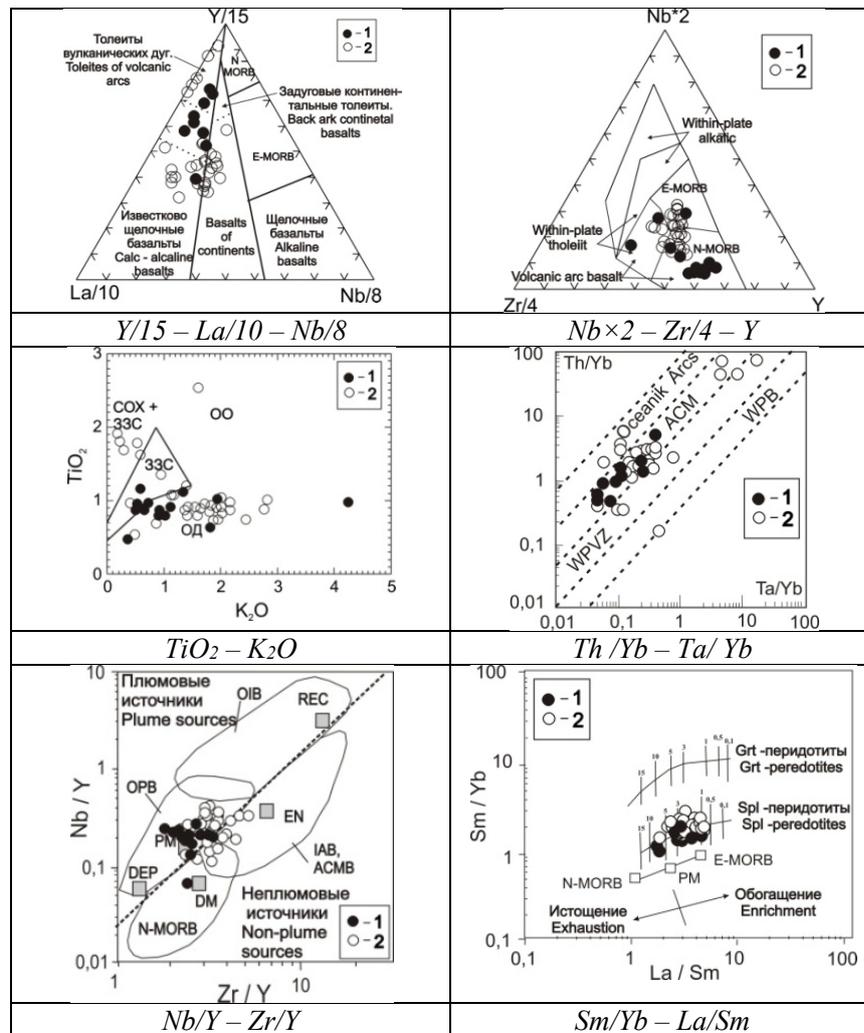


Рис. 3. Составы пород на дискриминационных и петрогенетических диаграммах. На диаграммах: $TiO_2 - K_2O$ поля составов базальтов COX – срединно-океанических хребтов, OO – океанических островов, 33C – задуговых зон спрединга, OD – островных дуг; $Th/Yb - Ta/Yb$ Oceanic Arcs – океанических дуг, ACM – активных континентальных окраин, WPVZ – внутриплитных вулканических зон, WPB – внутриплитных базальтов; $Nb/Y - Zr/Y$ OIB базальты океанических островов, OPB – базальты океанических плато, MORB – базальты срединно-океанических хребтов, РМ – примитивная мантия, ДМ – верхняя деплетированная мантия, ДЕР – нижняя деплетированная мантия, EN – обогащенная компонента /

Fig. 3. Rock compositions on discrimination and petrogenetic diagrams. In the diagrams: $TiO_2 - K_2O$ compositional fields of basalts MOR – mid-ocean ridges, OO – oceanic islands, WZS – back-arc spreading zones, OD – island arcs; $Th/Yb - Ta/Yb$ Oceanic Arcs – oceanic arcs, ACM – active continental margins, WPVZ – intraplate volcanic zones, WPB – intraplate basalts; $Nb/Y - Zr/Y$ OIB oceanic island basalts, OPB oceanic plateau basalts, MORB mid-ocean ridge basalts, PM primitive mantle, DM upper depleted mantle, DER lower depleted mantle, EN enriched component

Редкие земли (*REE*) в вулканитах, нормированные к хондриту [Sun, McDonough, 1989] (рис. 4) имеют фракционированные тренды распределения *REE*, близкие с трендом *E-MORB* или занимают промежуточное положение между типичными составами *E-MORB* и *OIB*. La_n/Yb_n отношение (показатель степени фракционирования *REE*) варьирует от 1,3 до 5,4; $La_n/Sm_n = 1,1-3,0$; $Gd_n/Yb_n = 1,0-1,6$. Величина Eu/Eu^* (где $Eu^* = (Sm_n + Gd_n)/2$) варьирует в пределах 0,7–1,1. ΣREE 45–101 г/т; Σ/n 68 (n=10). На мультиэлементной диаграмме несовместимых элементов показаны их концентрации, нормированные по *N-MORB* [Sun, McDonough, 1989]; отмечается, что спектры вулканитов ПС (рис. 4) сопоставимы с базальтами *E-MORB*. Некоторые отличия от которых заключаются в наличии отрицательных *Ta*, *Nb* аномалий, положительной аномалии *K*, а также в более высоких концентрациях крупноионных элементов *Rb*, *Ba*, *Th*, *U* и *Sr*. Сравнение кларковых величин концентрации ($Kk \geq 1,0$) базальтов из Южной Осетии $Ag_{6,5} Be_{2,2} Bi_{2,0} U_{1,8} Pb_{1,7} Cd_{1,6} Li_{1,6} Cu_{1,5} Th_{1,5} Cs_{1,5} Sc_{1,3} Zn_{1,0}$ и Абхазии (по опубликованным элементам) [Менгел и др., 1993] $Th_{2,3} Li_{1,5} Ba_{1,2} Sr_{1,1} Co_{1,1} Nb_{1,0} (Zn_{0,9})$ с породными эталонами из разных геодинамических обстановок [Гусев и др., 1999] показывает, что они сопоставимы с образованиями островных дуг и краевых вулcano-плутонических поясов активных континентальных окраин.

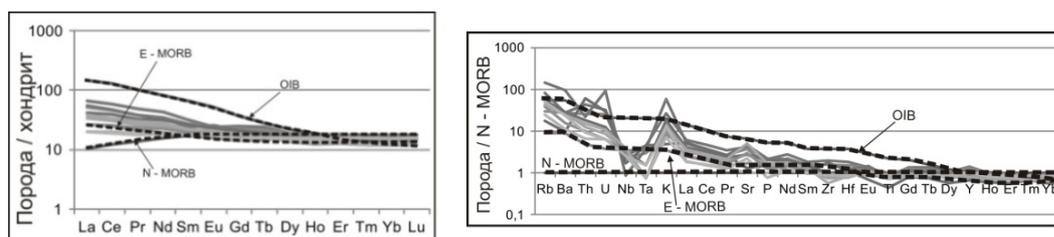


Рис. 4. Составы пород на спайдер-диаграммах.
Концентрации несовместимых элементов, нормированы по *N-MORB*,
Концентрации *REE*, нормированы к хондриту по [Sun, McDonough, 1989] /

Fig. 4. Compositions of rocks on spider diagrams.
Concentrations of incompatible elements normalized to *N-MORB*, *REE* concentrations normalized to chondrite according to [Sun, McDonough, 1989]

Вулканиты «Порфиритовой серии» относятся к образованиям среднеюрского вулканического пояса простирающегося на 1500 км, от Южного Крыма до Южного Каспия. Вулканическая активность началась здесь после фазы регионального сжатия на границе аалена и байоса. Накопление вулканитов ПС происходило в морской, преимущественно мелководной, обстановке. Геодинамическая интерпретация условий образования данного вулканического пояса дискуссионна, но большинство исследователей связывает его формирование с зоной/зонами субдукции и отмечают, что данный пояс маркировал юрскую окраину континента на границе с океаном Нео-Тетис. [Никишин и др., 2005; Леонов и др., 2007; McCann et al., 2010]. Изученные вулканиты – это умеренно- и низкомагнезиальные образования. Их исходные расплавы формировались при частичном, 1–5% плавлении шпинелевых перидотитов не примитивной, а вероятно несколько более обогащенной (метасоматизированной) мантии. Слабо дифференцированный в области *TREE* спектр распределения ($Gd_n/Yb_n = 1,0-1,6$) указывает на отсутствие остаточного граната в мантийном источнике. Постоянство состава и единые тренды ФТ пород на петрохимических диаграммах для пород от Южной Осетии до Абхазии и Краснодарско-

го края позволяют предположить существование для них единой исходной магмы. Значения $Mg^{\#}=0,36-0,57$ указывают на то, что расплав, из которого сформировались вулканиты, был частично дифференцирован за счет фракционирования оливина и возможно пироксена. Присутствие в породах ситовидных плагиоклазов с включениями стекла свидетельствует о неравновесном росте кристаллов из «перехлажденного» расплава, либо с их полибарической кристаллизацией при подъеме последнего [Kuritani, 1999], указывая на сложную эволюцию исходных расплавов. Следует отметить, что породы ПС обогащены *Ba*, *U*, *Sr*; являющимися индикаторами флюидного «субдукционного» компонента, а повышенные содержания *Th*, немобильного в водном флюиде, могут свидетельствовать, об участии осадочного компонента в магмогенезисе [Мартынов, 2010; Школьник и др., 2009]. На дискриминационных диаграммах ФТ пород группируются в полях толеитовых и известково-щелочных базальтов островных дуг (ОД) и активных континентальных окраин (АКО). По геохимическим критериям (*K/K* рудных элементов) они также сопоставимы с породами ОД и АКО. Редкие земли нормированные к хондриту [Sun, McDonough, 1989] характеризуются фракционированными трендами распределения *REE*, близкими с базальтами *E-MORB* типа и отсутствием значительных аномалий европия ($Eu/Eu^* = 0,7-1,1$). По этому критерию, вулканиты ПС сходны с породами среднеюрского «Задугового» дайкового пояса БК и с мафическими породами «Чегем-Черекского», «Карачаевского», «Западно-Кавказского» вулканических районов. С другой стороны они отличаются от раннеюрских образований диабаз-пикритовой формации БК, характеризующихся спектрами *REE N-MORB* типа. Отметим, что базальтоиды «Задугового» пояса имеют более высокие содержания титана (1,1–2,5%) и четкий толеитовый тренд дифференциации пород [Газеев и др., 2018], по-видимому, это указывает на то, что вулканиты ПС формировались в зоне более обогащенной флюидными компонентами. Известно, что с юрскими вулканоплутоническими комплексами, имеющими широкое распространение на территории БК и Скифской плиты, связаны многочисленные рудные объекты. Здесь выделяют несколько киммерийских металлогенических зон, наиболее значимыми среди которых являются: Приводораздельная металлогеническая зона (ПМЗ) и Северо-Кавказский полиметаллический пояс (СКПП). В ПМЗ в связи с эффузивными и гипабиссальными породами основного состава сформировались месторождения с медно-пирротинным (Кизил-Дере), колчеданно-полиметаллическим (Филизчай), а также рудопроявления с кварц-халькопиритовым и кобальтовым оруденением. В СКПП присутствуют многочисленные серебро-свинцово-цинковые месторождения (Садон, Згид, Фаснал и др.) ассоциирующие с породами среднего и кислого состава [Черницын, 1977]. Обычно при палеогеодинамических исследованиях связь оруденения с вулканизмом устанавливается по их пространственной и временной близости. На устаревших картах полезных ископаемых 1955–1956 годов масштаба 1:200000 (Кавказская серия, листы К-38-ХI, ХII, ХIII) показаны вулканиты ПС с которыми ассоциируют баритовые, барит-полиметаллические, свинцово-цинковые, колчеданные рудопроявления и месторождения. Известно, что при формировании колчеданных и полиметаллических месторождений существенную роль играли приповерхностные магматические очаги. Они являлись источниками энергии для возникновения и функционирования конвективных гидротермальных систем, а вмещающие породы служили источником рудных компонентов экстрагируемых гидротермальными растворами [Миронов и др., 1999; Павлов, 1975]. В последние

десятилетия на БК, в результате целенаправленных поисков, открыты рудные объекты «черно-сланцевого» золото-серебро-полиметаллического и золото-платиноидного с полиметаллами типов оруденения [Гурбанов и др., 2021]. Очевидно, что зона развития вулканитов ПС является перспективной для подобных исследований, и в первую очередь, это территории с приповерхностными магматическими очагами, зонами вторичных изменений вулканитов и вмещающих углеродистых флиш-идных (черносланцевых) толщ.

Выводы

Изучены петрохимические особенности байосских вулканогенных пород относимых к «Порфиритовой серии» Южного склона Большого Кавказа. Показано, что вулканиты представлены преимущественно умеренно- и низкомагнезиальными, умеренно- и высококалиевыми базальтами, трахибазальтами, андезибазальтами, трахиандезибазальтами с калинатровым и натровым типами щелочности. Их исходные расплавы образованы при плавлении шпинелевых перидотитов, а производные этих расплавов близки к базальтам *E-MORB* типа, отличаясь от последних наличием отрицательных аномалий *Ta*, *Nb*, и более высокими концентрациями крупноионных элементов *K*, *Rb*, *Ba*, *Th*, *U* и *Sr*. По геохимическим и петрохимическим критериям изученные породы сопоставимы с породами островных дуг и активных континентальных окраин. Установлено, что вулканиты ПС южного склона БК близки по ряду своих характеристик к породам среднеюрского «Задугового» дайкового пояса БК, но сформировались в отличие от них в зоне более обогащенной флюидными компонентами. Показано, что с вулканитами ассоциируют баритовые, барит-полиметаллические, свинцово-цинковые, колчеданные рудопрооявления и месторождения. Предполагается, что зона развития вулканитов ПС является перспективной для поиска объектов «черносланцевого» золото-серебро-полиметаллического и золото-платиноидного с полиметаллами типов оруденения.

Литература

1. Абдуллаев Р.Н. Мезозойский вулканизм Северо-Восточной части Малого Кавказа. – Баку: Изд. АН Азерб. ССР, 1963. – 218 с.
2. Борсук А.М. Мезозойские и кайнозойские магматические формации Большого Кавказа. – М.: Наука, 1979. – 300 с.
3. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Основные породы среднеюрского задугового дайкового пояса Большого Кавказа (геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация). // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №2. – С. 16–29. DOI: 10.23671/VNC.2018.2.13925
4. Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Газеев В.М., Гурбанова О.А. Аномально высокие содержания благородных металлов в отходах Фиагдонской обогатительной фабрики: возможный новый для Северного Кавказа золото-платиноидный с полиметаллами тип оруденения. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 6–21. DOI: 10.46698/VNC.2021.41.26.001
5. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гушин А.В. и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.
6. Леонов Ю.Г., Демина Л.И., Копп М.Л., Короновский Н.В. и др. Большой Кавказ в альпийскую эпоху. – М.: ГЕОС, 2007. – 340с.
7. Лаврищев И.Н., Пруцкий Н.И., Семенов В.Г. и др. Государственная геологическая карта РФ. К-37-V (Красная Поляна). // Об. Записка. – 2001. – 204 с.

8. Мартынов Ю.А. Основы магматической геохимии. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 215 с.
9. Менгел К., Ведеполь К.Х., Гурбанов А.Г., Борсук А.М. Среднеюрский вулканизм южного склона Большого Кавказа: Характеристика процессов магматизма и гидротермальных изменений. // Магматизм рифтов и складчатых поясов. – М.: Наука, 1993. – 288 с.
10. Миронов Ю.В., Емельянова Е.А., Зорина Ю.Г., Мирлин Е.Г. Вулканизм и океаническое колчеданообразование. – М.: Научный мир, 1999. – 147 с.
11. Мустафаев М.А. Раннеюрский вулканизм зоны растяжения Большекавказской системы Мезотетиса. // Изв. НАН Азербайджана. Науки о земле. – 2003. – №1. – С. 40–49.
12. Никишин А.М., Фокин П.Л., Тихомиров Е.Ю. и др. 400 миллионов лет геологической истории южной части Восточной Европы. – М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС, 2005. – 351 с.
13. Павлов Д.И., Экзогенные хлоридные воды и эндогенное рудообразование. – М.: Недра, 1975. – 89 с.
14. Черницын В.Б. Металлогения Большого Кавказа. – М.: Недра, 1977. – 185 с.
15. Школьник С.И., Резницкий Л.З., Беличенко В.Г., Бараш И.Г. Геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация метавулкаников Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион). // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. №9. – С. 1013–1024.
16. Cabanis V., lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de mélange et/ou contamination crustale. // C. R. Acad. Sci. Ser. II. – 1989. – Vol. 309. – pp. 2023-2029.
17. Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. // Lithos. – 2005. – Vol. 79. – pp. 491-504.
18. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. // The Canadian Mineralogist. – 2000. – Vol. 38. – pp. 1065-1073.
19. McCann T., Chalont-Prat F., Saintot A. The Early Mesozoic evolution of the Western Greater Caucasus (Russia): Triassic-Jurassic sedimentary and magmatic history. // Geological Society. London. Special publications. – 2010. – Vol. 350. – pp. 181-238.
20. Kuritani T. Phenocryst crystallization during ascent of alkali basalt magma at Rishiri Volcano, Northern Japan. // J. Volcanol. Geotherm. Res. – 1999. – Vol. 88. No.1-2. – pp. 77-97.
21. Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. // Chemical Geol. – 1986. – Vol. 56. – pp. 207-218.
22. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // Geol. Spec. Publ. – 1989. – No.42. – pp. 313-345.

References

1. Abdullaev R.N. Mesozoic volcanism of the North-Eastern part of the Lesser Caucasus. Baku, AS of the Azerbaijan SSR. 1963. 218 p. (In Russ.)
2. Borsuk A.M. Mesozoic and Cenozoic igneous formations of the Greater Caucasus. Moscow. Nauka. 1979. 300 p. (In Russ.)
3. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. the basic rocks of Middle-Jurassic back-arc dike belt of big Caucasus: geochemistry, the questions of petrogenetic and geodynamics typification. *Geology and geophysics of Russian South*. 2018. No. 2. pp. 16–29. DOI: 10.23671/VNC.2018.2.13925. (In Russ.)
4. Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Gazeev V. M., Gurbanova O. A. Abnormally high content of noble metals in wastes of the Fiagdon concentration plant: a possible new type of mineralization for the North Caucasus is gold-platinoid with base metals, localized in the Early-Middle Jurassic black shales. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 6–21. DOI: 10.46698/VNC.2021.41.26.001. (In Russ.)

5. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V. et al. Geochemical and metallogenic specialization of structural and material complexes. Saint Petersburg. VSEGEI, 1999. 514 p. (In Russ.)
6. Leonov Yu.G., Demina L.I., Kopp M.L., Koronovsky N.V. et al. Greater Caucasus in the Alpine era. Moscow. GEOS, 2007. 340 p. (In Russ.)
7. Lavrishchev I.N., Prutsky N.I., Semenov V.G. et al. State geological map of the Russian Federation. K-37-V (Krasnaya Polyana). Explanatory Note. 2001. 204 p. (In Russ.)
8. Martynov Yu.A. Fundamentals of magmatic geochemistry. Vladivostok. Dalnauka, 2010. 215 p. (In Russ.)
9. Mengel K., Vedepol K.H., Gurbanov A.G., Borsuk A.M. Middle Jurassic volcanism of the southern slope of the Greater Caucasus: Characteristics of the processes of magmatism and hydrothermal changes. In: Magmatism of rifts and fold belts. Moscow. Nauka, 1993. 288 p. (In Russ.)
10. Mironov Yu.V., Emelyanova E.A., Zorina Yu.G., Mirlin E.G. Volcanism and oceanic pyrite formation. Moscow. Nauchnyy mir, 1999. 147 p. (In Russ.)
11. Mustafayev M.A. Early Jurassic volcanism of the extension zone of the Greater Caucasus Mesotethys system. Transactions of ANAS. Geosciences. 2003. No. 1. pp. 40–49. (In Russ.)
12. Nikishin A.M., Fokin P.L., Tikhomirov E.Yu. et al. 400 million years of geological history of the southern part of Eastern Europe. Moscow. GEOCART. GEOS, 2005. 351 p. (In Russ.)
13. Pavlov D.I. Exogenous chloride waters and endogenous ore formation. Moscow. Nedra, 1975. 89 p. (In Russ.)
14. Chernitsyn V.B. Metallogeny of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra, 1977. 185 p. (In Russ.)
15. Shkol'nik S.I., Reznitskii L.Z., Belichenko V.G., Barash I.G. Geochemistry, petrogenesis, and geodynamic typification of metavolcanics of the Tunka terrane (Baikal–Hövsögl region). Russian Geology and Geophysics, Vol. 50, Issue 9, 2009, pp. 779–788, DOI: 10.1016/j.rgg.2009.08.003.
16. Cabanis B., lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de mélange et/ou contamination crustale. C. R. Acad. Sci. Ser. II. 1989. Vol. 309. pp. 2023–2029.
17. Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. Lithos. 2005. Vol. 79. pp. 491–504.
18. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. The Canadian Mineralogist. 2000. Vol. 38. pp. 1065–1073.
19. McCann T., Chalont-Prat F., Saintot A. The Early Mesozoic evolution of the Western Greater Caucasus (Russia): Triassic-Jurassic sedimentary and magmatic history. Geological Society. London. Special publications. 2010. Vol. 350. pp. 181–238.
20. Kuritani T. Phenocryst crystallization during ascent of alkali basalt magma at Rishiri Volcano, Northern Japan. J. Volcanol. Geotherm. Res. 1999. Vol. 88. No.1–2. pp. 77–97.
21. Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chemical Geol. 1986. Vol. 56. pp. 207–218.
22. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. Geol. Spec. Publ. 1989. No.42. pp. 313–345.

УДК 550.4+504.4.054

DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008

Оригинальная статья

Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса

В.Е. Закруткин , В.Н. Решетняк , Е.В. Гибков , Г.Ю. Скляренко 

Южный федеральный университет,
Россия, 344090, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40,
e-mail: vezak@sfedu.ru

Статья поступила: 01.06.2023, доработана: 26.08.2023, одобрена к публикации: 01.09.2023

Резюме: Актуальность работы. Восточный Донбасс – территория на западе Ростовской области, где на протяжении многих десятков лет в процессе разработки угольных месторождений и последующей ликвидации нерентабельных шахт мощному техногенному воздействию подвергались все компоненты окружающей среды, но особенно речные системы. Важнейшей составляющей последних являются, как известно, донные отложения, которые несут информацию о степени загрязнения водной среды, об экологическом состоянии обширных водосборных площадей, об условиях седиментации, характере и направленности постседиментационных, в первую очередь диагенетических процессов. **Цель исследований.** Изучение аутигенных минералов железа в речных отложениях Восточного Донбасса, оценка влияния техногенного фактора в диагенетическом минералообразовании. **Методы исследований.** Изучение ассоциации аутигенных минералов железа выполнено методами электронно-зондовых исследований на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU с системой энергодисперсионного микроанализа. **Результаты исследований.** Аутигенные минералы железа представлены в донных отложениях гидроксидами (ферригидритом) и оксидами (магнетитом) железа, реже сульфидами (пиритом) и карбонатами (сидеритом). Они образуются в существенно пелитовых илах, обогащенных современным органическим веществом, и являются членами одного минералогического ряда. Наблюдаемая ассоциация аутигенных минералов железа формируется при совокупном влиянии природных и антропогенных факторов. Среди последних важную роль играют техногенные шахтные воды – основной источник железа, сульфатов и других компонентов в речных отложениях. Формирование аутигенных минералов железа происходит в нестабильных физико-химических условиях, что характерно для раннего этапа диагенеза. Об этом свидетельствуют: присутствие в ассоциации аутигенных минералов наряду с оксидами и гидроксидами железа сульфидов и железосодержащих карбонатов; рентгеноаморфное состояние минеральных масс, наличие псевдоморфоз, отсутствие четко выраженной структуры кристаллов, свидетельствующее о незавершенности процессов минералообразования в донных осадках. Подчеркнуто, что на раннем этапе диагенеза изученных речных отложений наиболее предпочтительным с энергетической точки зрения является формирование из гидроксидов железа магнетита. Именно «магнетитовая реакция» начинается раньше, протекает быстрее и с меньшими затратами органического вещества, чем «сидеритовая» и тем более «пиритовая».

Ключевые слова: донные отложения, Восточный Донбасс, угледобывающая промышленность, аутигенное минералообразование, техногенные шахтные воды.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-27-00305, <https://rscf.ru/project/22-27-00305/> в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Гибков Е.В., Скляренко Г.Ю. Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 102-121. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008.

DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008

Original paper

Authigenic Iron Minerals in River Sediments of the Eastern Donbass

V.E. Zakrutkin , V.N. Reshetnyak , E.V. Gibkov , G.Yu. Sklyarenko 

Southern Federal University,
40 R. Zorge Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation,
e-mail: vezak@sfedu.ru

Received: 01.06.2023, revised: 26.08.2023, accepted: 01.09.2023

Abstract: Relevance. Eastern Donbass is a territory in the western part of the Rostov region, where all environmental components, but especially river systems were subjected to heavy technogenic impact for many decades in the process of developing coal deposits and the subsequent liquidation of unprofitable mines. As it is known, the most important component of the river systems river sediments, which carry information about the pollution degree of the aquatic environment, the ecological state of entire catchment areas, the sedimentation conditions, the nature and direction of post-sedimentation processes, primarily diagenetic ones. **Aim.** Investigation of authigenic iron minerals in river sediments of the Eastern Donbass, assessment of the technogenic factor effect on diagenetic mineral formation. **Methods.** The study of the authigenic iron minerals assemblage have carried out using electron probe methods on a scanning electron microscope VEGA II LMU with an energy dispersive microanalysis system. **Results.** Authigenic iron minerals are represented in river sediments by iron hydroxides (ferrihydrite) and oxides (magnetite), and, less frequently, sulfides (pyrite) and carbonates (siderite). They are formed in essentially pelitic silts enriched in organic matter of modern origin, and these minerals are members of the same mineralogical series. The observed authigenic iron minerals assemblage is produced under the combined influence of natural and anthropogenic factors. Among the latter technogenic mine waters play an important role as the main source of iron, sulfates and other components in river sediments. The formation of authigenic iron minerals occurs under unstable physicochemical conditions, which is typical for the early stage of diagenesis. This is evidenced by the presence of authigenic minerals (iron oxides and hydroxides along with sulfides and ferruginous carbonates) in mineral assemblage, X-ray amorphous state of mineral masses, the presence of pseudomorphs, the absence of a clearly defined crystal structure indicating the incompleteness of mineral formation processes in river sediments. It is emphasized that the magnetite formation from iron hydroxides is most preferable from the energetic point of view at the early stage of diagenesis of the river sediments studied. It is the “magnetite reaction” that starts earlier, proceeds faster and requires less organic matter than the “siderite” and even more so “pyrite” reaction.

Keywords: river sediments, Eastern Donbass, coal mining industry, authigenic mineral formation, technogenic mine waters.

Acknowledgments: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-27-00305.

For citation: Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu. Authigenic Iron Minerals in River Sediments of the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(3): 101-121. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008.

Введение

Восточный Донбасс – территория на западе Ростовской области, где на протяжении многих десятков лет в процессе разработки угольных месторождений и последующей ликвидации нерентабельных шахт мощному техногенному воздействию

подвергались все компоненты окружающей среды, но особенно речные системы. Важнейшей составляющей последних являются, как известно, донные отложения, которые несут информацию не только о степени загрязнения водной среды, но и об экологическом состоянии обширных водосборных площадей.

Геохимические особенности донных отложений Восточного Донбасса изучены довольно обстоятельно [Закруткин и др., 2016, 2022]. Гораздо меньше внимания уделялось исследованию их минерального состава, в первую очередь аутигенному комплексу минералов. В составе этого комплекса, как известно, особое место занимают минералы железа, которые, благодаря своему разнообразию, являются важным источником информации об условиях седиментации, характере и направленности постседиментационных, в первую очередь диагенетических процессов.

Исследованиям диагенетических процессов в современных осадках морей и океанов посвящена огромная литература. Что касается континентальных водоемов и особенно речных систем, то степень их изученности в таком плане несопоставимо ниже. Поэтому целью настоящей работы является попытка в определенной мере восполнить этот пробел, акцентировав внимание на роли техногенного фактора в диагенетическом минералообразовании.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись донные отложения рек бассейнов Северского Донца (Большая Каменка, Малая Каменка, Лихая, Кундрючья и Большая Гнилуша) и Тузлова (Большой Несветай, Малый Несветай, Аюта, Атюхта и Тузлов) в пределах Ростовской области. Все реки, кроме Кундрючья, Лихой и Тузлова, относятся к категории малых.

Донные отложения изученных рек с точки зрения гранулометрического состава представляют собой илы пелитовой, алевропелитовой и песчаной размерности частиц, а также смешанные слабосортированные осадки (хлидолиты). В донных осадках исследуемых рек в большинстве случаев доминирует пелитовая фракция.

В составе тяжелой фракции преобладают ильменит, магнетит и гидроокислы железа. В отдельных случаях значительная доля тяжелой фракции приходится на аутигенный пирит. В меньших количествах встречаются карбонаты, представленные сидеритом и кальцитом.

Опробование донных отложений, как правило, осуществлялось в верховьях, среднем течении и устьевых участках рек согласно нормативным документам (ГОСТ 17.1.5.01-80, 2002; ГОСТ Р 51232-98, 1999) с использованием дночерпателя Ван-Вина. В связи с гранулометрической неоднородностью аллювия каждую пробу составляли из нескольких (обычно 3–5) частных проб, охватывающих всю ширину русла. Сеть наблюдательных створов равномерно охватывает исследуемый район, что позволяет выявить особенности диагенетического минералообразования в речных осадках в условиях различного по силе техногенного воздействия.

Гранулометрический состав определялся ситовым, пипеточным и комбинированными методами. Определение минерального состава частиц песчано-алевритовой размерности осуществлялось под бинокулярным микроскопом после отмучивания осадка и обработки иммерсионными препаратами с последующим делением на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции.

Изучение ассоциации аутигенных микроминералов выполнено методами электронно-зондовых исследований. Изучались образцы илов, нанесенные на предметные стекла в виде суспензии. Измерения выполнены в «Центре исследований ми-

нерального сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета на растровом электронном микроскопе *VEGA II LMU* (фирмы *Tescan*) с системой энергодисперсионного микроанализа *INCA ENERGY 450/XT*. Поверхность образцов напылялась углеродом. Элементный состав минеральных фаз приведен в виде энергетических спектров (*EDX*), поскольку загрязнённость поверхности пелитовыми микрочастицами, наличие сростаний и неровность поверхности исключают проведение количественного микроанализа (аналитик – Ю.В. Попов).

Результаты работы и их обсуждение

Аутигенные минералы железа сконцентрированы преимущественно в тяжелой фракции. Исключением являются гидроокислы железа, которые в значительных количествах присутствуют также в пелитовой и в песчано-алевритовой составляющих. В таблице 1 приведены данные о минеральном составе донных отложений в створах, где содержание аутигенных минералов железа в тяжелой фракции в сумме превышает 50%. Здесь же для сравнения представлена аналогичная информация по условно фоновым створам (среднее по 5 створам), в которых суммарное количество этих минералов менее 10%. Как видно из табличных данных, аутигенные минералы железа образуются, за редким исключением (створы 4.2 и 7.2), в существенно пелитовых илах, в отличие от условно фоновых створов, где в осадках преобладает более крупнозернистый материал. Это подтверждается и значениями петрохимического коэффициента «А», отражающего степень гранулометрической дифференциации вещества в процессе осадконакопления. Кроме того, аллювий с аутигенными минералами железа содержит в большем количестве современное органическое вещество и карбонатные минералы (в основном кальцит), что согласуется с величинами органо-кремниевого модуля (ППП/SiO₂).

Среди изученных аутигенных минералов доминируют гидроксиды и оксиды (магнетит) железа, в то время как сульфиды (пирит, марказит) и карбонаты железа (сидерит) занимают резко подчиненное положение. Показательно, что речные отложения бассейна Тузлова почти вдвое превосходят соответствующие образования бассейна Северского Донца по суммарному количеству аутигенных минералов железа (в расчете на осадок в целом). Это вполне объяснимо, если учесть, что в первом из названных бассейнов нагрузка высокоминерализованных, обогащенных железом техногенных шахтных вод на речные системы значительно выше, чем во втором [Гавришин и др., 2018; Закруткин и др., 2016].

Ниже приведена характеристика форм нахождения аутигенных минералов железа в речных отложениях Восточного Донбасса, а также условий их образования на ранних этапах диагенеза.

Гидроокислы железа. Основным источником железа в донных отложениях Восточного Донбасса являются техногенные шахтные воды, с которыми, как показывают несложные расчеты, в речную сеть ежегодно поступает около 800 тонн данного металла.

В речных водах железо мигрирует в виде собственной гидроокиси в составе тонкодисперсной взвеси глинистых минералов и различного рода органических соединений, поэтому основной причиной изменчивости его концентраций в донных отложениях является механическая дифференциация. Её результатом является приуроченность гидроокислов железа к существенно пелитовым осадкам. Вместе с тем, следует иметь в виду, что прямой зависимости между гидроокислами железа и глинистым веществом быть не может, поскольку и те, и другие поступают в речную сеть из разных источников.

Таблица 1/ Table 1

Минералогический состав и петрохимические показатели речных осадков /
Mineralogical composition and petrochemical parameters of river sediments

Река / River	Номер створа / Sampling point number	Тип осадка / Sediment type	Осадкообразующие терригенные минералы / Sedimentary terrigenous minerals					Акцессорные минералы / Accessory minerals	Кальцит / Calcite	Органическое вещество / Organic matter	Аутигенные минералы** / Authigenic minerals					Сумма / Total	A = (SiO ₂ + Na ₂ O + K ₂ O)/Al ₂ O ₃	mm/SiO ₂ / LOI/ SiO ₂
			Глинистые / Pelitic	Кварц / Quartz	Полевые шпаты / Feldspar	Обломки осадочных пород и угля / Clasts of sedimentary rocks and coal	Аксессорные минералы / Accessory minerals				Магнетит / Magnetite	Пирит, марказит / Pyrite, marcasite	Сидерит / Siderite	Сумма / Total	Гидроокислы железа / Iron hydroxides			
Бассейн реки Северский Донец / Seversky Donets River basin																		
Большая Каменка / Bolshaya Kamenka	15.1	Ил песчано-алевритово-пелитовый (П 69%, ПА 31%) Sandy-silty-pelitic alluvium (P 69%, SS 31%)	44	25	2	11	0,2	4	10	$\frac{1,3}{25,8}$	$\frac{0,7}{54,0}$	$\frac{<0,1}{<0,1}$	$\frac{<0,1}{1,3}$	$\frac{2,0}{81,1}$	99	4,4	0,2	
	15.2	Ил алевритово-пелитовый (П 87%, ПА 13%) Silty-pelitic alluvium (P 87%, SS 13%)	58	10	<0,1	9	<0,1	3	16	$\frac{1,2}{39,2}$	$\frac{0,1}{30,0}$	$\frac{<0,1}{5,0}$	$\frac{<0,1}{2,1}$	$\frac{1,3}{76,3}$	98	4,7	0,3	
Малая Каменка / Malaya Kamenka	17.1	Ил песчано-алевритово-пелитовый (П 61%, ПА 39%) Sandy-silty-pelitic alluvium (P 61%, SS 39%)	45	18	2	21	0,1	4	6	$\frac{0,9}{60,1}$	$\frac{0,1}{23,0}$	$\frac{<0,1}{<0,1}$	$\frac{<0,1}{4,6}$	$\frac{1,0}{87,7}$	98	4,5	0,2	
	17.2	Ил пелитово-песчано-алевритовый (ПА 67%, П 33%) Pelitic-sandy-silty alluvium (SS 67%, P 33%)	22	34	3	25	0,1	4	9	1,2	0,1	<0,1	<0,1	1,3	98	7,2	0,2	
Лихая / Likhaya	18.1	Ил песчано-алевритово-пелитовый (П 66%, ПА 34%) Sandy-silty-pelitic alluvium (P 66%, SS 34%)	34	15	2	17	0,1	21	8	$\frac{1,2}{46,7}$	$\frac{0,1}{18,0}$	$\frac{<0,1}{<0,1}$	$\frac{<0,1}{5,7}$	$\frac{1,3}{70,5}$	98	6,2	0,3	

2.2.	Ил песчано-алевритово-пелитовый (П 55%, ПА 45%) Sandy-silty-pelitic alluvium (P 55%, SS 45%)	41	30	2	16	0,2	2	5	1,9 55,8	<0,1 0,1	<0,1 <0,1	<0,1 <0,1	1,9 55,9	99	5,2	0,1
4.2.	Ил пелито-алевритово-песчаный (ПА 86%, П 14%) Pelitic-silty-sandy alluvium (SS 86%, P 14%)	7	47	3	19	0,1	5	11	3,3 21,7	0,2 35,0	<0,1 0,8	0,1 11,7	3,6 69,2	98	19,8	0,1
6.2.	Ил алевритово-пелитовый (П 89%, ПА 11%) Silty-pelitic alluvium (P 89%, SS 11%)	55	8	<0,1	4	<0,1	9	20	1,8 22,1	<0,1 33,0	<0,1 <0,1	<0,1 2,0	1,8 57,1	98	5,3	0,3
7.2.	Ил алевритово-песчаный (ПА 96%, П 4%) Silty-sandy alluvium (SS 96%, P 4%)	3	36	3	48	0,4	1	4	3,2 18,6	1,3 60,1	<0,1 <0,1	<0,1 0,4	4,5 79,0	99	10,3	0,3
12.2.	Ил пелитовый (П 91%, ПА 9%) Pelitic alluvium (P 91%, SS 9%)	47	9	<0,1	2	<0,1	15	24	0,9 3,0	<0,1 5,0	<0,1 52,5	<0,1 2,3	1,0 62,8	98	3,9	0,3
Среднее по бассейну / Basin average	Ил песчано-алевритово-пелитовый (П 57%, ПА 43%) Sandy-silty-pelitic alluvium (P 57%, SS 43%)	36	23	2	16	0,1	7	12	2,0 27,5	0,3 27,7	<0,1 8,9	<0,1 3,4	2,3 67,4	98	8,1	0,2

Среднее по двум бассейнам / Average for two basins	Ил песчано-алевритово-пелитовый (П 65 %, ПА 35 %) Sandy-silty-pelitic alluvium (P 65%, SS 35%)	43	19	2	13	0,1	8	12	1,4 34,0	0,3 34,4	≤0,1 4,6	≤0,1 3,5	1,7 76,5	99	6,1	0,3
Среднее по фоновым створам /	Ил пелитово-песчано-алевритовый (ПА 66%, П 34%) Pelitic-sandy-silty alluvium (SS 66%, P 34%)	15	54	4	14	0,2	1	9	≤0,1 2,8	≤0,1 0,3	≤0,1 <0,1	≤0,1 0,5	≤0,1 3,6	98	26,7	0,1
Average for background sampling points																

* - аллотигенные акцессорные минералы: ильменит, рутил, циркон, кианит, ставролит, турмалин, гранат; / allothigenic accessory minerals: ilmenite, rutile, zircon, kyanite, staurolite, tourmaline, garnet;
 ** - в числителе – содержание минералов в % от массы валовой пробы, в знаменателе – в % от выхода тяжелой фракции / in the numerator – the content of minerals in % of the mass of the gross sample, in the denominator – those in % of the mass of heavy fraction.

Оказавшись в осадке, водные оксиды железа первоначально образуют рентгеноаморфные агрегаты ферригидрита в виде налетов, пленок и волокнистых форм (рис. 1а). При дальнейшей дегидратации и понижении редокс-потенциала ферригидрит, как известно, переходит в гидрогетит, гётит, гематит и далее в магнетит. Однако, важно отметить, что все перечисленные минералы, за исключением магнетита, в изучаемых осадках нами не обнаружены. Поэтому вполне вероятно, что формирование магнетита за счет гидроокислов железа осуществлялось в основном напрямую, минуя промежуточные стадии. А это, в свою очередь, говорит о высокой скорости диагенетического минералообразования в неравновесных условиях.

Магнетит. Помимо горных пород эндогенного происхождения, аутигенный магнетит встречается в осадочных образованиях различного возраста, в современных морских и озерных осадках [Астахова, 2007; Георгиевский и др., 2005; Косарева и др., 2014; Курчатова, Рогов, 2018; Рейхард и др., 2015; Bakhmutov, Palliachenko, 2014; Semenov et al., 2017; Bauer et al., 2020; Channell et al., 2013; Dinarès-Turell et al., 2003; Lin et al., 2020; Roberts et al., 2012], а также в почвах [Алексеев и др., 2020; Водяницкий, 2013; Горохова и др., 2017]. Что же касается речных отложений, то сведения о новообразованиях данного минерала можно встретить лишь в единичных публикациях [Нуреев и др., 2022; Опекунов и др., 2021].

В речных отложениях Восточного Донбасса магнетит встречается в виде хорошо сохранившихся, незамещённых кристаллов размером 3–4 мкм, либо их агрегатов (рис. 1b). Кроме того, присутствуют агрегаты более мелких зерен магнетита, сцементированные глинистыми частицами (рис. 1c). Основная форма выделения минерала октаэдрическая (рис. 1d), реже – ромбододекаэдрическая (рис. 1e). Наряду с характерными октаэдрическими, ромбододекаэдрическими кристаллами магнетита, редко наблюдаются шестигранно-таблитчатые формы, свойственные гематиту. Они установлены в магнитной фракции донных осадков и отсутствуют – в электромагнитной, что предварительно позволяет отнести их к мушкетовиту – продукту замещения гематита магнетитом. Кристаллы мушкетовита обычно крупные, ступенчатого строения (рис. 1f), что свидетельствует о быстром их росте при высоких значениях пересыщения кристаллизационного раствора. Примечательно, что совместно с хорошо выраженными кристаллами магнетита встречаются сложные по форме ячеистые образования, у которых только намечаются октаэдрические контуры (рис. 1g). Они обнаружены и в древних отложениях [Георгиевский и др., 2005], а весь их облик свидетельствует о незаконченности процесса формирования кристаллов. Присутствие в осадках ярко выраженных разноразмерных, неодинаковых по форме выделений магнетита говорит о нестабильных во времени физико-химических условиях кристаллообразования и неоднородном составе кристаллообразующей среды, что типично для ранних этапов стадии диагенеза. О росте кристаллов в меняющихся условиях при значительном пересыщении раствора говорит и грубая комбинационная штриховка, которую можно встретить на гранях некоторых крупных кристаллов магнетита (рис. 1h).

Известно, что в донных осадках аутигенный магнетит образуется как биогенным, так и абиогенным путем. В свою очередь биогенный магнетит может быть биологически контролируемым и биологически индуцированным (стимулированным). В первом случае речь идёт о магнетите, который располагается внутриклеточно и образуется с прямым участием магнетотактических бактерий, которые полностью контролируют все этапы зарождения и роста минерала [Астафьева, 2021].

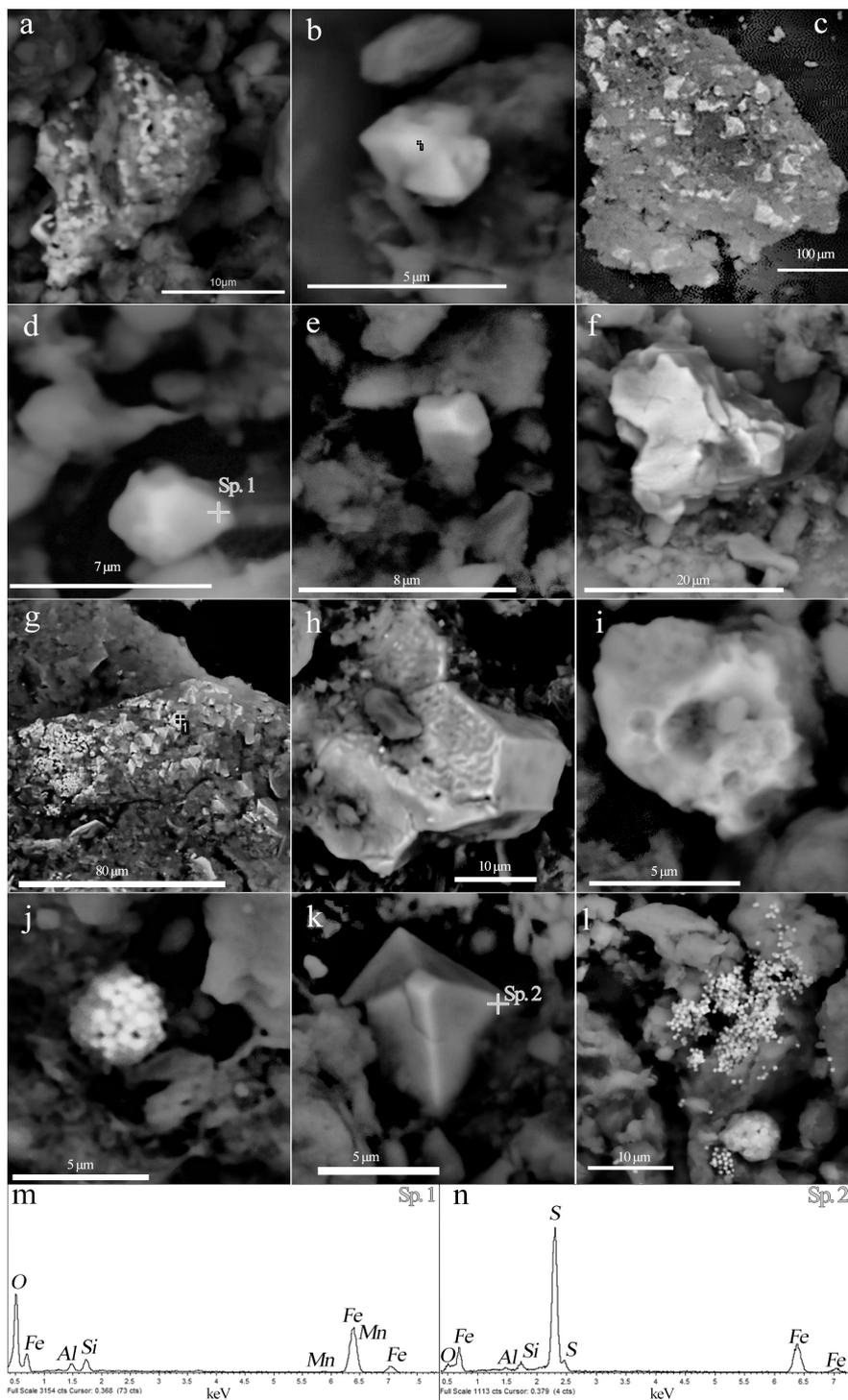


Рис. 1. Формы выделений гидроокислов железа, магнетита и пирита в речных осадках: (а) агрегат глинистого вещества, покрытый пленками водных оксидов железа; (б) агрегат кристаллов магнетита; (с) мелкие зерна магнетита, сцементированные глинистыми частицами; (д) октаэдрический кристалл магнетита; (е) ромбододэкаэдрический кристалл магнетита; (ф) кристалл мушкетовита ступенчатого строения; (г) агрегаты кристаллов магнетита, в левой части – ячеистые образования с намечающимися октаэдрическими формами; (h) кристалл магнетита с грубой комбинационной штриховкой на поперечной грани; (i) коллоидный агрегат гидротроилита; (j) фрамбоид пирита; (к) октаэдрический кристалл пирита; (л) фрамбоид пирита и россыпь мелких кристаллов пирита; (m) спектр октаэдрического кристалла магнетита 3d; (n) спектр октаэдрического кристалла пирита 3k /

Fig. 1. Forms of iron hydroxides, magnetite, and pyrite segregation in river sediments: (a) an aggregate of clay material covered with films of iron hydroxides; (b) an aggregate of magnetite crystals; (c) fine grains of magnetite cemented with clay; (d) an octahedral magnetite crystal; (e) a rhombic dodecahedral magnetite crystal; (f) stepped musketovite crystal; (g) aggregates of magnetite crystals, on the left side – cellular formations with emerging octahedral shapes; (h) magnetite crystal with rough combinational hatching on the transverse plane; (i) colloform hydrotroilite aggregate; (j) framboidal pyrite; (k) an octahedral pyrite crystal; (l) framboidal pyrite and placer of fine pyrite crystals; (m) spectrum of an octahedral magnetite crystal 3d; (n) spectrum of an octahedral pyrite crystal 3k

Морфологически он кристаллизуется в виде гексагональных призм, кубических кристаллов и образований каплевидной формы. В современных осадках магнетит встречается редко, в отличие от биологически индуцированного магнетита, в образовании которого принимают участие диссимиляционные железоредуцирующие бактерии, способные преобразовывать аморфную гидроокись железа в магнетит путем микробного восстановления трехвалентного железа. Формируется он внеклеточно, а его кристаллы имеют типичную для абиогенного магнетита октаэдрическую форму. Важно подчеркнуть, что как для абиогенного, так и бактериального магнетита (прямого и индуцированного) требуется присутствие в растворе свободного кислорода [Астафьева, 2021; Byrne et al., 2015]. Оптимальное его количество для образования биогенных форм составляет около 1 кПа. При содержании же кислорода менее 0,5 кПа магнетит не образуется.

Непременным условием образования аутигенного магнетита является присутствие в осадке избытка аморфной гидроокиси железа [Piepenbrock et al., 2011], поскольку при ее недостатке, как показали опыты Д.Г. Заварзиной [Заварзина, 2004], единственной восстановленной фазой Fe^{3+} является сидерит. Логично предположить, что обстановка, благоприятная для формирования в изучаемых донных отложениях главным образом магнетита, создается благодаря постоянному притоку значительных количеств гидроокислов железа.

Таким образом, образование магнетита в донных отложениях Восточного Донбасса осуществляется в открытых условиях при доступе в систему свободного кислорода из придонных слоев речной воды, а также гидроокислов железа из техногенных источников. Присутствие в осадках магнетита в основном в виде характерных для него октаэдрических кристаллов не противоречит гипотезе о его абиогенном и биологически индуцированном происхождении.

Пирит и марказит. Как отмечено выше, в речных отложениях Восточного Донбасса распространенность сульфидов железа невелика. В относительно существенных количествах они были обнаружены лишь в единичных створах двух рек – Лихая и Тузлов, где их содержания в тяжелой фракции составили соответственно 14 и 52%. Среди аутигенных сульфидов наиболее распространенным и устойчивым является пирит. Значительно реже встречается марказит. Кроме этих минералов в донных осадках присутствует гидротроилит – рентгеноаморфный коллоидальный водный моносольфид железа ($FeS \cdot nH_2O$), представляющий начальную стадию выпадения сульфидных минералов. Отмечается он в виде налетов, пятен, колломорфных агрегатов, мелких вкраплений (рис. 1i).

В донных отложениях Восточного Донбасса пирит представлен главным образом фрамбоидальными формами – сферическими агрегатами с плотной упаковкой одноразмерных микрокристаллов (рис. 1j). Некоторые фрамбоиды могут иметь внутри свободную полость. Размер фрамбоидов варьирует в пределах 5–10 мкм, а величина слагающих его микрокристаллов пирита не превышает 0,5 мкм. Помимо

фрамбоидов встречаются одиночные хорошо ограненные октаэдрические кристаллы (рис. 1*k*), а также россыпи микрокристаллов (рис. 1*l*), которые отражают последовательность формирования фрамбоидального пирита от зарождения свободных индивидов до сфероидов и глобул. Подобная последовательность отмечается также в озерных отложениях Южного Урала [Масленникова и др., 2012] и, по мнению Ю.Н. Нерадовского [Нерадовский и др., 2009], является типичной для раннедиагнетического пирита.

Несколько слов о марказите. Превращение гидроокиси железа в пирит, либо марказит зависит от величины рН иловых вод. Для пирита, в частности, необходима слабощелочная реакция среды, а для марказита – нейтральная, либо кислая, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. Последние, в частности показали, что марказит является доминирующим продуктом, образующимся в кислых растворах, в которых он имеет более высокие темпы роста, чем пирит [Schoonen, Barnes, 1991]. Однако, речные воды Восточного Донбасса вне зависимости от гидрологического сезона имеют, как правило, слабощелочную реакцию [Закруткин и др., 2016]. Поэтому условия, благоприятные для формирования марказита возникают в донных отложениях скорее всего лишь на строго локальных участках, вероятно, в местах непосредственного влияния кислых шахтных вод. Вместе с тем, необходимо иметь в виду, что марказит метастабилен по отношению к пириту и со временем превращается в пирит, поэтому в виде самостоятельных выделений он практически не встречается в исследуемых отложениях. Изредка его можно обнаружить совместно с пиритом в виде смешанных форм, с признаками незавершённого фазового перехода марказита в пирит.

Поскольку появление заметных количеств пирита зафиксировано лишь в единичных створах, то следует предположить, что его образование обусловлено дефицитом в осадках не железа, а сульфатной серы, которая выступает акцептором электронов в микробиологических процессах сульфатредукции, что согласуется с мнением и других авторов [Толстобров и др., 2011]. В самом деле, речные воды, как известно, содержат сульфат-ионов в 300 раз меньше, чем морские. Из-за их дефицита редукция сульфатов слабая, соответственно концентрация H_2S в поровых растворах донных осадков незначительная. Именно этим обстоятельством можно объяснить фрагментарное распространение сульфидов железа в речных отложениях Восточного Донбасса. Однако, на участках водотоков, подверженных сильному антропогенному загрязнению, интенсивность бактериального восстановления сульфатов, как отмечается в ряде работ [Романкевич, Ветров, 2001; Сапожников, Соколова, 1994], может возрасти вплоть до появления в водной среде существенных количеств свободного сероводорода, необходимого для образования сульфидов железа. В нашем случае ярким примером, подтверждающим эту точку зрения, является створ 12.2 реки Тузлов, где уровень загрязненности воды, установленный по величине УКИЗВ (7,05 – «экстремально грязная»), равно как и содержание в ней сульфатов (2208 мг/дм³) одни из самых высоких в Восточном Донбассе. Именно здесь в донных отложениях, как отмечено выше, установлены наибольшие количества аутигенного пирита.

Сидерит. Сидерит в донных отложениях, как и пирит, встречается в небольших количествах. Обычные его содержания в тяжелой фракции составляют 1–5% и лишь в двух створах рек Лихая и Малый Несветай обнаружены более существенные количества минерала (соответственно 14 и 12 %). При этом максимальные из

приведенных значений установлены в преимущественно пелитовых илах, где наряду с глинистыми минералами в значительных количествах (17%) присутствует органическое вещество современного происхождения (табл. 1). Из других аутигенных минералов железа совместно с сидеритом в донных осадках обнаружены гидроксиды железа и магнетит. В то же время в определенной степени запрещенным, как это видно из данных таблицы 1, можно считать парагенезис сидерита и пирита, что, как будет показано ниже, связано с различными условиями их формирования.

В изученных донных осадках сидерит присутствует в виде преимущественно совместных с кальцитом агрегатов кристаллов размером 20–30 мкм.

Помимо сидерита, как самостоятельного минерала, в донных отложениях нередко встречаются железосодержащий кальцит (феррокальцит) и кальцийсодержащий сидерит (сидеритоп). Морфологически они схожи с сидеритом и отличаются от него по химическому составу.

На характер карбонатного минералообразования в стадию диагенеза в значительной степени влияет концентрация растворенного сульфат-иона в поровых растворах донных осадков [Логвина, 2008]. Что касается сидерита, то его осаждение возможно только при крайне низком содержании сульфат-иона или полном его отсутствии, когда восстановительные реакции в осадке осуществляются не по сероводородному, а по так называемому глеевому типу. Этому способствует обилие органического вещества растительного происхождения, захороненного вместе с гидроокислами железа в существенно глинистых илах. Разложение органического вещества (как аэробное, так и анаэробное), как известно, сопровождается увеличением концентрации углекислоты в поровом растворе, что способствует переводу восстановленного двухвалентного железа в подвижную форму (в растворимом бикарбонате). Отток же углекислого газа из осадка в речную воду и соответствующее увеличение рН поровых вод, обеспечивают осаждение сидерита и других железосодержащих минералов.

Таким образом, антагонизм между пиритом и сидеритом обусловлен в нашем случае различной окислительно-восстановительной обстановкой, необходимой для их образования: глеевой для сидерита и других железосодержащих карбонатов, сероводородной – для пирита и марказита, хотя известно, что в морских осадках сидерит и пирит часто сосуществуют, но формируются они несинхронно, а на разных этапах стадии диагенеза.

Выводы

1. Среди изученных аутигенных минералов доминируют гидроксиды и оксиды (магнетит) железа, в то время как сульфиды (пирит, марказит) и карбонаты железа (сидерит) занимают резко подчиненное положение. Аутигенные минералы железа образуются в существенно пелитовых илах, обогащенных современным органическим веществом, что подтверждается соответствующими петрохимическими модулями. Они являются членами одного минералогического ряда, в пределах которого связаны между собой через изменения окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий среды, деятельности сульфатредуцирующих бактерий.

2. Наблюдаемая ассоциация аутигенных минералов железа формируется при совокупном влиянии природных и антропогенных факторов. Среди последних важную роль играют техногенные шахтные воды – основной источник железа, сульфатов и других компонентов в речных отложениях Восточного Донбасса.

3. Формирование аутигенных минералов железа происходит в нестабильных физико-химических условиях, что характерно для раннего этапа диагенеза. Об этом свидетельствуют:

- присутствие в ассоциации аутигенных минералов наряду с оксидами и гидроксидами железа сульфидов и железосодержащих карбонатов;
- наличие наряду с монокристаллами магнетита и пирита их поликристаллических образований, свидетельствующих соответственно об очень высокой (неравновесные условия) и сравнительно низкой (равновесные условия) скоростях кристаллизации;
- рентгеноаморфное состояние минеральных масс, псевдоморфозы, отсутствие четко выраженной структуры кристаллов, свидетельствующее о незавершённости процессов минералообразования в донных осадках.

4. На раннем этапе диагенеза изученных донных осадков наиболее предпочтительным с энергетической точки зрения является формирование из гидроксидов железа магнетита. Именно «магнетитовая реакция» начинается раньше, протекает быстрее и с меньшими затратами органического вещества – мощного источника энергии восстановительного процесса, чем «сидеритовая» и тем более «пиритовая».

Литература

1. Алексеев А.О., Митенко Г.В., Шарый П.А. Количественные оценки палеоэкологических изменений в позднем голоцене на юге Восточно-европейской равнины на основе магнитных свойств почв. // Почвоведение. – 2020. – №12. – С. 1425–1435.
2. Астафьева М.М. Железистые кварциты (джеспилиты) раннего докембрия. // В кн.: Бактериальная палеонтология. Российская академия наук: Палеонтологический институт имени А.А. Борисяка; Институт микробиологии имени С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии; Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. / Под ред. А.Ю. Розанова. – М.: РАН, 2021. – 124 с. – С. 87–100.
3. Астахова Н.В. Аутогенные образования в позднекайнозойских отложениях окраинных морей Востока Азии. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 244 с.
4. Водяницкий Ю.Н. Биогеохимическая роль магнетита в городских почвах (обзор литературы). // Почвоведение. – 2013. – №3. – С. 350.
5. Гавришин А.И., Борисова В.Е., Торопова Е.С. Распределение химического состава шахтных вод на территории Восточного Донбасса // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №2. – С. 5–15. DOI: 10.23671/VNC.2018.2.13923
6. Георгиевский А.Ф., Бугина В.М., Дьяконов В.В., Марков В.Е. Меловые магнетиты горного Крыма – пример древнего микробиального рудонакопления. // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования. – 2005. – №1(11). – С. 140–146.
7. Горохова С. М., Разинский М. В., Васильев А. А. Минералогические и химические особенности магнитной фазы почв южной тайги Пермского края. // Пермский аграрный вестник. Общая биология. – 2017. – №4(20). – С. 6–14.
8. Заварзина Д.Г. Образование магнетита и сидерита термофильными железоредуцирующими бактериями. // Палеонтологический журнал. – 2004. – №6. – С. 3–8.
9. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк В.Н. Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002
10. Закруткин В.Е., Скляренко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем

Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества: монография. – Ростов н/Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – 172 с.

11. Косарева Л.Р., Нургалиев Д.К., Фаттахов А.В., Кузина Д.М., Крылов П.С. Предварительные данные о магнитных свойствах осадков озера Балхаш (Казахстан). // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. – 2014. – Т. 156. Кн. 1. – С. 137–147.

12. Курчатова А.Н., Рогов В.В. Формирование геохимических аномалий при миграции углеводородов в криолитозоне Западной Сибири. // Лёд и снег. – 2018. – Т. 58. №2. – С. 199–212.

13. Лихачев А.П. Условия образования магнетита и его рудных скоплений. // Отечественная геология. – 2017. – №4. – С. 44–53.

14. Масленникова А.В., Блинов И.А., Удачин В.Н. Фрамбоидальный пирит в донных отложениях озер Южного Урала. // Материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования», 15–18 октября 2012 г. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого, 2012. – №4. – С. 188–190.

15. Нерадовский Ю.Н., Даувальтер В.А., Савченко Е.Э. Генезис фрамбоидального пирита в современных осадках озер (Кольский полуостров). // Записки ВМО. – 2009. – №6. – С. 50–56.

16. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т.12. №4. – С. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013

17. Опекунов, А.Ю., Янсон, С.Ю., Опекунова, М.Г., Кукушкин, С.Ю. Минеральные фазы металлов в техногенных осадках рек Санкт-Петербурга при экстремальном загрязнении. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2021. – Т. 66. Вып. 2. – С. 267–288.

18. Рейхард Л.Е., Новигатский А.Н., Алексеева Т.Н., Дара О.М., Коченкова А.И., Маторина Н.С. Диагенетическое минералообразование в современных донных осадках Белого моря. // XII Съезд Российского минералогического общества «Минералогия во всем пространстве сего слова» (сборник конференции). Горный университет, г. Санкт-Петербург, октябрь, 2015. – С. 52–55.

19. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. – М.: Наука, 2001. – 302 с.

20. Сапожников В.В., Соколова С.А. Распределение загрязняющих веществ в воде и донных осадках Белого моря. // Комплексные исследования экосистемы Белого моря. / Под ред. Сапожникова В.В. – М.: ВНИРО, 1994. – С. 104–108.

21. Толстобров Д.С., Колька В.В., Корсакова О.П. Рудные минералы в различных фазах донных отложений озёрных котловин на побережье Белого моря. // Успехи современного естествознания. – 2011. – №7. – С. 55–59.

22. Bakhmutov V.G., Poliachenko I.B. New paleomagnetic data on the Silurian and Devonian sedimentary rocks from Podolia, SW Ukraine, and kinematics of the East European platform in the Middle Paleozoic. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – Vol. 5. Iss. 4. – pp. 1045–1058. DOI: 10.5800/GT-2014-5-4-0167

23. Bauer K.W., Byrne J.M., Kenward P.A., Simister R.L., Michiels C.C., Friese A., Vuillemin A., Henny C., Nomosatryo S., Kallmeyer J., Kappler A., Smit M.A., Francois R., & Crowe S.A. Magnetite biomineralization in ferruginous waters and early Earth evolution. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2020. – Vol. 549. – p. 116495. DOI:10.31223/osf.io/prhuz

24. Byrne J.M. Klueglein N., Pearce C., Rosso K.M., Appel E., Kappler A. Redox cycling of Fe (II) and Fe (III) in magnetite by Fe-metabolizing bacteria. // *Science*. – 2015. – Vol. 347. – No.6229. – pp. 1473–1476.

25. Channell J.E., Hodell D.A., Margari V., Skinner L.C., Tzedakis P.C., Kesler M.S. Biogenic magnetite, detrital hematite, and relative paleointensity in Quaternary sediments from

the Southwest Iberian Margin. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2013. – Vol. 376. – pp. 99-109.

26. Dinarès-Turell J., Hoogakker B.A.A., Roberts A.P., Rohling E.J., Sagnotti L. Quaternary climatic control of biogenic magnetite production and eolian dust input in cores from the Mediterranean Sea. // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2003. – Vol. 190. – pp. 195–209.

27. Lin Z., Sun X., Roberts A. P., Strauss H., Lu Y., Yang X., Gong J., Li G., Brunner B., Peckmann J. A novel authigenic magnetite source for sedimentary magnetization. // *Geology*. – 2020. – Vol. 49(4). – pp. 360-365, DOI: 10.1130/G48069.1

28. Roberts A.P., Chang L., Heslop D., Florindo F., & Larrasoaña J.C. Searching for single domain magnetite in the “pseudo-single-domain” sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations. // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – Vol.117. – B08104. DOI:10.1029/2012JB009412

29. Piepenbrock A., Dippon U., Porsch K., Appel E., Kappler A. Dependence of microbial magnetite formation on humic substance and ferrihydrite concentrations. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – Vol. 75. No.22. – pp. 6844–6858.

30. Schoonen M.A.A., Barnes H.L. Reactions forming pyrite and marcasite from solution: II. Via FeS precursors below 100 C. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – Vol. 55. No.6. – pp. 1505–1514.

31. Semenov S.V., Balaev D.A., Shaykhtudinov K.A., Rogozin D.Yu. Day plots of bacterial magnetite from sediments of Shira lake (Khakassia, Russia). // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. – 2017. – Vol. 10(2). – pp. 252–256. DOI: 10.17516/1997-1397-2017-10-2-252-256

References

1. Alekseev A.O., Mitenko G.V., Sharyi P.A. Quantitative estimates of paleoenvironmental changes in the late Holocene in the south of the east European plain as recorded in the magnetic properties of soils. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 12. pp. 1677–1686. DOI: 10.1134/S1064229320120029.

2. Astafieva M.M. Ferrous quartzites (jaspilites) of the Early Precambrian. In: *Bacterial paleontology*. Ed. A.Yu. Rozanova. Moscow. RAS, 2021. pp. 87–100. (In Russ.)

3. Astakhova N.V. Autogenous formations in Late Cenozoic sediments of the marginal seas of East Asia. Vladivostok, Dalnauka, 2007. 244 p. (In Russ.)

4. Vodyanitskii Y.N. BIOGEOCHEMICAL ROLE OF MAGNETITE IN URBAN SOILS (REVIEW OF PUBLICATIONS). *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46. No. 3. pp. 317–324. DOI: 10.1134/S1064229313030137.

5. Gavrishin A.I., Borisova V.E., Toropova E.S. Distribution of chemical composition of mine waters in the Eastern Donbas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. No. 2. pp. 5–15. DOI: 10.23671/VNC.2018.2.13923. (In Russ.)

6. Georgievsky A.F., Bugina V.M., Dyakonov V.V., Markov V.E. Cretaceous magnetites of Crimea Mountains as an example of ancient microbial ore deposit. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2005. No. 1. pp. 140–146. (In Russ.)

7. Gorokhova S.M., Razinsky M.V., Vasiliev A.A. Mineralogical and chemical features of magnetic phase of soils of south taiga of Permskii Krai. *Perm Agrarian Journal*. 2017. No. 4(20). pp. 6–14. (In Russ.)

8. Zavarzina D.G. Formation of magnetite and siderite by thermophilic Fe(III)-reducing bacteria. *Paleontological Journal*. 2004. Vol. 38. No. 6. pp. 585–589.

9. Zakrutkin V. E., Gibkov E.V., Reshetnyak V.N. Chemical composition and certain features of mineral formation in the river sediments of the Seversky Donets River basin (within the Rostov region). *Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002. (In Russ.)

10. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. Surface and underground waters within the technogenically disturbed geosystems of the Eastern Donbass: formation of the chemical composition and quality assessment. Monograph. Rostov-on-Don. SFU, 2016. 172 p. (In Russ.)
11. Kosareva L.R., Nurgaliev D.K., Fattakhov A.V., Kuzina D.M., Krylov P.S. Preliminary data on the magnetic properties of sediments from Lake Balkhash (Kazakhstan). Proceedings of Kazan University. 2014. Vol. 156. Book. 1. pp. 137–147. (In Russ.)
12. Kurchatova A.N., Rogov V.V. Formation of geochemical anomalies in hydrocarbon migration in the permafrost zone of Western Siberia. *Ice and Snow*. 2018. Vol. 58. No. 2. pp. 199–212. (In Russ.)
13. Likhachev A.P. The conditions of magnetite and its ore clusters formation. *National Geology*. 2017. No. 4. pp. 44–53. (In Russ.)
14. Maslennikova A.V., Blinov I.A., Udachin V.N. Framboidal pyrite in bottom sediments of lakes of the Southern Urals. In: Proc. of the IV All-Rus. Youth Sc. Conf. Minerals: structure, properties, research methods. Yekaterinburg. 2012. No. 4. pp. 188–190. (In Russ.)
15. Neradovsky Yu.N., Dauwalter V.A., Savchenko E.E. Genesis of framboidal pyrite in the contemporary lake deposits. Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 2009. No. 6. pp. 50–56. (In Russ.)
16. Nureev R.R., Pashkevich M.A., Kharko P.A. Assessment of the impact of copper ore enrichment waste on surface and groundwater. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013. (In Russ.)
17. Opekunov, A.Yu., Janson, S.Yu., Opekunova, M.G., Kukushkin, S.Yu. Mineral phases of metals in industrial sediments of St. Petersburg Rivers with extreme pollution. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2021. Vol. 66. Issue. 2. pp. 267–288. (In Russ.)
18. Reichard L.E., Novigatsky A.N., Alekseeva T.N., Dara O.M., Kochenkova A.I., Matorina N.S. Diagenetic mineral formation in modern bottom sediments of the White Sea. In: Proc. of XII Cong. of the Rus. Miner. Soc. Miner. in the entire space of this word. Mining University, St. Petersburg, 2015. pp. 52–55. (In Russ.)
19. Romankevich E.A., Vetrov A.A. Carbon cycle in the Russian Arctic seas. Moscow. Nauka, 2001. 302 p. (In Russ.)
20. Sapozhnikov V.V., Sokolova S.A. Distribution of pollutants in water and bottom sediments of the White Sea. In: Comprehensive studies of the White Sea ecosystem. / Ed. Sapozhnikova V.V. Moscow, VNIRO, 1994. pp. 104–108. (In Russ.)
21. Tolstobrov D.S., Kolka V.V., Korsakova O.P. Ore minerals in various facies of bottom sediments of lake basins on the White Sea coast. *Advances of modern natural science*. 2011. No. 7. pp. 55–59. (In Russ.)
22. Bakhmutov VG, Poliachenko IB New paleomagnetic data on the Silurian and Devonian sedimentary rocks from Podolia, SW Ukraine, and kinematics of the East European platform in the Middle Paleozoic. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5. Issue 4. pp. 1045–1058. DOI: 10.5800/GT-2014-5-4-0167.
23. Bauer K.W., Byrne J.M., Kenward P.A., Simister R.L., Michiels C.C., Friese A., Vuillemin A., Henny C., Nomosatryo S., Kallmeyer J., Kappler A., Smit MA, Francois R., Crowe S.A. Magnetite biomineralization in ferruginous waters and early Earth evolution. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. Vol. 549. P. 116495. DOI:10.31223/osf.io/prhuz.
24. Byrne J.M., Klueglein N., Pearce C., Rosso KM, Appel E., Kappler A. Redox cycling of Fe (II) and Fe (III) in magnetite by Fe-metabolizing bacteria. *Science*. 2015. Vol. 347. No.6229. pp. 1473–1476. DOI: 10.1126/science.aaa4834.
25. Channell J.E., Hodell D.A., Margari V., Skinner L.C., Tzedakis P.C., Kesler M.S. Biogenic magnetite, detrital hematite, and relative paleointensity in Quaternary sediments from the Southwest Iberian Margin. *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 376. pp. 99–109. DOI:10.1016/j.epsl.2013.06.026.

26. Dinarès-Turell J., Hoogakker B.A.A., Roberts A.P., Rohling E.J., Sagnotti L. Quaternary climatic control of biogenic magnetite production and eolian dust input into cores from the Mediterranean Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2003. Vol. 190. pp. 195–209. DOI: 10.1016/S0031-0182(02)00605-3.
27. Lin Z., Sun X., Roberts AP, Strauss H., Lu Y., Yang X., Gong J., Li G., Brunner B., Peckmann J. A novel authentic magnetite source for sedimentary magnetization. *Geology*. 2020. Vol. 49(4). pp. 360–365. DOI: 10.1130/G48069.1.
28. Roberts A.P., Chang L., Heslop D., Florindo F., Larrasoana J.C. Searching for single domain magnetite in the “pseudo – single – domain” sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations. *Journal of Geophysical Research*. 2012. Vol. 117. B08104. DOI:10.1029/2012JB009412.
29. Piepenbrock A., Dippon U., Porsch K., Appel E., Kappler A. Dependence of microbial magnetite formation on humic substance and ferrihydrite concentrations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. Vol. 75. No.22. pp. 6844–6858. DOI:10.1016/J.GCA.2011.09.007.
30. Schoonen M.A.A., Barnes H.L. Reactions forming pyrite and marcasite from solution: II. Via FeS precursors below 100 C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. Vol. 55. No.6. pp. 1505–1514.
31. Semenov S.V., Balaev D.A., Shaykhutdinov K.A., Rogozin D.Yu. Day plots of bacterial magnetite from sediments of Shira lake (Khakassia, Russia). *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2017. Vol. 10(2). pp. 252–256. DOI: 10.17516/1997-1397-2017-10-2-252-256.

УДК 553.061.4

DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009

Оригинальная статья

Геодинамические обстановки формирования рудно-магматических систем Восточного Донбасса по петрохимическим данным

С.Г. Парада 

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

Статья поступила: 05.06.2023, доработана: 23.08.2023, принята к публикации: 04.09.2023

Резюме: Статья посвящена решению одной из научных проблем металлогении Восточного Донбасса, определяющей связь рудных проявлений и магматизма с геодинамическими условиями развития региона в мезозое. **Цель исследования.** Оценка геодинамических условий формирования на основе петрохимических данных выявленных ранее в Восточном Донбассе рудно-магматических систем (РМС). **Актуальность исследования.** Выявление геодинамических обстановок древних конвергентных и трансформных окраин является важной проблемой современной геологии, поскольку с такими обстановками связаны специфические магматические комплексы и месторождения полезных ископаемых. **Методы исследования.** Использованы петрохимические критерии выявления трансформных окраин, разработанные дальневосточными учеными, в частности тройные диаграммы, способные разделять магматические породы надсубдукционных обстановок, и магматические породы, образовавшиеся в обстановке трансформных окраин в зоне скольжения литосферных плит. Применена разработанная этими авторами тройная диаграмма для петрогенных оксидов $(\text{TiO}_2 \times 10) - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) - \text{MgO}$, основанная на процентном соотношении титана, железа и магния относительно суммы оксидов этих элементов, приведенных к 100 %. В качестве исходных материалов использованы химические анализы интрузивных пород Восточного Донбасса, заимствованные из производственных отчетов. Геодинамические обстановки формирования РМС центрального типа оценены на примере Кондаковской РМС, ареального типа – на примере Тузловской РМС. **Результаты исследования.** Установлено, что при формировании Кондаковской РМС центрального типа определяющей являлась надсубдукционная геодинамическая обстановка, которая со временем сменилась на обстановку скольжения плит с проявлением соответствующего магматизма и гибридизации заключительных порций магмы несветаевского комплекса за счет лампрофировой магмы. При формировании Тузловской РМС ареального типа основным источником магматизма, образующего интрузивные тела миусско-керчикского комплекса, могли являться подслэбовая астеносфера или деплетированная мантия. Интрузивный магматизм миусско-керчикского комплекса проявился при переходе надсубдукционного геодинамического режима в режим скольжения литосферных плит в результате коллизии континентальных окраин или смены направления движения, после прекращения субдукции.

Ключевые слова: рудно-магматическая система, геодинамическая обстановка, надсубдукционный магматизм, скольжение литосферных плит, Восточный Донбасс.

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

Для цитирования: Парада С.Г. Геодинамические обстановки формирования рудно-магматических систем Восточного Донбасса по петрохимическим данным. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 122-132. DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009.

DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009

Original paper

Geodynamic conditions of formation of ore-magmatic systems of Eastern Donbass according to petrochemical data

S.G. Parada 

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

Received: 05.06.2023, revised: 23.08.2023, accepted: 04.09.2023

Resume. The article is devoted to solving one of the scientific problems of metallogeny of the Eastern Donbass, which determines the relationship of ore manifestations and magmatism with the geodynamic conditions of the development of the region in the Mesozoic. **The purpose of the study.** Assessment of geodynamic conditions of formation based on petrochemical data of ore-magmatic systems (RMS) previously identified in the Eastern Donbass. **The relevance of research.** The identification of geodynamic environments of ancient convergent and transform margins is an important problem of modern geology, since specific magmatic complexes and mineral deposits are associated with such environments. Research methods. The petrochemical criteria for identifying transform margins developed by Far Eastern scientists were used, in particular, triple diagrams capable of separating igneous rocks of suprasubduction environments and igneous rocks formed in the environment of transform margins in the zone of sliding lithospheric plates. The triple diagram developed by these authors for petrogenic oxides $(\text{TiO}_2 \times 10) - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) - \text{MgO}$ is used, based on the percentage ratio of titanium, iron and magnesium relative to the sum of oxides of these elements reduced to 100%. Chemical analyses of intrusive rocks of the Eastern Donbass, borrowed from production reports, were used as starting materials. Geodynamic conditions of the formation of the RMS of the central type are estimated on the example of the Kondakov RMS, the areal type – on the example of the Tuzlovskaya RMS. **The results of the study.** It was found that during the formation of the Kondakov RMS of the central type, the suprasubduction geodynamic situation was decisive, which eventually changed to a plate sliding situation with the manifestation of the corresponding magmatism and hybridization of the final portions of the magma of the Nesvetaevsky complex due to lamprophyric magma. During the formation of the Tuzlovskaya RMS of the areal type, the main sources of magmatism forming the intrusive bodies of the Miusko-Kerchik complex could be the sublab asthenosphere or depleted mantle. The intrusive magmatism of the Miusko-Kerchik complex manifested itself during the transition of the suprasubduction geodynamic regime to the sliding regime of lithospheric plates as a result of a collision of continental margins or a change in the direction of movement, after the cessation of subduction.

Keywords: ore-magmatic system, geodynamic situation, suprasubduction magmatism, sliding of lithospheric plates, Eastern Donbass.

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

For citation: Parada S.G. Geodynamic conditions of formation of ore-magmatic systems of Eastern Donbass according to petrochemical data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 122-132. DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009.

Введение

Донбасс представляет собой восточную, относительно обособленную и самостоятельную часть протяженной Днепровско-Донецкой рифтогенной структуры, от-

деляющей Украинский щит от основной части Восточно-Европейской платформы. Западная его часть постепенно переходит в Днепровско-Донецкую впадину, строение которой вместе с Западным Донбассом достаточно хорошо изучено по результатам сейсмического профилирования и других геофизических методов [Maystrenko et al., 2003; Saintot et al., 2003 и др.]. Это позволило некоторым исследователям установить признаки горизонтальных перемещений и шарьжной тектоники [Артеменко и др., 2000; Юдин, 2005; Хаин и др., 2010]. Восточная часть Донбасса изучена слабее. Ее геологическое строение заметно отличается от западной части относительно широким проявлением интрузивного магматизма. Интрузивные тела концентрируются в узлы, цепочкой вытягивающиеся в субширотный пояс. При этом отмечается их приуроченность к южному ограничению Донецкой складчатой системы при быстром затухании магматизма субмеридиональных зон к северу. Большинство исследователей Донбасса считают, что ранне-среднеюрский несветаевский андезит-трахиандезитовый комплекс образует вулcano-плутонический пояс [Невалённый, 2005]. Предполагается, что наличие протяженного мезозойского вулcano-плутонического пояса связано с интенсивной фазой активизации, завершающей формирование складчатых структур Донбасса, оживления древних тектонических нарушений и заложения молодых, к которым относится Персияновский, Сулино-Константиновский и мелкие разломы, а к вулcano-плутонической активизации привело давление предкавказских плит с юга [Granovsky, 2018].

Таким образом, по приведенным оценкам несветаевский андезит-трахиандезитовый интрузивный комплекс считается отвечающим этапу тектонической активизации областей завершённой складчатости, и что именно с фазой активизации и магматизмом несветаевского комплекса в Донбассе связаны месторождения и рудопроявления цветных металлов и золота.

Более поздний миусско-керчикский интрузивный комплекс, представленный преимущественно дайками лампрофиров, имеет такие же особенности пространственного распределения, как и несветаевский, вытягиваясь в виде цепочек сгущения даек в субширотный пояс, вдоль южной окраины Донбасса. Считается, что формирование миусско-керчикского комплекса связано с несколько более поздней фазой мезозойской тектоно-магматической активизации Донбасса [Лихачев, 1983]. Предполагается [Бутурлинов, 1984], что дайки этого комплекса являются пострудными по отношению к золотому оруденению.

Проведенные нами в Восточном Донбассе исследования позволили по геолого-геофизическим данным обосновать выделение рудно-магматических систем (РМС) [Парада, Гамбург, 2023]. Они подразделены нами на системы центрального и системы ареального типов. РМС центрального типа образованы скоплениями малых интрузий несветаевского андезит-дацитового интрузивного комплекса и связанных с ними рудопроявлений, 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. С ними также ассоциируют рудопроявления. Однако ареалы этих даек не находят отображения в магнитном поле, что позволило оценить положение источника лампрофирового магматизма миусско-керчикского комплекса ниже изотермы Кюри, предположительно в мантии.

Материалы и методы

Целью настоящей статьи является выявление геодинамических условий формирования выявленных РМС на основе петрохимических данных, использование которых показало свою эффективность при геодинамических реконструкциях и металлогенических построениях [Ханчук, Иванов, 1999; Парада и др., 2011; Гребенников и др., 2013; Газеев и др., 2020, 2023]. Реконструкция геодинамических обстановок древних конвергентных и трансформных окраин является важной проблемой современной геологии, поскольку с такими обстановками связаны специфические магматические комплексы и месторождения полезных ископаемых [Ханчук, Иванов, 1999; Геодинамика..., 2006; Диденко, Ханчук, 2019]. Обосновано, что конвергентные окраины возникают в результате субдукции литосферных плит. Трансформные окраины являются границами литосферных плит, вдоль которых происходит их относительное скольжение в горизонтальной плоскости. Они сменяют собой во времени конвергентные окраины, связанные с субдукцией вследствие смены направления движения литосферных плит и других причин. Магматизм трансформных окраин обусловлен формированием разрывов в слэбе и апвеллингом подслэбовой астеносферы с сопутствующим адиабатическим декомпрессионным плавлением [Гребенников, Ханчук, 2021].

В связи с этим, петрохимические особенности современного и позднекайнозойского магматизма конвергентных окраин давно используются при геологических реконструкциях для выявления подобных обстановок в более древние геологические эпохи.

Геохимические критерии выявления трансформных окраин разработаны на основе огромного массива химических анализов магматических пород типоморфных конвергентных и трансформных геодинамических обстановок [Гребенников и др., 2013; Гребенников, Ханчук, 2021]. Эти исследователи разработали тройные геохимические диаграммы, способные разделять магматические породы надсубдукционных обстановок, и магматические породы, образовавшиеся в обстановке трансформных окраин в зоне скольжения литосферных плит.

В связи с отсутствием современных прецессионных данных по содержаниям редких и рассеянных элементов в магматических породах Донбасса, нами использована разработанная этими авторами тройная диаграмма для петрогенных оксидов $(\text{TiO}_2 \times 10) - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) - \text{MgO}$, основанная на процентном соотношении титана, железа и магния относительно суммы оксидов этих элементов, приведенных к 100 %.

В качестве исходных материалов использованы химические анализы интрузивных пород Восточного Донбасса, заимствованные из производственных отчетов. Геодинамические обстановки формирования РМС оценены на примере Кондаковской РМС центрального типа и Тузловской РМС ареального типа.

Результаты и обсуждение

Как уже отмечалось, проявления магматизма в Донбассе отличается малыми размерами интрузивных тел и ограниченностью масштабов проявления. При этом, породы несветаевского и миусско-керчикского комплексов по вещественному составу и условиям локализации заметно различаются по петрохимическим характеристикам.

Соотношения оксидов титана, железа и магния в магматических породах Кондаковской и Тузловской РМС, приведенных к 100% показаны в таблицах 1 и 2 и нанесены на дискриминантные диаграммы (рис. 1 и 2).

Таблица 1/ Table 1

**Средние содержания оксидов титана, железа и магния в магматических породах
Кондаковской РМС, приведенные к 100 % /
Average contents of titanium, iron and magnesium oxides in igneous rocks of the
Kondakovskaya RMS, reduced to 100 %**

№ п/п / No	Количество анализов/ Number of tests	TiO ₂ x10, %	(Fe ₂ O ₃ +FeO), %	MgO, %
<i>1</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	3	37,6	45,2	17,2
2	1	54,7	33,7	11,6
3	5	52,5	32,0	15,5
4	9	42,9	41,7	15,4
5	3	34,1	43,3	22,6
6	2	27,0	51,9	21,1
7	5	51,6	32,4	16,0
8	15	35,3	42,7	22,0
9	11	51,0	34,8	14,2
10	8	43,2	37,6	19,2
11	5	45,1	40,9	14,0
12	3	39,8	44,8	15,4
13	7	40,2	47,8	13,0
14	4	39,3	44,7	16,0
15	2	39,5	46,8	13,7
16	65	41,6	41,4	17
17	2	33,2	45,2	21,6
18	4	37,5	33,9	28,6
19	4	22,2	42,5	35,3
20	1	36,0	40,3	23,7
21	3	40,6	41,3	18,1
22	14	33,7	40,7	25,6
23	1	36,8	31,5	31,7
24	1	34,5	30,4	35,1
25	2	30,3	35,3	34,4
26	2	33,4	36,0	30,6
27	1	33,6	36,0	30,4
28	1	35,8	43,2	21,0
29	8	34,3	35,3	30,4
30	1	33,7	39,3	27,0
31	3	30,2	44,3	25,5
32	2	34,7	45,1	20,2
33	2	40,3	34,8	24,9
34	10	45,9	31,7	22,4
35	1	25,2	40,3	34,5
36	18	36,2	38,7	25,1
37	4	30,5	38,3	31,2
38	2	40,2	34,0	25,8
39	3	35,2	33,5	31,3

1	2	3	4	5
40	9	35,5	35,2	29,3
41	3	34,35	33,11	32,54
42	2	42,05	30,10	27,85
43	1	31,91	37,14	30,95
44	8	28,93	35,19	35,88
45	14	21,97	35,1	33,5
46	1	35,3	33,1	31,6
47	1	36,8	38,2	25
48	1	53,3	36,7	10
49	1	42,9	35,7	21,4

1-4 – дациты, 5-16 – андезито-дациты, 17-22 – андезиты, 23-29 – андезито-базальты, 30-36 – трахидациты, 37-40 – трахиандезитобазальты, 41-45 – спесартиты, 46-49 – камптониты /
 1-4 – dacites, 5-16 – andesite-dacites, 17-22 – andesites, 23-29 – andesite-basalts, 30-36 – trachydacites,
 37-40 – trachyandesite basalts, 41-45 – spesartites, 46-49 – camptonites; 4, 16, 22, 29, 36, 45 –
 среднеарифметические значения / 4, 16, 22, 29, 36, 45 – arithmetic mean values

В соответствии с рис. 1 большинство составов магматических пород (26 точек) располагается в диагностической области зон надсубдукционного магматизма. Меньшая часть точек (14 точек) – располагается в диагностической области зон скольжения литосферных плит. Единственный анализ дайки камптонита миусско-керчикского комплекса уверенно располагается в поле скольжения плит.

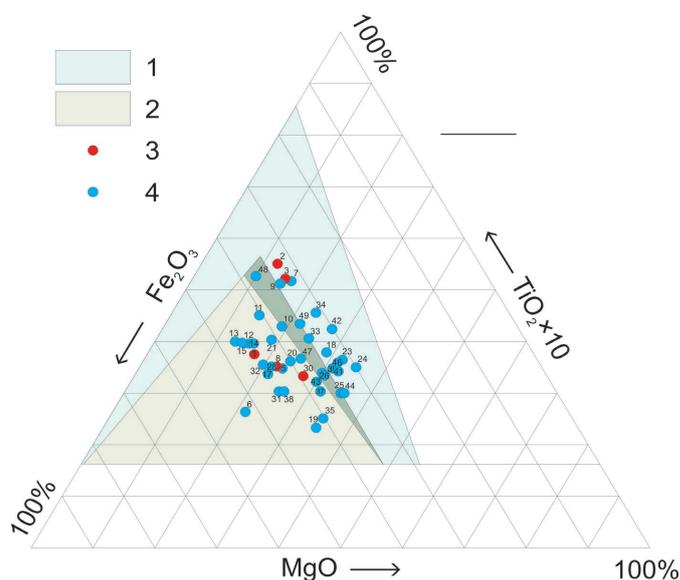


Рис. 1. Дискриминантная диаграмма для определения геодинамических обстановок по [Гребенников, Ханчук, 2021] для магматических пород Кондаковской РМС.

1 – 2 – области составов магматических пород: 1 – зон скольжения литосферных плит; 2 – зон надсубдукционного магматизма; 3 – 4 – точки составов магматических пород Кондаковской РМС: 3 – умеренно кислых, 4 – основных и средних пород /

Fig. 1. Discriminant diagram for determining geodynamic conditions according to [Grebennikov, Khanchuk, 2021] for igneous rocks of the Kondakov RMS.

1 – 2 – areas of compositions of igneous rocks: 1 – zones of sliding lithospheric plates; 2 – zones of suprasubduction magmatism; 3 – 4 – points of compositions of igneous rocks of the Kondakovskaya RMS: 3 – moderately acidic, 4 – basic and medium rocks

Также уверенно располагается в этом поле точка среднего из 8 анализов даек спессартитов этого комплекса. Две точки расположились в области неопределенности.

Согласно рис. 1 среди магматических пород несветаевского комплекса не отмечается однозначной принадлежности к той или иной диагностической области пород определенной кислотности или определенного химического состава. Среди преобладающих средних по составу и менее распространенных кислых магматических пород, имеются разности, соответствующие как обстановкам надсубдукционного магматизма, так и обстановкам скольжения плит. Причем количество первых почти в два раза превышает количество последних.

Таблица 2/ Table 2

Соотношения оксидов титана, железа и магния, приведенных к 100 %, в магматических породах Тузловской РМС /

Ratios of titanium, iron and magnesium oxides reduced to 100% in igneous rocks of the Tuzlovskaya RMS

№№ п/п	Название магматической породы/ Name of the igneous rock	Количество анализов/ Number of tests	TiO ₂ x10, %	(Fe ₂ O ₃ + FeO), %	MgO, %
1	Трахибазальт/ Trachybasalt	4	52	28	20
2	Андезито-базальт/ Andesite-basalt	1	65	28	7
3	Трахиандезит/ Trachyandesitis	1	38	35	27
4	Дациит/ Dacite	7	78	18	4
5	Мончикит/ Monchikit	8	51	28	21
6	Камптонит/ Camptonite	10	52	27	21
7	Спессартит/ Spessartite	3	59	28	13
8	Керсантит/ Kersantite	2	50	32	18

В соответствии с рис. 2 все точки составов магматических пород и несветаевского и миусско-керчикского комплексов располагается в диагностической области зон скольжения литосферных плит. При этом точки составов пород несветаевского комплекса образуют сильно растянутый тренд вдоль оси TiO₂. Точки составов пород миусско-керчикского комплекса образуют довольно компактное поле.

Петрохимические данные свидетельствуют, что Тузловская РМС сформировалась в условиях геодинамической обстановки скольжения литосферных плит.

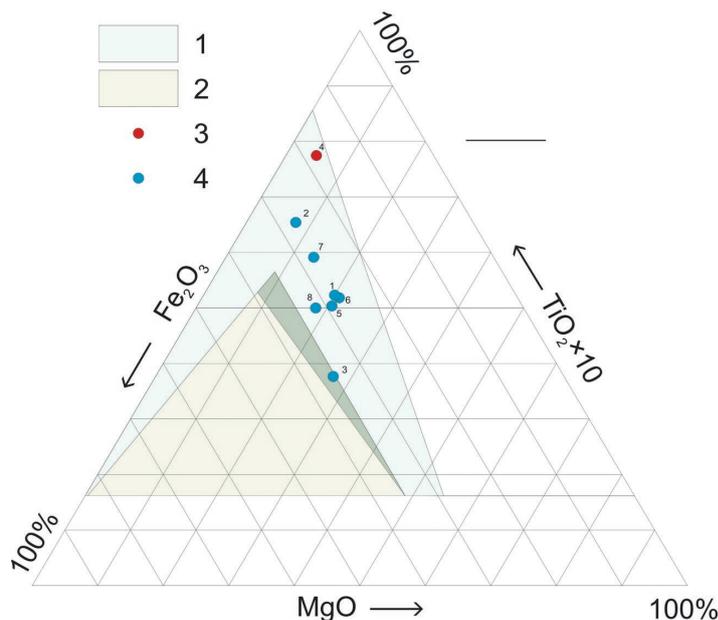


Рис. 2. Дискриминантная диаграмма для определения геодинамических обстановок по [Гребенников, Ханчук, 2021] для магматических пород Тузловской РМС1 – 2 – области составов магматических пород: 1 – зон скольжения литосферных плит; 2 – зон надсубдукционного магматизма; 3 – 4 – точки составов магматических пород Тузловской РМС: 3 – умеренно кислых, 4 – основных и средних пород. Точки 1 – 4 – породы несветаевского комплекса; 5 – 8 – породы миусско-керчикского комплекса /

Fig. 2 Discriminant diagram for determining geodynamic conditions according to [Grebennikov, Khanchuk, 2021] for igneous rocks of the Tuzlovskaya RMS

1 – 2 – areas of compositions of igneous rocks: 1 – zones of sliding of lithospheric plates; 2 – zones of suprasubduction magmatism; 3 – 4 – points of compositions of igneous rocks of Tuzlovskaya RMS: 3 – moderately acidic, 4 – basic and medium rocks. Points 1 – 4 – rocks of the Nesvetaevsky complex; 5 – 8 – rocks of the Miusko-Kerchik complex

Заключение

Приведенные данные свидетельствуют о том, что при формировании Кондаковской РМС центрального типа определяющей являлась надсубдукционная геодинамическая обстановка, которая со временем сменилась на обстановку скольжения плит с проявлением соответствующего магматизма и гибридизации заключительных порций магмы несветаевского комплекса за счет лампрофировой магмы.

При формировании Тузловской РМС ареального типа основным источником магматизма, образующего интрузивные тела миусско-керчикского комплекса, согласно теоретическим положениям [Castillo, 2008; Kant et al., 2018] могли являться подслэбовая астеносфера или деплетированная мантия.

Принимая субдукционную модель мезозойской истории формирования Донбасса, следует заключить, что интрузивный магматизм миусско-керчикского комплекса проявился при переходе надсубдукционного геодинамического режима в режим скольжения литосферных плит. Это соответствует представлениям [Гребенников, Ханчук, 2021] о том, что постсубдукционный магматизм связан с формированием разрыва в слэбе, образовавшимся в результате коллизии континентальных окраин или смены направления движения, после прекращения субдукции.

Литература

1. Артеменко В.М., Юдин В.В. Особенности геодинамики и металлогении Донецкой складчатой области // Литосфера. – 2000. – № 13. – С. 80–86.
2. Бутурлинов Н.В. Эволюция магматизма, минеральных ассоциаций и эндогенного рудообразования в Донецком бассейне // Минералогия рудных месторождений Украины. – К.: Наукова думка. – 1984. – С. 36–44.
3. Газеев В.М., Гурбанов А.Г. Раннепалеозойские габброиды архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ): геодинамическая типизация и минерогения. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 6–22. DOI: 10.46698/VNC.2020.83.87.001.
4. Газеев В.М., Гурбанов А.Г. Ранне-среднедевонские вулканогенные породы из районов колчеданных месторождений передового хребта Большого Кавказа: геодинамическая типизация и минерогения. // Геология и геофизика юга России. – 2023. – Т. 13, №1. – С. 6–21. DOI: 10.46698/VNC.2023.29.60.001
5. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Под ред. Ханчук А.И. В 2-х кн. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – Кн. 1. – 572 с.
6. Гребенников А.В., Попов В.К., Ханчук А.И. Опыт петрохимической типизации кислых вулканических пород различных геодинамических обстановок. // Тихоокеан. геология. – 2013. – Т. 32. № 3. – С. 68–73.
7. 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
8. Диденко А.Н., Ханчук А.И. Смена геодинамических обстановок в зоне перехода Тихий океан – Евразия в конце раннего мела. // Докл. АН. – 2019. – Т. 487/ № 4. – С. 56–59.
9. Лихачев В.А. Петрологические особенности магматических пород Восточного Донбасса в связи с вопросами его рудоносности. // Сб. «Геология и полезные ископаемые нижнего Дона». – 1983. – С. 13–17.
10. Невалённый Ю.В. Ресурсы металлических полезных ископаемых. В кн.: Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. – Ростов н/Д.: изд-во ЮНЦ РАН. – 2005. – С. 71–84.
11. Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 95–105. DOI:10.46698/VNC.2023.84.41.008
12. Парада С.Г., Холод Ю.В., Шишкалов И.Ю. Геохимия вторичных ореолов рассеяния малка-Муштинского рудного узла (Северный Кавказ). // Вестник Южного научного центра РАН. – 2011. – Т. 7. № 3. – С. 55–60.
13. Хаин В.Е., Попков В.И., Юдин В.В. Палеогеодинамика южного обрамления Восточноевропейского кратона. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2010. – № 2. – С. 3–9.
14. Ханчук А.И., Иванов, В.В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России. // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. № 11. – С. 1635–1645.
15. Юдин В.В. Шарьяж в Южном Донбассе. // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 402. № 4. – С. 511–514.
16. Castillo P.R. Origin of the adakite-high-Nb basalt association and its implications for postsubduction magmatism in Baja California, Mexico. // Geol. Soc. Am. Bull. – 2008. – Vol. 120. – P. 451-462.
17. 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. DOI: 10.1134/S0016852118040039

18. Kant L.B., Tepper J.H., Eddy M.P., Bruce K., Nelson B.K. Eocene basalt of Summit Creek: Slab breakoff magmatism in the central Washington Cascades, USA. // *Lithosphere*. – 2018. – Vol. 10. No. 6. – pp. 792–805.

19. Maystrenko Yu., Stovba S., Stephenson R., Bayer U., Menyoli E., Gajewski D., Huebscher Ch., Rabbei W., Saintot A., Starostenko V., Thybo H., Tolkunov A. Crustal-scale pop-up structure in cratonic lithosphere: DOBRE deep seismic reflection study of the Donbass Fold Belt, Ukraine. // *Geology*. – 2003. – Vol. 31. – pp. 733–736.

20. 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.

References

1. Artemenko V.M., Yudin V.V. Peculiar features of geodynamics and metallogeny of the Donetsk folded area. *Lithosphere*. 2000. No. 13. pp. 80–86. (In Russ.)

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

3. Gazeev V.M., Gurbanov A.G. Early Paleozoic gabbroids of the Arkhyz intrusive complex (North Caucasus): geodynamic typification and mineralogy. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 6–22. DOI: 10.46698/VNC.2020.83.87.001. (In Russ.)

4. Gazeev V.M., Gurbanov A.G. Early-Middle Devonian volcanic rocks from areas of massive sulfide deposits of the Front Range of the Greater Caucasus: geodynamic typification and mineralogy. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13, No. 1. pp. 6–21. DOI: 10.46698/VNC.2023.29.60.001 (In Russ.)

5. Khanchuk A.I. Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East. In 2 Books. Vladivostok, Dalnauka, 2006. Book 1. 572 p. (In Russ.)

6. Grebennikov A.V., Popov V.K., Khanchuk A.I. Experience of petrochemical typification of acid volcanic rocks from different geodynamic settings. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2013. Vol. 7. No. 3. pp. 212–216. DOI: 10.1134/S1819714013030044.

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

8. Didenko A.N., Khanchuk A.I. Change in the geodynamic settings in the Pacific–Eurasia transition zone at the end of the early Cretaceous. *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 487. No. 2. pp. 873–876. DOI: 10.1134/S1028334X19080026.

9. Likhachev V.A. Petrological features of igneous rocks of Eastern Donbass in connection with issues of its ore potential. In: *Proc. Geology and minerals of the lower Don*. 1983. pp. 13–17. (In Russ.)

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

11. Parada S.G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13, No. 2. pp. 95–105. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011. (In Russ.)

12. Parada S.G., Kholod Yu.V., Shishkalov I.Yu. Geochemistry of secondary dispersion halos of the Malka-Musht ore deposit block (the Northern Caucasus). SSC RAS. 2011. Vol. 7, No. 3. pp. 55–60. (In Russ.)

13. Khain V.E., Popkov V.I., Yudin V.V. Paleogeodynamics of southern adjacent areas of Eastern-European platform. *Bulletin of Moscow University. Series 4, Geology*. 2010. No. 2. pp. 3–9. (In Russ.)

14. Khanchuk A.I., Ivanov, V.V. Meso-Cenozoic geodynamic settings and gold mineralization of Russian Far East. *Russian Geology and Geophysics*. 1999. Vol. 40, No. 11. pp. 1635–1645. (In Russ.)
15. Yudin V.V. A nappe in the southern Donets basin. *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 402. No. 4. C. 538–541.
16. Castillo P.R. Origin of the adakite-high-Nb basalt association and its implications for postsubduction magmatism in Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 2008. Vol. 120. pp. 451–462.
17. 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. DOI: 10.1134/S0016852118040039.
18. Kant L.B., Tepper J.H., Eddy M.P., Bruce K., Nelson B.K. Eocene basalt of Summit Creek: Slab breakoff magmatism in the central Washington Cascades, USA. *Lithosphere*. 2018. Vol. 10, No. 6. pp. 792–805.
19. Maystrenko Yu., Stovba S., Stephenson R., Bayer U., Menyoli E., Gajewski D., Huebscher Ch., Rabbei W., Saintot A., Starostenko V., Thybo H., Tolkunov A. Crustal-scale pop-up structure in cratonic lithosphere: DOBRE deep seismic reflection study of the Donbass Fold Belt, Ukraine. *Geology*. 2003. Vol. 31. pp. 733–736.
20. 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.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 550.81 (470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2023.19.53.010

Оригинальная статья

Доюрское основание Терско-Каспийского
прогиба в связи с проблемой глубинной нефти
и формировании ее скопленийА.А. Даукаев , М.Я. Гайсумов , С.В. Бадаев 

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук, Россия, 364051, Чеченская республика,
г. Грозный, ул. В. Алиева 21а, e-mail: daykaev@mail.ru

Статья поступила: 31.05.2023, доработана: 02.08.2023, принята к публикации: 01.09.2023

Резюме: Актуальность работы. В последние десятилетия в практике геологоразведочных работ на нефть и газ отмечаются негативные тенденции, связанные неблагоприятным соотношением между добычей УВ-сырья и приростом запасов нефти и газа. Это связано не только со снижением объемов ГРП на нефть и газ, но и устареванием теоретико-методологических основ поисков и разведки нефти и газа базировавшихся в основном на осадочно-миграционной и антиклинальной теориях. Экспериментальными данными и результатами сверхглубокого бурения в ряде регионов мира доказана возможность нахождения месторождений УВ на глубинах до 9-11 км. В этой связи определенные перспективы нефтегазоносности исследуемого и других нефтегазоносных регионов можно связывать с фундаментом и нижними горизонтами осадочного чехла. **Цель работы.** Исследование взаимосвязей между разломно-блоковой структурой фундамента, строением осадочного чехла, процессов нефтегазообразования и формирования скоплений углеводородов. **Методы исследований.** Для решения поставленной задачи были использованы фондовые материалы и опубликованные литературные источники, произведен комплексный анализ и обобщение геолого-геофизической информации (МОВЗ, МОВ ОГТ, КМПВ, бурение скважин и т.д.) по доюрскому основанию и осадочному чехлу. **Результаты исследований.** Освещена история развития взглядов о разломно-блоковом строении фундамента и нижнего структурного этажа осадочного чехла и нефтегазоносности Восточного Предкавказья. Описаны результаты, полученные различными методами – сейсморазведкой МОВ ОГТ, КМПВ, МОВЗ, повторным нивелированием и др. Установлена взаимосвязь разломной тектоники, процессов глубинного нефтегазообразования и формирования многопластовых месторождений в пределах ТКП. Отмечается, что разломно-блоковая структура земной коры сыграла активную роль в формировании сложного складчато-блокового строения западной части ТКП, путей миграции флюидных потоков и характера размещения УВ-скоплений. В практическом отношении предполагая формирование скоплений УВ в результате вертикальной миграции флюидов можно прогнозировать нефтегазоносность практически всех слоев осадочного чехла вплоть до пермо-триасовых отложений включительно, при наличии благоприятных структурно-тектонических, литолого-фациальных и других условий.

Ключевые слова: тектоника, глубинные разломы, нефтегазоносность, флюидизация земной коры, Терско-Каспийский прогиб, Восточное Предкавказье.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Комплексного НИИ РАН, 1021050501002-9-1.5.6; 1.5.4. ID:N282VIF1FEPZWOB83JNUE43.

Для цитирования: Даукаев А.А., Гайсумов М.Я., Бадаев С.В. Доюрское основание Терско-Каспийского прогиба в связи с проблемой глубинной нефти и формировании ее скоплений. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 133-146. DOI: 10.46698/VNC.2023.19.53.010.

DOI: 10.46698/VNC.2023.19.53.010

Original paper

Pre-Jurassic basement of the Terek-Caspian basin in connection with the problem of deep oil and the formation of its accumulations

A.A. Daukaev^{ID}, **M.Ya. Gaysumov**^{ID}, **S.V. Badaev**^{ID}

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian academy of sciences, 21a V. Alieva Str.,
Chechen Republic, Grozny 364051, Russia Federation, e-mail: daykaev@mail.ru

Received: 31.05.2023, revised: 02.08.2023, accepted: 01.09.2023

Abstract: Relevance. In recent decades, in the practice of geological exploration for oil and gas, there have been negative trends associated with an unfavorable ratio between the extraction of hydrocarbon raw materials and the increase in oil and gas reserves. As is known, for the stable development of oil and gas production, it is necessary that the pace of development of exploration ahead of the pace of hydrocarbon production. The above trends are associated not only with a decrease in the volume of exploration for oil and gas, but also with the obsolescence of the theoretical and methodological foundations of oil and gas prospecting and exploration, based mainly on sedimentary-migration and anticlinal theories. At present, experimental data and results of ultra-deep drilling in a number of regions of the world have proved the possibility of finding hydrocarbon deposits at depths of up to 9-11 km. In this regard, certain prospects for the oil and gas potential of the studied and other oil and gas regions can be associated with the basement and lower horizons of the sedimentary cover. **Aim.** Study the relationship between the fault-block structure of the basement, the structure of the sedimentary cover, the processes of oil and gas formation and the formation of hydrocarbon accumulations. **Methods.** To solve the problem, stock materials and published literature sources were used, a comprehensive analysis and generalization of geological and geophysical information (methods of the deep seismic sounding, CDP, seismic refraction, well drilling, etc.) was carried out on the pre-Jurassic basement and sedimentary cover. **Results.** The history of the development of views on the fault-block structure of the basement and the lower structural stage of the sedimentary cover and the oil and gas potential of the Eastern Ciscaucasia is covered. The results obtained by various methods are described – seismic exploration of the CDP, refraction correlation, deep seismic sounding, re-leveling, etc. The relationship between fault tectonics, processes of deep oil and gas formation and the formation of multilayer deposits within the Terek-Caspian basin is established.

Keywords: tectonics, deep faults, oil and gas potential, fluidization of the earth's crust, Terek-Caspian basin, Eastern Ciscaucasia.

Acknowledgment: This work was carried out according to the state assignment of the Complex Institute of the Russian academy of sciences, №1021050501002-9-1.5.6; 1.5.4. ID:N282VIF1FEPZWOB83JNUE43.

For citation: Daukaev A.A., Gaysumov M.Ya., Badaev S.V. Pre-Jurassic basement of the Terek-Caspian basin in connection with the problem of deep oil and the formation of its accumulations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 133-146. DOI: 10.46698/VNC.2023.19.53.010.

Введение

Формирование современной структуры ТКП неразрывно связано с характером геологического развития всего Большого Кавказа (БК), который служит моделью для множеств тектонических представлений о строении и развитии складчатых областей. Существуют различные концепции о строении и геологическом развитии БК, краткое содержание которых дается ниже.

Концепция покровно-надвигового строения. Была сформулирована еще в 1920–30-х гг. В.П. Ренгартенем, К.И. Богдановичем, Л.А. Варданянцем, Н.С. Шатским, И.О. Бродом и др. На основе этой концепции В.П. Ренгартенем в 1930 году была составлена первая схема тектонического районирования БК, которая не потеряла актуальность и до сегодняшнего дня. Дальнейшее развитие данной концепции получило в трудах Ч.Б. Борукаева, В.И. Шевченко, В.Е. Хаина и др. В 1960–80-х гг. на основе этой концепции Л.П. Зоненшайном, М.Г. Ломизе, В.Е. Хаиным, Ш.А. Адамия, С.А. Ушаковым и др., были разработаны мобилистские представления о строении и развитии БК [Хаин, 1973].

Сдвиговая концепция. Основана на представлениях об альпийской структуре БК, сформированной за счет горизонтальных сдвигов. Впервые концепция была представлена в 1960 г. Г.Д. Ажгиреем [Ажгирей, 1976].

Представления об альпийской структуре, сформированной за счет вертикального перемещения блоков земной коры, разделенных системой субвертикальных разрывов. Данные представления разрабатывались В.В. Белоусовым, А.А. Сорским, В.Н. Шолпо и др. [Белоусов, 1989].

Представления о строении БК как сложном сочетании диагонально-сдвиговых и линейно-надвиговых структурных элементов, сформированных под воздействием единого субмеридионального стресса. Эти представления впервые были предложены в 1966–1973 гг. Л.М. Расцветаевым и в последствии поддержанные другими исследователями [Расцветаев, 1973].

Были предложены, также другие гипотезы и концепции (флюидодинамическая, пульсационно-контракционная, ротационная и др.).

С историей геологического развития в течении которой сформировался современная структура Большого Кавказа и прилегающих территорий неразрывно связаны и образование полезных ископаемых, в частности нефти и газа. Так, степень тектонической активности обуславливается характер дислоцированности и интенсивность развития локальных структур, с которыми обычно связаны месторождения УВ. Долгое время поиски и разведка УВ-скоплений базировались на теоретических положениях органической концепции, позднее преобразовавшейся в осадочно-миграционную, согласно которой формирование скоплений УВ связывали с осадочными слоями при благоприятных тектонических, литолого-фациальных и других условий (нефтематеринские породы, коллектора, антиклинальные формы и т.д.), ограничивая возможность образования и формирование скоплений нефти по глубине (до 5–7 км). Ниже излагаются особенности глубинного строения рассматриваемой территории в контексте формирования УВ-скоплений, базируясь на основных положениях современных концепций нефтегазообразования в недрах Земли [Багдасарова, Пиковский, 2018; Летников, 2013; Дмитриевский, 2008, и др.].

Материалы и методы исследований

Для решения поставленной задачи были использованы фондовые материалы и опубликованные литературные источники, комплексный анализ и обобщение геолого-геофизической информации (МОВЗ, МОВ ОГТ, бурение глубоких скважин и т.д.) по доюрскому основанию и осадочному чехлу.

Результаты работы и их обсуждение

Формирование блоковой структуры фундамента и осадочного чехла *ТКП*. Альпийский период геологического развития данной территории, начавшийся в раннеюрское время подразделяется на три этапа: геосинклинальный – с синемюрского века лейаса до батского века средней юры, включительно; квазиplatformный – с келловейского века поздней юры до среднего сармата миоценовой эпохи; орогенный – с позднего сармата до понтического века, включительно [Короновский и др., 1990]. На первом этапе район *ТКП* представлял слабодифференцированный прогиб, в разных частях которого происходило накопление глубоководных глинистых, глинисто-алевролитовых, относительно грубых песчано-глинистых и мелководных прибрежно-морских отложений. Второй этап характеризовался длительным спокойным развитием территории с формированием малоамплитудных поднятий и впадин за счет перемещения глыб фундамента по разломам, и в целом субмеридионального структурного плана. Третий – орогенный этап характеризовался резким усилением тектонических движений в преакчагыльское время и формированием современного структурного плана за относительно короткий промежуток геологического времени. Этому способствовало по мнению многих исследователей, прежде всего, резкое усиление восходящих движений в пределах Большого Кавказа, наличие в разрезе осадочного чехла пластичных пород (майкопские глины и эвапориты верхней юры) и разломов (шовных зон) глубокого заложения – Терско-Хасавутского о Пшекиш-Тырныаузского), являющиеся проводниками тепла и флюидов. Разогрев горных пород и интенсивное насыщение флюидами приводил к дилатации горных пород, слагающих осадочные слои, и как вследствие этого к понижению прочности пород и гравитационной неустойчивости, и в конечном счете к резкому усилению складкообразовательного процесса. С процессом дилатации связаны также формирование полезных ископаемых, в частности, УВ-скоплений. В таких условиях и формировались надразломные антиклинальные зоны в районе Передовых хребтов, с которыми связаны основные месторождения нефти и газа, а также термоминеральные источники подземных вод.

То есть, современный структурный план *ТКП*, характеризующийся усложнением снизу вверх, формированием высокоамплитудных, линейно-вытянутых антиклинальных, структур в осевой части, и «структур – спутников» в прибортовых и поднадвиговых зонах, сформирован длительной историей геологического развития территории.

Геологическое развитие региона продолжается и на современном этапе, о чем свидетельствует, в частности, результаты высокоточного повторного нивелирования. Повторное нивелирование по региональным профилям, пересекающим структурно-тектонические элементы западной части *ТКП*, совмещенным с сейсмическими профилями *МОВ ОГТ* и *МОВЗ* позволило получить представления о величине современных тектонических движений земной поверхности, сравнительную характеристику различных структурных зон, локальных складок и систем разломов [Сидоров, 1987; Pogorelova, 2021, и др.].

По данным повторного нивелирования получены следующие основные результаты:

- западная часть *ТКП* характеризуется в целом высокой активностью современных вертикальных движений и расчленена на отдельные блоки и межблоковые зоны;

- высокоградиентные межблоковые зоны хорошо коррелируются (сопоставляются) с глубинными разломами, выделенными по результатам МОВЗ;

- глубинные разломы, определяющие блоковую структуру ТКП и контролирующие распределение скоплений нефти и газа активно развиваются и на современном этапе геологического развития региона; выделены новые зоны и участки современной активизации в пределах погруженных частей прогиба и других структурных зон;

- активные дизъюнктивные нарушения в фундаменте и низах осадочного чехла отражаются на поверхности в виде площадного распределения высокоградиентных зон современных тектонических движений, которые сосредоточены на границах структурных зон и крыльевых частях складок, то есть на границах относительно поднимающихся и опускающихся блоков.

Изучению глубинных разломов, оценке их влияния на геологические особенности фундамента и осадочного чехла, а также на формирование скоплений нефти и газа в пределах Восточного Предкавказья, посвящены многочисленные работы В.Е. Хаина, Е.Е. Милановского, В.В. Белоусова, Г.Д. Ажгирей, М.Ф. Мирчинка, М.В. Муратова, Б.Г. Сократова, И.О. Брода, Н.Ю. Успенской, А.И. Летавина, Б.К. Лотиева, М.Н. Смирновой, Ю.А. Стерленко и многих др. [Хаин, 1973; Милановский, 1968].

В пределах Восточного Предкавказья на начальном этапе исследований были выделены глубинные разломы субширотного простирания – *Пшекиш-Тырныаузский*, *Срединный* (Г.Д. Ажгирей), *Черногорский* (М.Н. Смирнова) и др. В дальнейшем, в пределах рассматриваемой территории был выделен еще ряд разно – ориентированных глубинных разломов. Г.Д. Ажгирей детально описал характерные особенности и роль в истории развития геологических процессов Пшекиш-Тырныаузского разлома [Ажгирей, 1976,].

В 1970–80-х гг., В.Д. Талалаевым, С.А. Аветисянц М.Н. Смирновой и др., были изложены уточненные представления об особенностях тектонического строения западной части ТКП (т.е. расчлененность фундамента глубинными разломами на ряд блоков, сложное горст – грабеновое строение, усиление складчатости с глубиной и т.д.). [Талалаев и др., 1976; Стерленко и др., 1982; Крисюк и др., 1988]. Ими было отмечено, что развитие и характер размещения локальных структур в осадочном чехле ТКП обусловлено в основном наличием шовных зон и разломно-блоковым строением фундамента.

В конце 80-х гг. рядом исследователей – М.Н. Смирновой, И.М. Крисюк, В.Д. Талалаевым, Стерленко и др., по фундаменту ТКП были выделены системы разноориентированных глубинных разломов: субширотные – Краевой, Терский, Сунженский, Пшекиш-Тырныаузский, Черногорский; северо-западные – Гудермесско-Моздокский Бенойско-Эльдаровский, Датыхско-Ахловский, Нальчикский; северо-восточные – Новогрозненский, Аргунский, Цхинвальско-Казбекский, Ардонский, Черекский, Малкинский и др. разломы (рис. 1). Большинство из этих разломов, были отнесены авторами к так называемым шовным зонам – системам сближенных разломов сливающихся на глубине в тектонические швы [Стерленко и др., 1982]. В это же время, сейсморазведочными работами МОВ ОГТ, дистанционными и геодинамическими исследованиями было также установлено сложное разломно-блоковое строение мезозойских отложений и в синклиналиных зонах (Петропавловская, Чеченская и Осетинская впадины) [Mikhailov, 1993, Gaysumov et al., 2019].

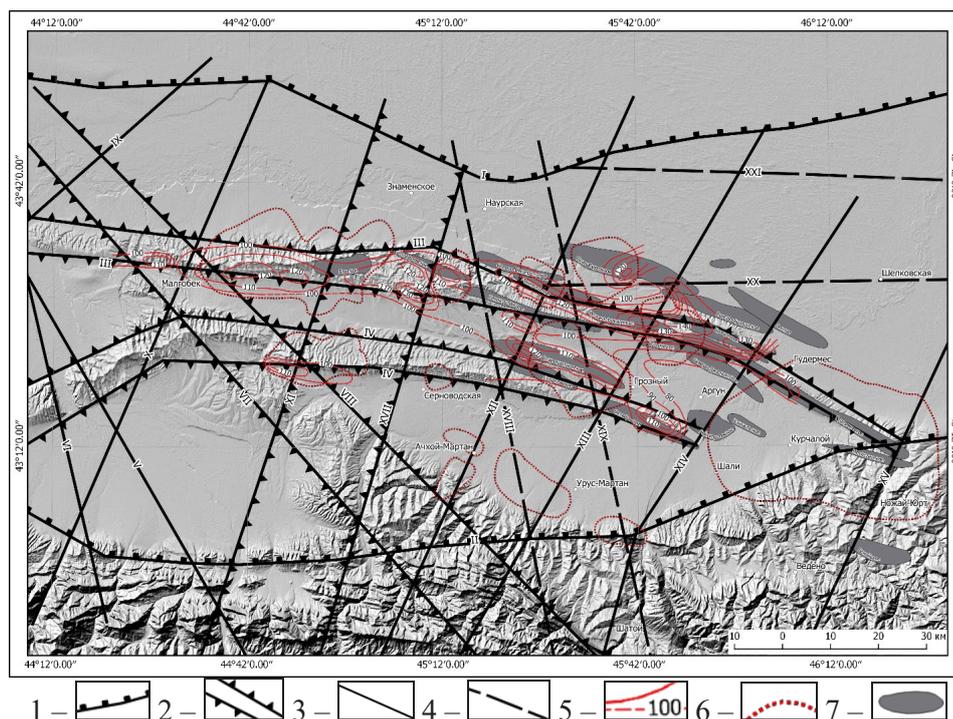


Рис. 1. Карта разломов центральной части ТКП с месторождениями нефти и газа (сост. А.А. Даукаев, М.Я. Гайсумов, С.В. Бадаев). Условные обозначения: 1 – разломы I порядка (шовные зоны) границы ТКП; 2 – разломы II порядка; 3 – глубинные разломы; 4 – предполагаемые; 5 – изотермы на глубине 3000 м, °С, 6 – очаги разгрузки глубинных флюидных систем, выявленных по геотермическим и другим геодинамическим параметрам, 7 – месторождения нефти и газа. I – Краевой; II – Черногорский; III – Терский; IV – Сунженский; V – Урухский; VI – Алагирский; VII – Даттыхско-Ахловский; VIII – Мартановский; IX – Черекский; X – Ардонский; XI – Гизельдонский; XII – Ассинский; XIII – Гехинский; XIV – Аргунский; XV – Аксайский; XVI – Акташский; XVII – Алкунский; XVIII – Самашкинский; XIX – Гойтинский; XX – Шелковской; XXI – Кизлярский /

Fig. 1. Map of faults in the western part of the TCT (compiled by A.A. Daukaev, M.Ya. Gaisumov, S.V. Badaev).

Legend: 1 – faults of the first order of the TCT boundary; 2 – faults of the II order (suture zones); 3 – deep faults; 4 – assumed faults; 5 – isotherms at a depth of 3000 m, °C; 6 – sources of discharge of deep fluid systems, identified by geothermal and other geodynamic parameters; 7 – oil and gas fields. I – Kraevoi; II – Chernogorsk; III – Tersk; IV – Sunzhensk; V – Uruk; VI – Alagir; VII – DattykhAkhlov; VIII – Martan; IX – Cherek; X – Ardon; XI – Giseldon; XII – Assinsk; XIII – Gekhinsk; XIV – Argun; XV – Aksay; XVI – Aktash; XVII – Alkunsk; XVIII – Samashkinsk; XIX – Goytinsk; XX – Shelkovskaya; XXI – Kizlyar

С задачами изучения глубинного строения Терско-Каспийского прогиба в 1983–1985 гг. был отработан региональный профиль МОВЗ по линии Даттых – Дружба протяженностью 120 км. [Кадурина и др., 2000]. По результатам обработки полевых материалов были выделены следующие границы обмена: 4 границы – в консолидированной коре и 2 границы – в осадочном чехле. Почти горизонтальная поверхность мантии зафиксирована на глубине около 40 км. (4-й горизонт «М») с временами запаздывания волн 4,7–5,4 с. Поверхности «базальтового» и «гранитного» слоев отмечены на глубинах 29–33 км и 18–21 км, соответственно [Сидоров и др., 1987]. Кровля кристаллического фундамента (1-й горизонт) с временами запаздывания волн 1,5–2,5 с. фиксируется в пределах глубин от 8 км. (в южной части) до 13–14 км. (на севере).

На профиле МОВЗ в пределах северного борта ТКП фиксируется мощная вулканогенно-осадочная толща раннеюрского возраста, а также восемь зон потери корреляции обменных волн, соответствующие зонам глубинных разломов в земной коре. Данная толща фиксируется и результатами сейсморазведки МОВ ОГТ, а также вскрыта скважинами, в том числе сверхглубокой скважины Бурунная-1 с забоем 7500 м (рис. 2). Между глубинными разломами в осевой части прогиба установлены зоны деструкции земной коры, совпадающие в плане с расположением Терской и Сунженской антиклинальных зон в осадочном чехле.



Рис. 2. Геолого-геофизический разрез по профилю МОВЗ Дружба – Даттых /
 Fig. 2. Geological-geophysical section along the Druzhba-Datt'ykh profile

- | | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

В целом, результатами работ МОВЗ отмечается сложное складчато-блоковое строение фундамента и погруженных зон осадочного чехла в осевой части ТКП [Кадурина и др., 2000; Керимов, 2020]. Структурный план поверхности фундамента по данным МОВЗ и других геофизических методов осложнен выступами, впадинами, антиклинальными и синклиналиными зонами. Глубина залегания фундамента изменяется от 3000 м. в пределах Черногорской моноклинали (пл. Бенной и др.) до 11000–12000 м. в синклиналиных зонах. Очевидно, что разломно-блоковое строение фундамента сыграло решающую роль в формировании структуры осадочного чехла ТКП, особенностью которого является четко выраженная дисгармония складчатости в различных структурно-формационных этажах [Mangino, Priestley, 1998; Конюхов, Малек, 2017; Харченко и др., 2022].

газа из восходящих глубинных флюидных потоков за счет различных химических реакций. По мнению Ф. А. Летникова и других исследователей флюиды играют существенную роль в процессах формирования литосферы. Отмечается, что земная кора образовалась в результате глобальной дегазации планеты, в ходе проявления которой из ее недр в верхние горизонты литосферы и за ее пределы были вынесены значительные массы вещества [Летников, 2013].

Наиболее масштабными флюидосодержащими системами, отражающими на геофизических полях, являются астеносфера и внешнее жидкое ядро Земли, которые производят самые мощные потоки флюидов, на основе которых развиваются все эндогенные процессы в верхних горизонтах литосферы. Как отмечает автор, в глубинных условиях при температуре выше 400°C флюиды представлены газовыми смесями, которые в этих условиях могут достигать высокой плотности и являться уникальным высокоэнергетичным теплоносителем. Знание термодинамики флюидного режима эндогенных процессов предполагает возможность выявления энергетических характеристик флюидных систем, выступающих в роли теплоносителя.

В пределах рассматриваемой территории характер распределения региональных и локальных скоплений УВ контролируется главным образом закономерностями размещения антиклинальных зон и отдельных структур в осадочном чехле. Возникновение и характер размещения же последних обусловлено в основном наличием шовных зон и разломно-блоковым строением фундамента. Результаты обобщения и анализа фактических материалов свидетельствуют о тесной связи стратиграфического диапазона нефтегазоносности со степенью дислоцированности складок. Чем выше этот показатель, тем больше диапазон нефтегазоносности площадей. Установлена корреляционная связь между аномальностью пластового давления и интенсивностью складкообразования, что согласовывается с выводами о том, что «...основной причиной АВПД в залежах является активная геодинамика и внедрение высоконапорных флюидов из глубинных недр» [Даукаев, 2020]. С другой стороны, отмечается связь между интенсивностью складкообразования и объемами запасов нефти и газа. Максимальные объемы запасов УВ (более 90%), приурочены к высокоамплитудным структурам (Брагунская, Эльдаровская и др.) Терского и Сунженского надразломных антиклинорий, которые характеризуются наибольшей интенсивностью развития.

Согласно современной концепции полигенного нефтидогенеза научный и практический интерес в плане поисков месторождений УВ представляют глубокозалегающие горизонты осадочного чехла и кристаллический фундамент [Дмитриевский, 2008]. Целый ряд факторов свидетельствует об образовании крупных высокопродуктивных залежей, в пределах рассматриваемого района, за счет вертикальной миграции флюидных потоков из глубинных недр по разломам в стадии активного и кратковременного проявления предплиоценового, и частично антропогенного тектогенеза [Washbush, Royden, 1992; Kerimov et al., 2017; Даукаев, 2020 и др.]. На вертикальную миграцию нефти указывает также то, что в мощной толще нижнего мела в пределах ТКП установлены незначительные по размерам залежи УВ, в то время как в верхнемеловом комплексе отложений, уступающем по толщине нижнемеловому, открыты крупные залежи нефти. Наибольшей активностью флюидомиграционных процессов характеризуются зоны пересечения разноориентированных разломов (тектонические узлы) – Горско-Эльдаровская, Брагунско-Горячеисточненская, Старогрозненско-Октябрьская и др., что отражается в распределении те-

плового поля, эпицентров землетрясений, а также выходах нефти и термальных вод на поверхность. Внедрившиеся в осадочный чехол под высоким давлением флюиды последовательно заполняли имеющиеся ловушки и создавали новые локальные вмещающие для нефти и газа.

В практическом отношении, предполагая формирование скоплений УВ за счет вертикальной миграции флюидов, можно прогнозировать нефтегазоносность практически всех слоев осадочного чехла вплоть доюрского основания, при наличии благоприятных структурно-тектонических, литолого-фациальных и других условий.

Результаты работы и их обсуждение

Терско-Сунженская складчатая зона характеризуется длительной и сложной историей геологического развития. Последовательное совершенствование применяемых методов и технологий исследований позволило расшифровать сложное разломно-блоковое строение территории Восточного Предкавказья, выявить определенные закономерности в пространственном в глубинном распространении скоплений УВ и изучить условия их образования. Вместе с тем далеко не все однозначно в проблеме формирования развития структурных тектонических элементов и контролируемых ими нефтегазовых скоплений.

Формирование современной структуры ТССЗ и характер размещения месторождений УВ в основном связаны с активным проявлением Терской и Сунженской шовных зон (восточные окончания Пшекиш-Тырныузской и Хасаутской зон разломов глубокого заложения) в предьякчагыльскую и более поздние фазы складчатости. При этом существенную роль сыграл интенсивный подъем Большого Кавказа в условиях субмеридионального сжатия и укорочения земной коры в периоды активизации тектонических движений.

Терская и Сунженская антиклинальные надразломные антиклинальные зоны, контролируемые размещение основных месторождений нефти и газа, являются тектоническими структурами бескорневой складчатости, формировавшиеся в относительно короткий период позднеальпийского геологического развития региона. Образование крупных месторождений УВ в пределах ТССЗ связана периодически прорывающимися высоконапорными глубинными флюидами по активным разломам, которые заполняли имеющиеся по пути их миграции ловушки на разных стратиграфических уровнях и возможно создавали новые за счет физического и химического воздействия на пласты. Об этом свидетельствует плановое соответствие участков с благоприятными емкостно-фильтрационными свойствами в многопластовых месторождениях (Старогрозненское, Октябрьское и др.), несмотря на то, что меловые и миоценовые нефтегазоносные комплексы разделены мощной толщей майкопских глин. Эти крупные очаговые локальные скопления, как правило, контролируются узлами пересечения глубинных разломов, приуроченными к так называемым «трубам дегазации» (по Кропоткину П.А.). Некоторые исследователи эти каналы углеводородной дегазации рекомендуют называть «трубами телетермальной дегазации» в связи с удаленностью очага дегазации от ее разгрузки [Багдасарова, Пиковский, 2018].

Выводы

Таким образом, разломно-блоковая структура земной коры сыграла активную роль в формировании сложного складчато-блокового строения западной части

ТКП, путей миграции флюидных потоков и характера размещения УВ-скоплений.

В практическом отношении предполагая формирование скоплений УВ в результате вертикальной миграции флюидов можно прогнозировать нефтегазоносность практически всех слоев осадочного чехла вплоть до пермо-триасовых отложений включительно, при наличии благоприятных структурно-тектонических, литолого-фациальных и других условий.

Дальнейшее изучение особенностей формирования ТССЗ, зон сочленения отдельных тектонических элементов более мелкого порядка, соотношений структурных этажей и деталей их строения имеет важное значение при выборе направлений дальнейших ГРП на нефть и газ и повышения их геологической эффективности. В этой связи необходимы дальнейшие научные исследования в области изучения тектонических особенностей и условий образования УВ скоплений региона с целью правильной ориентации поисково-разведочных работ на нефти и газ.

Литература

1. Ажгирей Г.Д. Геология Большого Кавказа: Новые данные по стратиграфии, магматизму и тектонике на древних и альпийских этапах развития складчатой области Большого Кавказа. – М.: Недра, 1976. – 263 с.
2. Багдасарова М.В., Пиковский Ю.И. Гидротермальная природа месторождений нефти и газа. // VI-е Кудрявцевские Чтения. Всероссийская конференция по глубинному генезису нефти и газа. Москва, ЦГЭ, 22-24 октября 2018. – С. 27–49.
3. Белоусов В.В. Основы геотектоники. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 382 с.
4. Даукаев А.А. Западная часть Терско-Каспийского прогиба как зона разгрузки глубинных флюидных систем. // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2020. – Вып. 4(31). – С. 103–112. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-31.art7
5. Дмитриевский А.Н. Полигенез нефти и газа. // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 419. №3. – С. 373–377.
6. Кадурина Л.С., Григорьева Н.В., Ишханова Б.Х., Мосиенко Р.Я. и др. Строение земной коры Терско-Каспийского прогиба вдоль Терского профиля по сейсмическим данным. // Геология и минерально-сырьевая база Северного Кавказа. / Материалы IX междунаучно-практич. геол. конф. – Ессентуки, 2000. – С. 262-263.
7. Керимов И.А. Гравитационные аномалии, разломная тектоника и сейсмичность Терско-Каспийского прогиба. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 11. №4. – С. 30–42. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.28.003.
8. Конюхов А.И., Малек Б. Сравнительный анализ геологического строения, обстановок седиментации и нефтегазоносности Месопотамского и Терско-Каспийского передовых прогибов. // Литология и полезные ископаемые. – 2007. – №5. – С. 451–467.
9. Короновский Н.В., Гущин А.И., Никитин М.Ю. и др. Геологическое развитие и становление современной структуры Терско-Каспийского передового прогиба. // Тектоника орогенных сооружений Кавказа и средней Азии. – М.: Наука, 1990. – С. 4–35.
10. Крисюк И.М., Сазонов И.Г., Стерленко З.В. Роль разломов разных генераций в формировании скоплений углеводородов на территории Терско-Каспийского прогиба. / Геолого-геофизические проблемы поисков нефти. – М.: Наука, 1988. – С. 47–53.
11. Летников Ф.А. Синергетические аспекты образования глубинной нефти. // Электрон. журнал «Глубинная нефть». – 2013. – Т. 1. №6. – С. 790–810.
12. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. – М.: Наука, 1968. – 499 с.
13. Расцветаев Л.М. некоторые особенности позднеальпийской структуры орогенных областей Юга СССР и тектонические напряжения новейшего времени. // Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – С. 50–107.

14. Сидоров В.А., Атанасян С.В., Багдасарова М.В. и др. Современные движения земной коры и нефтегазоносность: На примере Терско-Каспийского прогиба. – М.: Наука, 1987. – 119 с.
15. Стерленко Ю. А., Вобликов Б. Г. Геодинамика, глубинные разломы и деструктивные поля Терско-Каспийского прогиба. // Известия СКНЦ ВШ. Естественные науки. – 1991. – №3. – С. 80–88.
16. Талалаев В.Д., Аветисянц С.А. К вопросу о тектонике Терско-Каспийского передового прогиба. // Труды СевКавНИПИнефть, 1976. – Вып. XXIII. – С. 39–44.
17. Хаин В.Е. Общая геотектоника. 2-е изд., перераб. – М.: Недра, 1973. – 512 с.
18. 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
19. Daukaev A.A., Vachaeva T.Kh., Abubakarova E.A., et al. Deep Structure and oil and gas content of submerged zones of Western part of Terek-Caspian Trough. / *Advances in Engineering Research*. vol. 177. / *Int. Symp. on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2018)*. – 2018. – pp. 453–457.
20. Gaysumov M.Ya., Badaev S.V., Akhmatkhanov R.S. et al. Study of the paleozoic base of the Terek-Caspian trough based on the complex of geological and geophysical data. // *Advances in Engineering Research*, Atlantis Press. – 2019. – Vol. 182. – pp. 106-110. DOI: 10.2991/ciggg-18.2019.60
21. Kerimov V.Yu., Lapidus A.L., Yandarbiev N.Sh., et al. Physicochemical properties of shale strata in the Maikop series of Ciscaucasia. // *Solid Fuel Chemistry*. – 2017. – Vol. 51(2). – pp. 122-130.
22. Mangino S., Priestley K. The crustal structure of the Southern Caspian Region. // *Geophysical Journal International*. Royal Astronomical Society, UK. – 1998. – Vol. 133(3). – pp. 630–648.
23. Mikhailov V.O. Crustal control on the Terek-Caspian trough evolution – constraints based on a new paleotectonic analysis method. // *Tectonophysics*. – 1993. – No.228. Vol. 1-2. – pp. 21-32. DOI: 10.1016/0040-1951(93)90212-3
24. Ulmishak Gregory F. Petroleum Geology and Resources of the Middle Caspian Basin, Former Soviet Union. // *U.S. Geological Survey Bulletin*. – 2001. – No.2201–A. – pp. 1-38.
25. Washbush P.J., Royden L.H. Spatial and temporal evolution of marginal basins: variations in lateral strength and inelastic flow in the continental lithosphere. // *Basin Research*. – 1992. – Vol. 4 (3-4). – pp. 179-196. DOI: 10.1111/j.1365-2117.1992.tb00044
26. Pogorelova E. Study of the geodynamic aspects the geological development of the Terek-Caspian trough due to the oil and gas content. // *Norwegian Journal of development of the International Science*. – 2021. – No.69.
27. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 381. – pp. 119-142. DOI: 10.1016/j.tecto. 2003.10.014

References

1. Azhgirey G.D. Geology of the Greater Caucasus: New data on stratigraphy, magmatism and tectonics at the ancient and alpine stages of development of the folded area of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra, 1976. 263 p. (In Russ.)
2. Bagdasarova M.V., Pikovsky Yu.I. Hydrothermal nature of oil and gas fields. In: VI-th Kudryavtsev Readings. All-Russian Conf. on Deep Genesis of Oil and Gas. Moscow, CGE, October 22–24, 2018. pp. 27–49. (In Russ.)
3. Belousov V.V. Basics of geotectonics. 2nd revised ed. Moscow. Nedra, 1989. 382 p. (In Russ.)

4. Daukaev A.A. Western part of the Terek-Caspian trough as a zone of unloading of deep fluid systems. *Current problems of oil and gas*. 2020. Issue. 4(31). pp. 103–112. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-31.art7. (In Russ.)
5. Dmitrievskii A.N. Polygenesis of oil and gas. *Doklady Earth Sciences*. 2008. Vol. 419. No. 2. pp. 373–377. DOI: 10.1134/S1028334X08030033.
6. Kadurina L.S., Grigorieva N.V., Ishkhanova B.Kh., Mosienko R.Ya. and others. The structure of the earth's crust of the Terek-Caspian trough along the Terek profile according to seismic data. In: *Proc. of the IX int. geol. Conf. Geology and mineral resource base of the North Caucasus*. Essentuki, 2000. pp. 262–263. (In Russ.)
7. Kerimov I.A. Gravity Anomalies, Fault Tectonics and Seismicity of the Terek-Caspian Trough. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. Pp. 30–42. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.28.003. (In Russ.)
8. Konyukhov A.I., Maleki B. Comparative analysis of the geological structure, sedimentation conditions and oil and gas potential of the Mesopotamian and Terek-Caspian foredeeps. *Lithology and minerals*. 2007. No. 5. pp. 451–467. (In Russ.)
9. Koronovsky N.V., Gushchin A.I., Nikitin M.Yu. et al. Geological development and formation of the modern structure of the Tersko-Caspian foredeep. In: *Tectonics of orogenic structures of the Caucasus and Central Asia*. Moscow. Nauka, 1990. pp. 4–35. (In Russ.)
10. Krisyuk I.M., Sazonov I.G., Sterlenko Z.V. The role of faults of different generations in the formation of hydrocarbon accumulations in the Terek-Caspian trough. In: *Geological and geophysical problems of oil prospecting*. Moscow. Nauka, 1988. pp. 47–53. (In Russ.)
11. Letnikov F.A. Of synergetic aspects of education deep oil. *Deep Oil*. 2013. Vol. 1. No. 6. pp. 790–810. (In Russ.)
12. Milanovsky E.E. *Recent tectonics of the Caucasus*. Moscow. Nauka, 1968. 499 p. (In Russ.)
13. Rastsvetaev L.M. Some features of the late Alpine structure of the orogenic regions of the South of the USSR and tectonic stresses of modern times. *Newest tectonics, newest sediments and man*. Moscow. MSU, 1973. pp. 50–107. (In Russ.)
14. Sidorov V.A., Atanasyan S.V., Bagdasarova M.V. et al. Modern movements of the earth's crust and oil and gas content: On the example of the Terek-Caspian trough. Moscow. Nauka, 1987. 119 p. (In Russ.)
15. Sterlenko Yu. A., Voblikov BG Geodynamics, deep faults and destructive fields of the Terek-Caspian trough. *Izvestiya NCSC HS. Natural Sciences*. 1991. No. 3. pp. 80–88. (In Russ.)
16. Talalaev V.D., Avetisyants S.A. On the issue of tectonics of the Terek-Caspian foredeep. In: *Proceedings of SevKavNIPIneft*, 1976. Issue. XXIII. pp. 39–44. (In Russ.)
17. Khain V.E. *General geotectonics*. 2nd revised ed. Moscow. Nedra, 1973. 512 p. (In Russ.)
18. Kharchenko V.M., Chernenko K. I., Yeriomina N.V., Samusev D.D. Some patterns of formation and distribution of reef buildups in Triassic deposits on the territory of the Eastern Fore-Caucasus in connection with oil-and-gas potential. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 133–145. DOI: 10.46698/VNC. 2022.80.35.009. (in Russ.)
19. Daukaev A.A., Bachaeva T.Kh., Abubakarova E.A., et al. Deep Structure and oil and gas content of submerged zones of Western part of Terek-Caspian Trough. *Advances in Engineering Research*. vol. 177. ISEES 2018. 2018. pp. 453–457.
20. Gaysumov M.Ya., Badaev S.V., Akhmatkhanov R.S. et al. Study of the paleozoic base of the Terek-Caspian trough based on the complex of geological and geophysical data. *Advances in Engineering Research*, Atlantis Press. 2019. Vol. 182. pp. 106–110. DOI: 10.2991/cigg-18.2019.60
21. Kerimov V.Yu., Lapidus A.L., Yandarbiev N.Sh., et al. Physicochemical properties of shale strata in the Maikop series of Ciscaucasia. *Solid Fuel Chemistry*. 2017. Vol. 51(2). pp. 122–130.
22. Mangino S., Priestley K. The crustal structure of the Southern Caspian Region. *Geophysical Journal International*. Royal Astronomical Society, UK. 1998. Vol. 133(3). pp. 630–648.

23. Mikhailov V.O. Crustal control on the Terek-Caspian trough evolution – constraints based on a new paleotectonic analysis method. *Tectonophysics*. 1993. No.228. Vol. 1-2. pp. 21–32. DOI: 10.1016/0040-1951(93)90212-3.
24. Ulmishek Gregory F. Petroleum Geology and Resources of the Middle Caspian Basin, Former Soviet Union. *U.S. Geological Survey Bulletin*. 2001. No.2201–A. pp. 1–38.
25. Washbush P.J., Royden L.H. Spatial and temporal evolution of marginal basins: variations in lateral strength and inelastic flow in the continental lithosphere. *Basin Research*. 1992. Vol. 4 (3-4). pp. 179-196. DOI: 10.1111/j.1365-2117.1992.tb00044.
26. Pogorelova E. Study of the geodynamic aspects the geological development of the Terek-Caspian trough due to the oil and gas content. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2021. No. 69.
27. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 381. pp. 119–142. DOI: 10.1016/j.tecto. 2003.10.014

УДК 553.98

DOI: 10.46698/VNC.2023.45.74.011

Оригинальная статья

Влияние геодинамических условий на формирование залежей нефти и газа (на примере территории Западной Сибири и Восточного Предкавказья)

А.Е. Неркарарян , В.М. Харченко , Д.Д. Самусев , А.А. Стасенко 

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

Статья поступила: 16.06.2023, доработана: 30.08.2023, принята к публикации: 08.09.2023

Резюме: Актуальность работы. Для повышения эффективности разработки месторождений углеводородов (УВ) и проектирования геолого-технологических мероприятий на основе доступных данных, целесообразно изучение не только геологических условий залежей и месторождений нефти и газа, но и геодинамических условий. Надо особо отметить, что при поисках и разведке месторождений УВ на исследованных территориях, геодинамические условия ранее практически не учитывались, ввиду отсутствия как теоретической базы, так и надежной методологии. В этой работе излагаются результаты геодинамического анализа и очевидная практическая значимость его применения на отдельных месторождениях территорий исследования. **Целью исследования** является изучение геодинамических условий Западной Сибири и Восточного Предкавказья, на предмет выявления наиболее перспективных участков для разработки месторождений УВ на основе нефтегазогеологического районирования. **Методы исследования.** При проведении исследования был использован комплексный подход, включающий анализ, систематизацию и обобщение геолого-промысловых данных, применение системно-аэрокосмического (линеamentного) метода, а также малоизвестного метода интерпретации структур центрального типа (СЦТ). **Результаты работы.** Выявлена взаимосвязь между геодинамическими условиями формирования залежей УВ и максимальными дебитами скважин, которые приурочиваются к геодинамическим центрам и зонам интерференции (наложение зон сжатия и зон растяжения), а также зонам субвертикальной деструкции. Данная взаимосвязь позволяет дать рекомендации для дальнейшей разработки месторождений.

Ключевые слова: геодинамические условия, залежи углеводородов (УВ), ротационная концепция тектогенеза, флюидогеодинамическая модель, структуры центрального типа (СЦТ), «геосолитоны», геодинамический анализ, геодинамические центры, зоны сжатия и растяжения, зоны интерференции.

Для цитирования: Неркарарян А.Е., Харченко В.М., Самусев Д.Д., Стасенко А.А., Влияние геодинамических условий на формирования залежей нефти и газа (на примере территории Западной Сибири и Восточного Предкавказья). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 147-154. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.74.011.

DOI: 10.46698/VNC.2023.45.74.011

Original paper

The influence of geodynamic conditions on the formation of oil and gas deposits (on the example of the territory of Western Siberia and Eastern Ciscaucasia)

A.E. Nerkararian , V.M. Kharchenko , D.D. Samusev , A.A. Stasenko North-Caucasus Federal University,
16/1 Kulakova Ave., Stavropol 355009, Russian Federation,
e-mail: alina-domareva@rambler.ru*Received: 16.06.2023, revised: 30.08.2023, accepted: 08.09.2023*

Abstract. To improve the efficiency of hydrocarbon (HC) field development and design of geological and technological measures based on available data, it is advisable to study not only the geological conditions of deposits and oil and gas fields, but also geodynamic conditions. It should be especially noted that when searching for the exploration of hydrocarbon deposits in the studied areas, geodynamic conditions were practically not taken into account before, due to the lack of both a theoretical basis and a reliable methodology. This paper presents the results of geodynamic analysis and the obvious practical significance of its application in individual fields of the study areas. The purpose of the study is to study the geodynamic conditions of Western Siberia and the Eastern Ciscaucasia, in order to identify the most promising areas for the development of hydrocarbon deposits based on oil and gas geological zoning. **Research methods:** During the study, an integrated approach was used, including analysis, systematization and generalization of geological and field data, the use of a system-aerospace (lineament) method, as well as a little-known method of interpreting central type structures (CST). **Work results:** The relationship between the geodynamic conditions for the formation of hydrocarbon deposits and the maximum flow rates of wells, which are confined to geodynamic centers and interference zones (superposition of compression zones and extension zones), as well as zones of subvertical destruction, has been revealed. This relationship allows us to give recommendations for further development of deposits.

Keywords: Geodynamic conditions, hydrocarbon (HC) deposits, rotational concept of tectogenesis, fluid geodynamic model, central type structures (CCT), “geosolitons”, geodynamic analysis, geodynamic centers, compression and extension zones, interference zones.

For citation: Nerkararyan A.E., Kharchenko V.M., Samusev D.D., Stasenko A.A., Influence of geodynamic conditions on the formation of oil and gas deposits (on the example of the territory of Western Siberia and Eastern Ciscaucasia). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 147-154. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.74.011.

Введение

По нашим представлениям практически все месторождения нефти и газа Восточного Предкавказья и Западной Сибири недоразведаны, несмотря на обилие геофизических исследований и бурения скважин. Это объясняется в первую очередь отсутствием оптимального комплекса методов научного исследования, а также метода выявления геодинамических условий формирования залежей УВ [Пятахин и др., 2018]. Рекомендуется вести разработку месторождений УВ, начиная с дистанционного метода выявления геодинамических условий, предложенного авторами,

с последующим подтверждением минимальным количеством сейсмических профилей и геохимических исследований [Корчуганова, Корсаков, 2009].

Объектом исследования является, прежде всего, территория Западной Сибири и Восточного Предкавказья. В работе впервые предлагается рассмотреть сходство двух районов, с целью получения новых теоретических данных и совершенствования методологии научных исследований, на основе которых будут показаны особенности геолого-тектонического строения и геодинамических условий. Для достижения поставленной цели, в ходе исследования предлагается произвести решение следующих задач: изучить геологическое строение двух территорий исследования, а также выполнить геодинамические исследования; провести рудонефтегазогеологическое районирование в пределах территории исследования.

Методы исследований

Методология научных исследований заключалась в комплексном подходе с применением традиционных и нетрадиционных методов исследования. К традиционным методам относятся: системно-аэрокосмические (дистанционные) [Милосердова, 2022; Харченко и др., 2019]; метод групповой геологической съемки и комплексирование геофизических и геохимических методов. К нетрадиционным методам относятся: геодинамический анализ, метод рудонефтегазогеологического и сейсмического районирования на основе интерпретации структур центрального типа (СЦТ) [Харитонов, 2019а; Харченко и др., 2022]; структурно-метрический метод (на базе природы СЦТ) и метод ландшафтно-геоэкологического картирования. Особое значение имеет простой метод наложения одномасштабных космических снимков и структурных карт отдельных продуктивных горизонтов. Этот метод позволяет не только уточнить местоположение залежи УВ, но и объяснить отсутствие залежей в благоприятных структурных условиях (по сейсмическим данным), кроме того на основе геодинамического анализа выявляются наиболее перспективные участки в пределах и за пределами уже известных месторождений [Борисенко, 2010].

Материалами для научных исследований служат космические снимки различных масштабов, геологические и тектонические карты, карты полезных ископаемых, структурные карты фундамента и продуктивных горизонтов на нефть и газ, карты сейсмичности территорий исследования.

Результаты работы и их обсуждение

На месторождениях Западной Сибири и Восточного Предкавказья, было проведено дешифрирование космических снимков с последующей интерпретацией структур центрального типа и линеаментов. В результате дешифрирования космических снимков территорий исследования было выполнено их нефтегазогеологическое районирование с выделением конкретных нефтегазоносных районов и наиболее перспективных объектов. Эти объекты приурочиваются к геодинамическим центрам, зонам интерференции, «геосолитонам» по Р.М. Бембелю [Бембель и др., 2003, 2006].

Геолого-тектонические и геодинамические условия Западной Сибири и Восточного Предкавказья в целом имеют некоторое сходство, являясь молодыми платформами с герцинским складчатым фундаментом и мезо-кайнозойским осадочным чехлом значительной мощности (до 12 км) [Гзовский, 1975]. Обе эти территории относятся к молодым платформам: Западно-Сибирской и Скифской. Следует отме-

тить, что Скифская плита приурочена к передовому прогибу древней платформы и альпийской складчатой области. В соответствии с тектоникой и выделяются нефтегазоносные провинции: Западно-Сибирская и Северо-Кавказско-Мангышлакская. Общим для обеих территорий является: 1) в их пределах выделяются центральные сводовые части и симметрично расположенные восточные и западные прогибы или нефтегазоносные области; 2) наблюдается приуроченность месторождений к сводам и валлообразным поднятиям, реже к впадинам, ограниченными глубинными разломами; 3) наличие герцинского фундамента, осложненного серией грабенов и горстов с амплитудами сбросов в сотни и первые тысячи метров, с характерной приразломной складчатостью; 4) приуроченность к глубинным разломам вулканических центров триасового возраста, вулканизм которых имел широкое распространение как в Восточной Сибири, так и на территории Восточного Предкавказья и естественно по соседству в Западной Сибири [Харитонов, 2019б]; 5) Так на Восточном Предкавказье буровыми скважинами вскрыты породы жерловых фаций минимум на 16 объектах! В западной Сибири они, несомненно, имеют место, но только на значительных глубинах, которых скважины пока не достигали.

Отмечается закономерная приуроченность к вулканическим центрам Восточного Предкавказья рифогенных построек, которые, как известно, являются благоприятными коллекторами и вмещителями УВ и образуют целые карбонатные платформы [Харченко и др., 2022; Wayne et al., 2006]. Вулканические постройки с бывшими и, возможно настоящими магматическими очагами, являются не только своеобразными корнями, очагами для образования УВ (согласно Б.А. Соколову), но и поставщиками различных флюидов со значительных глубин, не исключая и мантию [Соколов, Абля, 1999].

Выделяемые на сейсмогеологических профилях выраженные впадины с аномально высокими мощностями отложений, по результатам палеоструктурно-геоморфологического метода, по существу представляют собой в целом структуры растяжения, которые имеют особое значение в плане нефтегазоносности территорий [Guliyev, Huseynov, 2012; Miloserdova et al., 2021].

В Западной Сибири, Восточном Предкавказье в сводном геологическом разрезе выделяются следующие сходные структурно-тектонические этажи: комплекс терригенно-карбонатных слабометаморфизованных отложений складчатого герцинского фундамента, переходный пермо-триасовый терригенно-вулканогенный комплекс пород, выполняющих, как правило, глубокие грабены (авлакогены), мощностью до 3–5 км и мезо-кайнозойский в основном терригенный комплекс, мощностью до 5–6 км.

Практически все комплексы пород в той или иной мере нефтегазоносные: в Западной Сибири особо выделяются юрские и нижнемеловые нефтегазоносные отложения баженовской и ачимовской свит, в Предкавказье, особое значение имеют вышележащие отложения майкопской серии олигоцен-миоценового возраста и нижележащие отложения нефтекумской свиты нижнего триаса.

Геодинамические условия Западной Сибири и Восточного Предкавказья, также как и геолого-тектонические, имеют общие черты и даже закономерности. При анализе геодинамических условий и структурного плана выявляется важный факт приуроченности известных залежей УВ большей частью не к благоприятным структурам (выявленным по сейсмическим данным), а к вполне определенным геодинамическим условиям: к геодинамическим центрам и зонам интерференции (наложения

зон сжатий на зоны растяжений). Для этих зон, как правило, характерны АВПД и высокодебитные скважины.

В региональном плане выявляется примерно та же закономерность: приуроченность большей части уже известных месторождений к геодинамическим центрам высокого ранга, к резонансным зонам растяжения. Наглядно это показано также на примере территории Западной Сибири, где практически все известные месторождения нефти и газа приурочиваются к геодинамическим центрам высокого ранга, радиус таких структур центрального типа равен примерно 680 км, что определяет глубину до активной тектонической сферы в верхней мантии. Как известно, на такой глубине (670 км) выделяется глобальная тектоносфера Земли в верхней мантии. Следовательно, интерпретация структур центрального типа и проведение нефтегазогеологического районирования (НГГР) имеет особое значение для этой территории. На предварительной схеме нефтегазогеологического районирования Западной Сибири четко выделяются зоны интерференции практически субмеридионального простирания (со смещением на восток не более чем на 10 градусов) [Самусев, Харченко, 2022]. Наглядным примером также является известное Уренгойское газовое месторождение, контур которого, вытянутый в субмеридиональном направлении практически совпадает с зонами интерференции, выделенных при дешифрировании космических снимков и интерпретации структур центрального типа. Другим наглядным примером является Чупальское месторождение нефти, где высокодебитные скважины-«тысячники» приурочены к геодинамическим центрам и суперрезонансным зонам. На Восточном Предкавказье таким примером является Байджановское нефтегазовое месторождение, где единственная скважина, с уникальной, для данной зоны нефтегазоаккумуляции, накопленной добычей нефти приурочена также к геодинамическому центру.

На Восточном Предкавказье выявленная зона интерференции, практически совпадает с известным Транскавказским субмеридиональным новейшим поднятием, перспективным в плане нефтегазоносности.

Наглядным примером значения геодинамических условий на формирование залежей УВ в Западной Сибири является Лукъявинское месторождение, где в благоприятных структурных условиях (в явной антиклинали) было пробурено 3 поисково-разведочных скважины, а залежей УВ не оказалось, но далее, по этому профилю, ниже по абсолютным отметкам примерно на 100 м, были обнаружены залежи в тех же горизонтах, которые приурочены к благоприятным не только структурным, но и геодинамическим условиям. Такие примеры выявляются и на других месторождениях любых территорий при наложении структурных карт отдельных продуктивных горизонтов и космических снимков такого же масштаба с последующим дешифрированием и интерпретацией структур центрального типа, по которым и выявляются геодинамические условия.

По аналогии с ранее упомянутым, Чапальским месторождением (где в отдельном кусте имеет место скважина-«тысячник»), на Западно-Салымском месторождении были выявлены перспективные зоны для разработки данного месторождения.

На Восточном Предкавказье при проведении рудонефтегазогеологического районирования по аналогии с Байджановским месторождением, рекомендуется вести разработку на известных Величаевско-Колодезном, Ачикулакском, Озек-Суатском и других месторождениях [Нелепов, 2015].

Выводы

1. На основе нового метода рудонефтегазогеологического районирования глобального, регионального и локальных планов, проведено предварительное районирование территорий Западной Сибири и Восточного Предкавказья, отдельных месторождений в этих регионах, сделана предварительная оценка перспективности нефтегазоносности как в целом регионе, так и в пределах известных месторождений.

2. Было выявлено, что практически все месторождения Восточного Предкавказья недоразведаны, подобный вывод сделал в свое время известный исследователь Западной Сибири, Р.М. Бембель, на примере Самотлорского месторождения нефти. Он предлагает «геосолитонную» теорию и свой сейсмический метод поисков зон субвертикальной деструкции. Этот вывод наглядно подтверждается при сопоставлении результатов рудонефтегазогеологического районирования с известными данными по продуктивности скважин, дебитов разведочных и эксплуатационных скважин, где бы они достигали максимально возможных, для территорий работ, дебитов.

3. Места высоких дебитов нефти и газа, по результатам рудонефтегазогеологического районирования четко приурочиваются к геодинамическим центрам, зонам интерференции и зонам субвертикальной деструкции.

4. Результаты рудонефтегазогеологического районирования рекомендуется использовать не только для оценки нефтегазоносности территорий, но и разработки уже известных месторождений нефти и газа.

Литература

1. Бембель Р.М., Бембель С.Р., Мегеря В.М. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. – Тюмень: Вектор Бук, 2003. – 224 с.
2. Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Поиски и разведка месторождений углеводородов на базе геосолитонной концепции дегазации Земли. // *Геология нефти и газа*. – 2006. – №2. – С. 2–7.
3. Борисенко З.Г. Новая теория и практика пространственного размещения залежей нефти и газа в трещинных коллекторах. – Пятигорск: ПГЛУ, 2010. – 168 с. ISBN 5422000498, 9785422000494.
4. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 327 с.
5. Корчуганова Н.И., Корсаков А.К. Дистанционные методы геологического картирования: учебник. – М.: КДУ, 2009. – 288 с.
6. Милосердова Л.В. Аэрокосмические методы в нефтегазовой геологии: Учебник. / Под ред. П.В. Флоренского. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2022. – 502 с.
7. Нелепов М.В. Линейные структуры в накопленной добыче нефти Величаевско-Колодезного месторождения Ставропольского края. // *Нефтяное хозяйство*. – 2015. – №9(1104). – С. 96-97.
8. Пятахин М.В., Пятахина Ю.М., Степин Ю.П. Принятие решения о бурении скважины в условиях неопределенности: традиционный и 3D-палеогеомеханический подходы. // *Газовая промышленность*. – 2018. – №10(775). – С. 42–47.
9. Самусев Д.Д., Харченко В.М. Геодинамические условия формирования залежи углеводородов и выявления сейсмичности территории на примере Западной Сибири // *Материалы X Международной научной конференции молодых ученых «Молодые – Наукам о Земле»* – М.: Издательство Российский Государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 2022. – 116 с.

10. Соколов Б.А., Абля Э.А. Флюидодинамическая модель нефтегазообразования. – М.: ГЕОС, 1999. – 76 с.
11. Харитонов А.Л. Нефтегазоносность морфоструктур центрального типа на территории Восточной Сибири. // *Neftegaz.RU*. – 2019а. – №4. – С. 106–110.
12. Харитонов А.Л. Глубинная разломная структура земной коры на территории Средне-Каспийского мантийного палеоплюма по данным магнитного и гравитационного полей. // *International Journal of Professional Science*. – 2019б. – №12. – С. 40–46. UDC 551.14-536.25
13. Харченко В.М., Лапта Д.В., Неркаряян А.Е. Комплексные дистанционные и геофизические методы поисков залежей углеводородов (территория Центрального Предкавказья). // *Наука. Инновации. Технологии*. – 2019. – №4. – С. 33–48.
14. Харченко В.М., Фирсова Д.Л., Стасенко А.А., Михайличенко Р.В., Аль Хасрачи Али Джаббар, Евсюкова А.Н. Новый метод рудонефтегазогеологического и сейсмического районирования. // *Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития территорий: сборник трудов III Международной научно-практической конференции*. / ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2022. – 662 с.
15. 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.
16. Guliyev I., Huseynov D. Fluid dynamics and seismicity of the Caspian sea. // *Conference: 11th International Conference on Gas in Marine Sediments*. – 2012.
17. Miloserdova L.V., Dintsova K.I., Khafizov S.F., Iskaziev K.O., Osipov A.V. Connection of lineaments and nodes of their intersections with the oil and gas content of the Caspian syncline and its framing (Russian). // *Oil Industry Journal*. – 2021. – Vol. 6. – pp. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26
18. Wayne N., Schechter D.S., Laird B. Thompson Naturally Fractured Reservoir Characterization. // *SPE*. – 2006. – 121 p. ISBN: 978-1-55563-112.

References

1. Bembel R.M., Bembel S.R., Megerya V.M. Geosolitons: the functional system of the Earth, the concept of exploration and development of hydrocarbon deposits. Tyumen: Vector Buk, 2003. 224 p.
2. Bembel R.M., Megerya V.M., Bembel S.R. Search and exploration of hydrocarbon deposits based on the geosoliton concept of Earth degassing. *Geology of Oil and Gas*. 2006. No. 2. p. 2-7.
3. Borisenko Z.G. New theory and practice of spatial distribution of oil and gas deposits in fractured reservoirs. PSLU, 2010. 168 p. ISBN 5422000498, 9785422000494.
4. Gzovsky M.V. Fundamentals of tectonophysics. Moscow. Nauka, 1975. 327 p.
5. Korchuganova N.I., Korsakov A.K. Remote methods of geological mapping: textbook. Moscow. KDU, 2009. 288 p.
6. Miloserdova L.V. Aerospace methods in oil and gas geology: Textbook. Ed. P.V. Florensky. Moscow. Nedra Publishing House LLC, 2022. 502 p.
7. Nelepov M.V. Linear structures in the cumulative oil production of the Velichaevsko-Kolodeznoye field of the Stavropol Territory. *Neftyanoekhozyaystvo*. 2015. No. 9 (1104). С. 96-97.
8. Pyatakhin M.V., Pyatakhina Yu.M., Stepin Yu.P. Decision making about drilling a well under conditions of uncertainty: traditional and 3d-paleogeomechanical approaches. *Gas industry*. 2018. No. 10 (775)
9. Samusev D.D., Kharchenko V.M. Geodynamic conditions for the formation of hydrocarbon deposits and the detection of seismicity of the territory on the example of Western Siberia. Proceedings of the X International Scientific Conference of Young Scientists “Young – to the

Sciences of the Earth". Moscow. Publishing House of the Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidz. Moscow. 2022. 116 p.

10. Sokolov B.A., Ablya E.A. Fluid dynamic model of oil and gas formation. Moscow. GEOS, 1999. 76 p.

11. Kharitonov A.L. Oil and gas potential of central type morphostructures in Eastern Siberia. Neftegaz.RU. 2019. No. 4.

12. Kharitonov A.L. Deep fault structure of the earth's crust on the territory of the Middle Caspian mantle paleoplum according to magnetic and gravitational fields. International Journal of Professional Science No. 12-2019. UDC 551.14-536.25

13. Kharchenko V.M., Lapta D.V., Nerkararyan A.E. Integrated remote sensing and geophysical methods for prospecting for hydrocarbon deposits (territory of the Central Ciscaucasia). The science. Innovation. Technologies. 2019. No. 4. pp. 33 48.

14. Kharchenko V.M., Firsova D.L., Stasenko A.A., Mikhailichenko R.V., Al Khasrachi Ali Jabbar, Evsyukova A.N. A new method of ore-gas-geological and seismic zoning. Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of Sustainable Development of Territories: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference / North Caucasian Federal University. Stavropol. Izd-vo SKFU, 2022. 662 p.

15. Kharchenko, V.M., Chernenko, K.I., Yeriomina, N.V., Samusev, D.D. Some patterns of formation and distribution of reef buildups in Triassic deposits on the territory of the Eastern Fore-Caucasus in connection with oil-and-gas potential. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii*. 2022. Vol. 12(3). pp. 133-145

16. Guliyev I., Huseynov D. Fluid dynamics and seismicity of the Caspian sea. Conference: 11th International Conference on Gas in Marine Sediments. 2012.

17. Miloserdova L.V., Dintsova K.I., Khafizov S.F., Iskaziev K.O., Osipov A.V. Connection of lineaments and nodes of their intersections with the oil and gas content of the Caspian syncline and its framing (Russian). *Oil Industry Journal*. 2021. Vol. 6. pp. 22–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-22-26.

18. Wayne Narr, David S. Schechter and Laird B. Thompson Naturally Fractured Reservoir Characterization. SPE. 2006. 121 p. ISBN: 978-1-55563-112.

УДК 504.062.2 626.87

DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012

Оригинальная статья

Оценка эффективности использования флюсового известняка Сокольско-Ситовского месторождения в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв

В.А. Матвеева , **А.В. Лукьянова** 

Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2,
e-mail: matveeva_va2@pers.spmi.ru, lknnn99@gmail.com

Статья поступила: 03.05.2023, доработана: 15.07.2023, принята к публикации: 10.08.2023

Резюме: Актуальность работы. В настоящее время проблема закисления почв становится с каждым годом все более масштабной и затрагивает новые территории. Это происходит в связи с постоянно увеличивающейся нагрузкой на почвы от промышленных объектов, а также многократным использованием почвенных ресурсов в севообороте без дополнительной помощи в восстановлении. Особое негативное воздействие наносит горнопромышленный сектор, который использует большое количество почвенных ресурсов, а не подвергшиеся нарушению почвы испытывают колоссальную нагрузку от деятельности предприятия в результате выбросов загрязняющих веществ, пыления техногенных массивов, неорганизованного сброса сточных вод. При этом время, затрачиваемое на восстановление нарушенных территорий, исчисляется десятилетиями. Без дополнительной поддержки извне, которая может быть представлена искусственным внесением нейтрализаторов кислых почв, данная проблема не может быть решена в короткие сроки. Однако учитывая ежегодно увеличивающуюся площадь кислых почв, возрастает потребность в поиске новых материалов, состав и свойства которых позволят использовать их в качестве высокоэффективных нейтрализаторов. **Целью работы** является анализ существующих решений проблемы деградации почв в результате закисления и оценка потенциальной возможности и эффективности использования флюсового известняка в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв. **Методы работы.** Для объективной оценки и получения достоверных результатов были проведены полевой и лабораторный эксперименты, включающие контрольные натурные наблюдения, а также замеры прироста и всхожести. В рамках реализации экспериментальной части и для расчета допустимых доз внесения проводился химический анализ флюсового известняка и почв методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Контроль изменения pH почв на протяжении эксперимента проводился потенциометрическим методом. **Результаты работы.** В результате проведенных исследований с использованием различных по толерантности к кислым почвам растений был сделан вывод, что флюсовый известняк удовлетворяет требованиям, предъявляемым к мелиорантам. Результаты экспериментов доказывают, что известняковый щебень Сокольско-Ситовского месторождения пригоден и эффективен в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв с учетом допустимых доз внесения. Рассматриваемый известняковый щебень можно рекомендовать в качестве мелиоранта, как для проведения почвоулучшающих мероприятий в сельском хозяйстве, так и для внесения мелиоранта в почвогрунт при проведении рекультивационных мероприятий.

Ключевые слова: Известняковый щебень, мелиорант, известкование, кислые почвы, степень кислотности почв, доза внесения мелиоранта, прирост, всхожесть.

Для цитирования: Матвеева В.А., Лукьянова А.В. Оценка эффективности использования флюсового известняка Сокольско-Ситовского месторождения в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 155-168. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012.

DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012

Original paper

Evaluation of the effectiveness of the use of fluxing limestone of Sokol-Sitov deposit as a ameliorant for the neutralization of acidic soils

V.A. Matveeva , A.V. Lukyanova 

St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, Saint Petersburg 199106, Russian Federation,
e-mail: Matveeva_VA2@pers.spmi.ru, lknnn99@gmail.com

Received: 03.05.2023, revised: 15.07.2023, accepted: 10.08.2023

Abstract: Relevance. Currently, the problem of soil acidification is becoming more widespread every year and affects new areas. This is due to the impact increased on soils, multiple use of soil resources in the crop rotation without additional assistance in the restoration, as well as the use of resources in industry. Particular negative impact is caused by the mining, which uses a large amount of soil resources. At the same time, the time it takes to restore the disturbed areas is counted in decades. Without the support of the people, this problem cannot be solved in the short term. **The aim of the work** is to analyze existing solutions to this problem and assessment of effectiveness of the proposed method. **Methods.** This article assessed the effectiveness of fluxing limestone as a ameliorant for neutralizing acidic soils. For an objective assessment and obtaining reliable information, field and laboratory experiments were carried out, growth and germination were measured. For each experiment the plants and the period were determined. For the experimental part of the preliminary analysis of limestone and soils on the content of heavy metals, also, to determine the change in the state of the soil pH were measured. **As a result** of the analyses, it was concluded that the fluxing limestone meets the requirements for ameliorants. The results of the experiments prove that limestone crushed stone of the Sokol-Sitov deposit is suitable and effective as a reclamation agent for neutralizing acidic soils.

Keywords: limestone rubble, ameliorant, liming, acidic soils, degree of soil acidity, ameliorant dosage, growth, germination.

For citation: Matveeva V.A., Lukyanova A.V. Evaluation of the effectiveness of the use of fluxing limestone of Sokol-Sitov deposit as a ameliorant for the neutralization of acidic soils. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 155-168. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012.

Введение

Кальцит – распространенный минерал, формирующий основную массу известняковых гор, образующихся при разных геологических процессах [Putra et al., 2020]. Сейчас известняк преимущественно используется в металлургии [Holland et al., 2018]. Минерал используют в качестве дополнительного сырья в строительстве и во многих других областях. Ежегодное мировое потребление известняков превышает 500 млн т (Обзор рынка известняка в России [Электронный ресурс]. – М., 2010. – 19 с. URL: http://www.infomine.ru/files/catalog/332/file_332.pdf (Дата обращения 11.01.23)). В России в 70-х годах 20-го века государство объявило программу по известкованию, и за 20 лет существования она значительно улучшила состояние почвы во всей стране [Белоброва, 2018]. В начале 2000-х годов программу отменили, а люди оказались не способны поддерживать надлежащий уровень известкования [Федулова, 2019].

В результате, за несколько лет качество земель значительно ухудшилось, а к моменту 2016 года объемы известкования снизились в 30 раз [Вукowa et al., 2021].

По данным Росстата в 2022 году общие по стране объемы добычи известняка составили 4,8 млн т, что на 6,2% больше, чем в январе 2021 года (Динамика промышленного производства в январе 2022 года [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/154712> (Дата обращения 11.01.23)). Одним из крупнейших на территории РФ является Сокольско-Ситовское месторождение по добыче флюсового известняка. Предприятия горной отрасли испытывают ряд проблем, связанных с негативным воздействием на компоненты окружающей природной среды [Свалова, 2022]. Рассматриваемый объект не является исключением. Так, совершенствование технологических процессов в металлургии привело к образованию и накоплению не востребованной фракции известнякового щебня крупностью 8–25 мм. Учитывая вышесказанное, на данный момент существует необходимость в поиске и обосновании альтернативных вариантов использования флюсового известняка и поиске нового рынка сбыта.

На протяжении 55 лет Агрохимической службой проводился мониторинг плодородия почв, результаты которого однозначно указывают на усиливающуюся деградацию [Litvinovich et al., 2021]. На момент 2019 года площадь кислых почв в Российской Федерации составляла примерно 35 млн га [Stekolnikov et al., 2021].

Интенсивное развитие горной промышленности также способствует увеличению количества нарушенных территорий [Ратников и др., 2019]. В результате воздействия горнодобывающей промышленности на момент 2019 года из хозяйственного оборота выведено более 578 тыс. га земель, и площади нарушенных земель ежегодно увеличиваются (Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. С. 884).

Путь самовосстановления почв без помощи человека долгий, процесс деградации происходит гораздо быстрее, в связи с чем становится очевидна необходимость участия человека в устранении имеющихся проблем [Пашкевич и др., 2019].

Сейчас известно большое количество различных способов и составов для улучшения состояния почв и мелиорации нарушенных земель [Сарапулова, 2020; Митракова и др., 2023]. Среди них можно отметить использование осадка сточных вод [Петрова, 2021; Petrova et al., 2022], золы от сжигания городских сточных вод [Смирнов, Сучкова, 2019], фосфогипса [Smirnov et al., 2021] и многое другое [Strizhenok et al., 2021; Korelskiy et al., 2020].

Известковые мелиоранты по воздействию достаточно многофункциональны и универсальны [Белоброва, 2018]. Использование мелиорантов благоприятно влияет на кислые и некарбонатные почвы, улучшает структуру почв, нейтрализует кислоты [Стогний и др., 2021]. Изменение кислотности влечет за собой снижение количества тяжелых металлов в растениях [Пашкевич и др., 2017]. В связи с вышеизложенным, цель исследования – анализ эффективности применения флюсового известняка в качестве мелиоранта для кислых почв.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: определить основные химические характеристики известнякового щебня: валовое содержание компонентов, нейтрализующая способность; для всех видов почв, участвующих в экс-

перименте, определить актуальную, обменную и гидролитическую кислотность, содержание тяжелых металлов; провести расчет доз внесения мелиоранта для каждой серии экспериментов; провести эксперименты по выращиванию различных видов растений в лабораторных и полевых условиях.

Для проведения анализов известнякового щебня предварительно проводилась пробоподготовка. Объединенная проба отквартовывалась до достижения необходимого объема аналитической пробы. После чего проба измельчалась в щековой дробилке до крупности менее 2 мм. Пробоподготовка для анализа на валовое содержание тяжелых металлов, заключалась в разложении проб с использованием микроволновой печи Multiwave 3000. Навеска анализируемой пробы помещалась в реакционную ячейку, к навеске приливались реагенты, реакционная емкость закрывалась и помещалась в камеру, после чего запускалась программа для разложения проб. По завершении программы полученный раствор фильтровали через фильтр «синяя лента» и разбавляли бидистиллированной водой.

Пробоподготовка для определения подвижных форм тяжелых металлов заключалась в приготовлении ацетатно-аммонийной вытяжки. К навеске пробы добавлялся ацетатно-аммонийный буферный раствор. Полученная суспензия перемешивалась в течение 3 минут, после чего отстаивалась в течение суток и фильтровалась через фильтр «синяя лента» в стеклянную колбу. Анализ подготовленных проб проводился методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на анализаторе ICPE-9000 в соответствии с методикой. Также в ходе лабораторных исследований была определена нейтрализующая способность известняка.

Пробы почвы отбирались таким образом, чтобы в каждом случае проба представляла собой часть почвы, типичной для генетических горизонтов данного типа почвы. Для лабораторного эксперимента пробы почвы отбирались в непосредственной близости от объекта исследования, на территории Липецкой области, Данковского района, с. Долгое. Это обусловлено тем, что известняковый щебень предпочтительнее не подвергать транспортировке на большие расстояния, т.к. это влечет за собой разрушение материала. Также, за счет транспортных расходов, стоимость материала будет увеличиваться. В связи с этим целесообразной была проверка эффективности использования материала на территориях, приближенных к месту добычи исследуемого известняка.

Полевой эксперимент проводился на территории Ленинградской области, Тоснинского района. Место для проведения полевых исследований выбрано на основании отнесения рассматриваемых почв к категории слабокислых, а транспортная доступность выбранного участка позволила организовать наблюдения и своевременный контроль с использованием приборно-лабораторной базы Научного Центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Горного университета.

Почвы для полевого эксперимента относятся к дерново-подзолистым, а почвы для лабораторного эксперимента принадлежат к черноземам выщелоченным и оподзоленным. Подготовка твердых проб к химическому анализу проводилась посредством их доведения до воздушно-сухого состояния (ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа). Для доведения образца почвы до воздушно-сухого состояния почва тонким слоем раскладывалась на поддоны, и из пробы извлекались посторонние механические включения. Для определения состава почвы отбиралась аналитическая проба методом квартования.

В лабораторных условиях определение pH проводилось для водной, солевой и ацетатно-натриевой вытяжек. Для приготовления водной вытяжки с помощью аналитических весов была отобрана навеска пробы почвы массой 30 г. Затем к навеске добавлялось 150 см³ дистиллированной воды и в течение 3 минут производилось перемешивание суспензии. После чего полученная суспензия анализировалась без предварительной фильтрации (ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки). Для приготовления солевой вытяжки с помощью аналитических весов была отобрана навеска пробы почвы массой 3 г. Затем к навеске добавлялось 75 см³ раствора хлорида калия концентрации 1 Н и в течение 3 минут производилось перемешивание суспензии. После чего полученная суспензия анализировалась без предварительной фильтрации (ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО). Для измерения использовался pH-метр «МАРК-903».

Химический анализ проб почв проводился аналогично анализу известняково-го щебня на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICPE-9000 (М-МВИ-80-2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии, 2008). Основные принципы расчета доз внесения мелиоранта с учетом содержания тяжелых металлов были взяты из ГОСТ Р 54651-2011 (ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод).

Результаты анализа известнякового щебня на содержание тяжелых металлов приведены в таблице 1. Анализ полученных значений производился путем сравнения с нормативными значениями, а именно: с ориентировочно допустимой концентрацией (ОДК) и предельно допустимой концентрацией (ПДК) (ГН 2.1.7.2511-09 Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве; ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве).

Таблица 1 / Table 1

Содержание металлов в известняковом щебне / Metal content in limestone gravel

Показатель / Figure	Массовая доля, мг/кг / Massfraction, mg/kg		ОДК, мг/кг / APCs, mg/kg	ПДК, мг/кг / MPCs, mg/kg
	Валовое содержание / Grosscontent	Содержание подвижных форм / Content of mobile forms		
Cd	н/о	0,44	2,00	-
Mn	23,00	н/о	-	1500,00
Cu	0,47	0,16	132,00	-
Zn	1,20	0,02	220,00	-
Ni	1,20	0,05	80,00	-
V	2,10	н/о	-	150,00
Co	н/о	0,10	5,00	-

Примечание / Note: н/о – не определялось, так как данный показатель не нормируется в почве; Погрешность методики – 30%.

Превышений по тяжелым металлам в рассматриваемом известняке не обнаружено. По результатам анализа общей нейтрализующей способности установлено,

что образец известнякового щебня обладает нейтрализующей способностью равной 97,08%. Это означает, что 97,08% массы щебня может вступить в реакцию нейтрализации, что является высоким показателем для данного образца. Подобный уровень нейтрализующей способности показывает, что используемый известняк можно отнести к 1 сорту. 1 сорт содержит больше действующего вещества, чем 2-ой сорт, и, соответственно, является более эффективным мелиорантом (Известковые удобрения. Классификация. Промышленные удобрения (твёрдые известковые породы) [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/5050216/page:3/> (Дата обращения 11.02.23)). На первом этапе экспериментальных исследований в лабораторных условиях определялись актуальная и обменная кислотности. С учетом значений гидролитической кислотности впоследствии определялись дозы внесения мелиоранта. Результаты измерения pH представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты измерения pH почвы для лабораторного эксперимента /
Results of soil pH measurement for laboratory experiment**

Вид вытяжки / Form of an extract	Полученное значение, ед. pH / Obtained value, pH units	Кислотность почвы в соответствии с (ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений) / Soil acidity according to
Водная / Water extract	5,67	Кислотная среда / Acidic environment
Солевая / Salt extract	5,21	Слабокислая среда / Weakly acidic environment

Примечание/ Note: Погрешность определения pH в соответствии с методикой равна 0,1 единицы pH. /

Почвы также анализировались на содержание тяжелых металлов. Результаты анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

**Результаты измерения тяжелых металлов в почве для лабораторного эксперимента /
Results of heavy metals measurement in soil for laboratory experiment**

Показатель / Figure	Массовая доля, мг/кг / Mass fraction, mg/kg		ОДК, мг/кг / APCs, mg/kg	ПДК, мг/кг / MPCs, mg/kg
	Валовое содержание / Gross content	Содержание подвижных форм / Content of mobile forms		
Cd	н/о	1,56	2,00	-
Co	н/о	4,90	5,00	-
Cu	н/о	16,30	132,00	-
Mn	482,00	н/о	-	1500,00
Ni	н/о	32,90	80,00	-
Zn	н/о	45,30	220,00	-
V	74,30	н/о	-	150,00

Примечание / Note: н/о – не определялось, так как данный показатель не нормируется в почве; Погрешность методики – 30%. /

Опираясь на полученные результаты можно сделать вывод, что концентрации всех веществ не имеют превышений допустимых концентраций тяжелых металлов. На следующем этапе проводился расчет дозы внесения мелиоранта предварительно измельченного до крупности менее 2 мм. Доза внесения известнякового мелиоранта рассчитывалась по гидролитической кислотности с учетом нейтрализующей способности ($D_{\text{нейтр}}$) и содержания тяжелых металлов. Результаты расчетов показали, что для нейтрализации исследуемого образца кислых почв необходимо 15,6 тонн мелиоранта на 1 га. Для лабораторного эксперимента было принято решение использовать расширенный перечень растений с разной восприимчивостью к кислотности почв для объективной оценки действия мелиоранта. Растения, выбранные для эксперимента представлены в таблице 4 (Отношение растений к кислотности почв [Электронный ресурс]. URL: <https://www.activestudy.info/otnoshenie-rastenij-k-kislotnosti-pochv/> (Дата обращения 14.01.23)).

Таблица 4 / Table 4

Растения для лабораторного эксперимента / Plant for laboratory experiment

Растение / Plant	Предпочтительный диапазон pH / Preferable pH range	
	Водная вытяжка / Water extract	Солевая вытяжка / Salt extract
Клевер / Clover	6,5-7,0	6,0-7,0
Овес / Oats	5,5-8,0	5,0-7,5
Газонная трава / Lawngrass	6,5-7,5	6,0-7,0
Горох / Peas	6,5-7,0	6,0-6,5
Тимофеевка луговая / Meadow Timothy	5,5-8,0	5,0-7,5
Щавель / Sorrel	5,0-5,5	4,5-5,0

В ходе экспериментальных исследований были рассмотрены 4 площадки с разным количеством вносимого мелиоранта. В первом варианте это была фоновая площадка без мелиоранта, во втором – площадка с целой дозой внесения, в третьем – площадка с половиной дозы, и в четвертом с четвертью от целой дозы внесения мелиоранта. В ходе проведения эксперимента фиксировались: всхожесть, прирост, а также pH почвы после окончания эксперимента для каждой экспериментальной площадки.

На заключительном этапе в период с 07.06.22 г. по 24.09.22 г. аналогично лабораторному проводился полевой эксперимент в Тосненском районе Ленинградской области на территории со слабокислыми почвами. Определенная на основании лабораторных исследований доза внесения рассматриваемого известняка составила 24,41 т/га. Для выращивания были выбраны два растения – клевер красный (используется в рекультивации) и овес (используется в с/х). Были определены 6 вариантов высадки для каждого из растений. Площадка для высадки без внесения мелиоранта была использована как фоновая площадка. На остальных площадках мелиорант вносился в разных пропорциях. В ходе эксперимента были также проведены замеры прироста и всхожести для каждого из растений. После окончания эксперимента были отобраны пробы почвы и проведен анализ на определение уровня pH.

Результаты работы и их обсуждение

Результаты измерения рН почвы, отобранной на экспериментальных площадках, где произрастали растения при проведении лабораторного эксперимента, представлены в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

Результаты измерения рН почвы в лабораторном эксперименте / Results of soil pH measurement in laboratory experiment

Растение / Plant	Доза внесения, г / Dose of application, g	рН почвы до эксперимента / Soil pH befor etheexperiment		Оптимальный рН почвы для растения / Optimal soil pH for the plant	рН почвы после эксперимента / Soil pH after the experiment	
		рН _{H2O}	рН _{KCl}		рН _{H2O}	рН _{KCl}
Овес / Oats	Фон / Background value	5,67	5,21	5,0-7,5	5,92	5,71
	15,6				7,82	7,34
	7,8				7,54	7,01
	3,9				7,16	6,16
Клевер / Clover	Фон / Background value	5,67	5,21	6,0-6,5	6,01	5,52
	15,6				7,22	7,02
	7,8				7,14	6,86
	3,9				7,10	6,62
Тимофеевка луговая / Meadow Timothy	Фон / Background value	5,67	5,21	5,0-7,5	5,96	5,47
	15,6				7,22	6,86
	7,8				7,20	6,84
	3,9				6,78	6,42
Газонная трава / Lawn grass	Фон / Background value	5,67	5,21	6,0-7,0	5,93	5,52
	15,6				7,66	7,44
	7,8				7,31	7,10
	3,9				6,97	6,79
Щавель / Sorrel	Фон / Background value	5,67	5,21	4,5-5,0	5,69	5,35
	15,6				7,59	7,08
	7,8				7,55	6,97
	3,9				7,05	6,37
Горох / Peas	Фон / Background value	5,67	5,21	6,0-6,5	6,07	5,52
	15,6				7,29	6,64
	7,8				7,22	6,62
	3,9				7,05	6,43

Как видно из таблицы 5, изменение рН произошло на всех экспериментальных площадках пропорционально дозам внесения мелиоранта. У части растений значения рН почвы после эксперимента оказались некомфортными для произрастания,

что отразилось на приросте и всхожести. Значения прироста растений, замеренные во время лабораторного эксперимента, приведены в таблице 6.

Таблица 6 / Table 6

**Результаты измерения прироста растений в лабораторном эксперименте /
Results of measuring plant growth in a laboratory experiment**

Растение / Plant	Доза внесения, г / Dose of application, g	Даты замеров / Measuring dates						Итоговый прирост, см / Total increase, cm
		7.11- 11.11	11.11- 14.11	14.11- 21.11	21.11- 25.11	25.11- 2.12	2.12- 9.12	
Овес / Oats	Фон / Background value	10,6	2,8	0,3	0,5	2,8	0,1	17,1
	15,6	10,6	2,7	0,5	0,5	2,5	0,1	16,9
	7,8	11,1	2,3	0,5	0,5	2,7	0,1	17,2
	3,9	10,7	2,7	0,4	0,4	2,7	0,2	17,1
Клевер / Clover	Фон / Background value	0,1	0,3	0,6	0,4	1,9	0,2	3,5
	15,6	1,0	0,3	0,6	1,3	0,9	0,1	4,2
	7,8	1,4	0,3	0,7	1,8	0,6	0,3	5,1
	3,9	1,0	0,4	0,5	2,1	0,5	0,2	4,7
Тимофеевка луговая / Meadow Timothy	Фон / Background value	1,5	0,6	1,5	1,5	2,9	1,5	9,5
	15,6	1,2	1,5	0,5	1,9	3,2	1,2	9,5
	7,8	1,2	0,8	1,4	1,7	2,8	1,6	9,5
	3,9	1,2	1,0	1,0	1,9	2,9	1,3	9,3
Газонная трава / Lawn grass	Фон / Background value	7,2	0,8	0,4	4,9	4,6	4,6	22,5
	15,6	6,8	0,3	1,2	3,5	5,2	2,2	19,2
	7,8	7,6	0,9	0,2	5,6	5,3	5,1	24,7
	3,9	6,3	0,3	0,5	6,1	6,3	6,5	26,0
Щавель / Sorrel	Фон / Background value	1,0	0,4	0,9	1,7	1,8	0,3	6,1
	15,6	-	0,2	0,2	0,5	1,0	0,2	2,1
	7,8	0,8	0,2	0,3	1,8	1,1	0,3	4,5
	3,9	0,6	0,1	0,4	2,1	1,3	0,3	4,8
Горох / Peas	Фон / Background value	2,0	5,2	4,0	1,1	0,5	0,5	13,3
	15,6	2,4	5,3	1,0	1,9	1,2	1,6	13,4
	7,8	4,0	4,3	3,7	0,8	0,3	2,5	15,6
	3,9	4,4	5,0	2,8	0,8	0,3	3,6	13,9

У овса наибольший прирост отмечен на площадке, где была внесена половина от целой дозы. Всхожесть на всех площадках примерно одинаковая. Значения прироста отличаются друг от друга незначительно. Это обусловлено тем, что на всех площадках значения рН входят в комфортный для растения диапазон значений.

Наилучшая всхожесть клевера отмечалась на площадках с половиной и четвертой частью от целой дозы. На данных площадках измеренный рН входит в предпочтительный для произрастания диапазон значений. Максимальный прирост на площадке отмечен там, где была внесена половина от целой дозы.

Показатели прироста и всхожести тимофеевки луговой на протяжении всего эксперимента находились в примерно одном диапазоне значений. Это обусловлено тем, что на всех площадках измеренный рН относился к наиболее комфортным значениям.

Более активная всхожесть и прирост газонной травы отмечались на площадках с половиной и четвертью от целой дозы. На двух других площадках растение чувствовало себя хуже.

На всех участках выращивания щавеля растение было вялое, лежало на земле. Среднее время вегетационного периода растения 40–45 дней. Эксперимент продолжался порядка 40 дней, при этом растение не достигло нормальных размеров и развивалось гораздо медленнее. Ни на одной из площадок значения рН не соответствовали предпочитаемому диапазону значений, это объясняет состояние растения и плохие результаты всхожести и прироста.

Для гороха наибольший прирост наблюдается при внесении наименьшей дозы на площадь. На площадке с наименьшей дозой значения рН комфортны для растения. На остальных площадках с мелиорантом, растение чувствует себя немного хуже, но в целом прирост и всхожесть отличаются не сильно. Подводя итоги по проведенному лабораторному эксперименту, можно сказать, что внесение мелиоранта в рассчитанных дозах корректирует кислотность почв.

После лабораторного эксперимента проводился полевой этап. Далее будут описаны результаты полевого эксперимента. На рисунке 1 представлена диаграмма прироста растений во время полевого эксперимента по дням с учетом внесенной дозы.

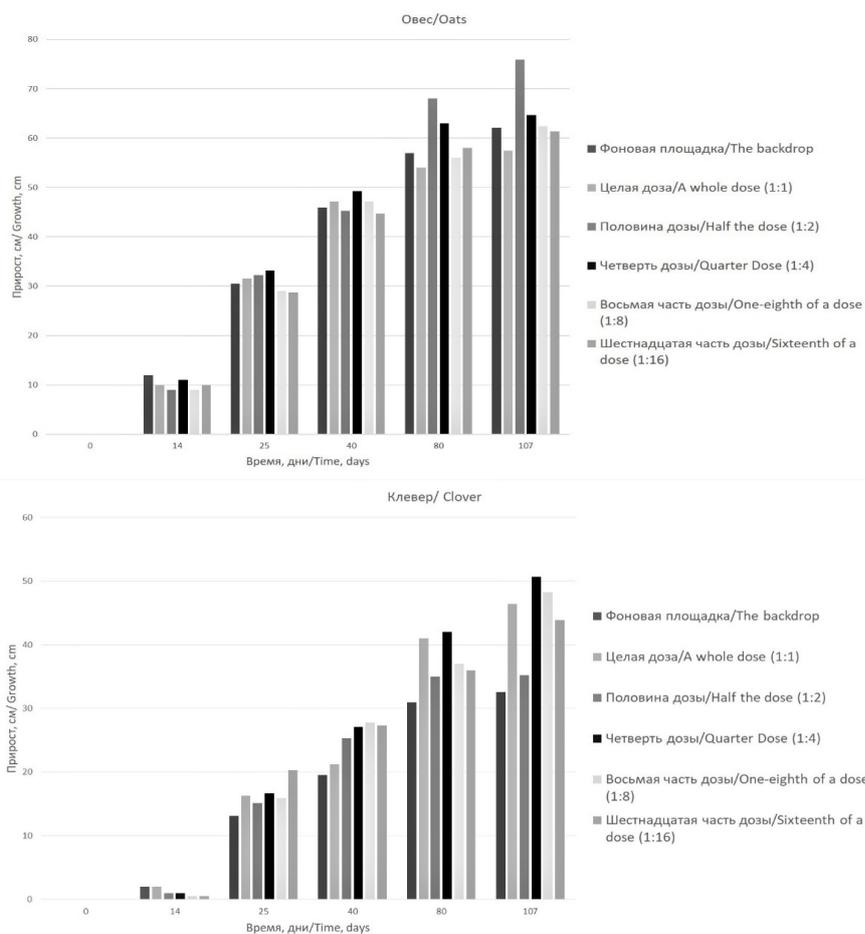


Рис. 1. Результаты измерения прироста. Полевой эксперимент /
Fig. 1. Increment measurement results. Laboratory experiment

Результаты измерения рН почвы, отобранной на экспериментальной площадке в полевых условиях, где произрастали овес и клевер, представлены в таблице 7.

Таблица 7 / Table 7

Результаты измерения рН почвы в полевом эксперименте / Results of soil pH measurements in the field experiment

Растение / Plant	Доза внесения, г / Dose of application, g	рН почвы до эксперимента / Soil pH before the experiment		Оптимальный рН почвы для растения / Optimal soil pH for the plant	рН почвы после эксперимента / Soil pH after the experiment	
		рН _{KCl}	рН _{KCl}		рН _{H₂O}	рН _{KCl}
Овес / Oats	Фон / Background value	6,03	5,31	5,0-7,5	6,22	5,17
	244,14				8,18	7,15
	122,07				8,16	7,04
	61,035				7,76	6,63
	30,52				7,38	6,39
	15,26				7,16	6,20
Клевер / Clover	Фон / Background value	6,03	5,31	6,0-6,5	6,18	5,32
	244,14				7,14	6,46
	122,07				6,80	6,42
	61,035				6,69	6,09
	30,52				6,43	5,96
	15,26				6,29	5,53

Кислотность почв снизилась на всех пробных площадках после внесения известняка. Все значения рН, определенные после эксперимента, вошли в комфортный для овса диапазон значений, что подтверждается близкими друг к другу значениями прироста и всхожести овса. Максимальная всхожесть и прирост на начальном этапе для клевера отмечались на площадках с целой дозой внесенного мелиоранта, половиной и четвертой частью, где рН почвы соответствует предпочитаемому растением диапазону значений 6,0-6,5 ед. рН. К середине вегетационного цикла значения прироста на всех площадках выровнялись. Полевой эксперимент планируется провести в трехкратном повторении.

Выводы

Проведенные анализы и эксперименты позволили сделать следующие выводы:

1. Флюсовый известняковый щебень Сокольско-Ситовского месторождения крупностью 8-25 мм пригоден для использования в качестве мелиоранта и соответствует требуемым параметрам.

2. Результат применения известняка в качестве мелиоранта виден в лабораторном и полевом экспериментах. Для достижения положительного результата необходимо учитывать начальный рН почвы, оптимальный рН почвы для растений и допустимые дозы внесения.

3. В ходе лабораторного эксперимента установлено, что рН почвы на всех площадках, для всех растений увеличился. Овес показывал равномерный прирост на всех площадках, в связи с тем, что значения рН почвы после эксперимента входят

в предпочитаемый растением диапазон значений. Клевер показал наибольший прирост там, где была внесена половина от целой дозы. Измеренные значения соответствуют оптимальному для растения рН. Тимофеевка луговая имеет примерно одинаковые значения прироста. Это обусловлено тем, что значения рН после эксперимента соответствовали предпочитаемому диапазону. У газонной травы прирост активнее отмечен на площадках с половиной и четвертью от целой дозы мелиоранта. Щавель предпочитает кислые почвы, во время эксперимента растение было вялое, плохо развивалось. Измеренные рН на всех площадках превышают оптимальный для растения рН. Горох показал наибольший прирост на площадке с наименьшей дозой внесения; рН на данной площадке соответствует предпочитаемым значениям рН почвы.

4. В ходе полевого эксперимента рН на всех площадках для обоих растений увеличился. Результаты прироста овса не позволяют сделать однозначных выводов, т.к. диапазон комфортных значений рН обширен. Это обуславливает то, что на всех площадках овес чувствовал себя комфортно, а значения прироста и всхожести примерно одинаковы. Для клевера активная всхожесть на начальном этапе была отмечена на площадках с комфортным уровнем рН почвы. Однако, ближе к середине эксперимента показатели всхожести и прироста выровнялись.

5. Рассматриваемый известняк можно рекомендовать в качестве мелиоранта как для проведения почвоулучшающих мероприятий в с/х, так и для внесения мелиоранта в почвогрунт при проведении рекультивационных мероприятий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр FSRRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Литература

1. Белоброва Д.В. Трансформация почв и агрохимических параметров плодородия в условиях интенсивного землепользования (на примере садовых некоммерческих товариществ). // *Агрохимический вестник*. – 2018. – №2. DOI: 1520 10.24411/0235-2516-2018-00031
2. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Блинов С.М., Перевощикова А.А. Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи. // *Записки Горного института*. – 2023. – №260. – С. 266–278. DOI: 10.31897/PMI.2023.31.
3. Пашкевич М.А., Петрова Т.А., Рудзиш Э. Оценка потенциальной возможности использования лигнин-шламов для лесохозяйственной рекультивации нарушенных земель. // *Записки Горного института*. – 2019. – №235. – С. 106. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.106.
4. Пашкевич М.А., Матвеева В.А., Данилов А.С. Исследование миграции загрязняющих веществ с территорий техногенных массивов Кольского полуострова. // *Горный журнал*. – 2019. – №1. – С. 17–21. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.04.
5. Петрова Т.А. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов. // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 251. – С. 767–776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.
6. Ратников А.Н., Попова Г.И., Свириденко Д.Г. Реабилитационные мероприятия на сельскохозяйственных угодьях, подвергшихся радиоактивному загрязнению. // *Известия ТСХА*. – 2019. – №2. DOI 10.34677/0021-342X-2019-2-18-34
7. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы. // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 243. – С. 388–392. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388.
8. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого раз-

вития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010

9. Смирнов Ю.Д., Сучкова М.В. Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве. // Вода и экология: проблемы и решения. – 2019. – №3. – С. 16–25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25

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. Федулова А.Д. Влияние органической, органоминеральной и минеральной систем удобрения на содержание тяжелых металлов в пахотном слое дерново-подзолистой почвы в последствии. // Агрехимический вестник. – 2019. – №4. – С. 1505. DOI 10.24411/0235-2516-2019-10064

12. Bykova E., Dyachkova I. Modeling the size of protection zones of cultural heritage sites based on factors of the historical and cultural assessment of lands. // Land. – 2021. – Vol. 10. DOI: 10.3390/land10111201

13. Holland J.E., Bennett A.E., Newton A.C., White P.J., McKenzie B.M., George T.S., Pake-man R.J., Bailey J.S., Fornara D.A., Hayes R.C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 610. – pp. 316-332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.020.

14. Korelskiy D.S., Strizhenok A.V., Ismailova D.V. Development and justification of the method of biotechnological reclaiming of oil-contaminated land. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – No.3. – pp. 342-353.

15. Litvinovich A., Pavlova O., Lavrishchev A., Bure V., Saljnikov E. Dynamics of Soil pH after Utilization of By-products of Industrial Rock Processing as a Calcareous Material in Acid Soils. // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2021. – Vol. 51. – pp. 1-9. DOI: 10.1080/00103624.2020.1849267

16. Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. Rehabilitation of disturbed lands with industrial wastewater sludge. // Minerals. – 2022. – Vol. 12. No.376. DOI: 10.3390/min12030376.

17. Putra H., Yasuhara H., Sutoyo E., Fauzan M. Review of Enzyme-Induced Calcite Precipitation as a Ground-Improvement Technique. // Infrastructures. – 2020. – Vol. 5. No.66. DOI:10.3390/infrastructures5080066

18. Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S., Goryunova T.V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity. // Eurasian mining. – 2021. – No.2. – pp. 92–96. DOI: 10.17580/em.2021.02.19.

19. Stekolnikov K.E., Gasanova E.S., Stekolnikova N.V. Agrogenic transformation (degradation) of chernozems of the Central Chernozem Region. // BIO Web of Conferences. – 2021. – Vol. 36. Article No.03021. DOI: 10.1051/bioconf/20213603021.

20. Strizhenok A.V., Korelskiy D.S., Choi Y. Assessment of the Efficiency of Using Organic Waste from the Brewing Industry for Bioremediation of Oil-Contaminated Soils. // Journal of Ecological Engineering. – 2021. – No. 22. – pp. 66-77. DOI: 10.12911/22998993/133966.

References

1. Belobrova D.V. Transformation of soils and agrochemical parameters of fertility under conditions of intensive land use (using the example of gardening non-profit partnerships). Agrochemical Bulletin. 2018. No. 2. DOI: 10.24411/0235-2516-2018-00031. (In Russ.)

2. Mitrakova N.V., Khairulina E.A., Blinov S.M., Pervoshchikova A.A. Efficiency of acid sulphate soils reclamation in coal mining areas. Journal of Mining Institute. 2023. No. 260. pp. 266–278. DOI: 10.31897/PMI.2023.31. (In Russ.)

3. Pashkevich M.A., Petrova T.A., Rudzish E. Lignin sludge application for forest land reclamation: feasibility assessment. Journal of Mining Institute. 2019. No. 235. P. 106. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.106. (In Russ.)

4. Pashkevich M.A., Matveeva V.A., Danilov A.S. Migration of pollutants from the mining waste disposal territories on the Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 1. pp. 17–21. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.04. (In Russ.)
5. Petrova T.A. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 767–776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16. (In Russ.)
6. Ratnikov A.N., Popova G.I., S. Viridenko D.G. Rehabilitation measures on agricultural land exposed to radioactive contamination. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2019. No. 2. DOI 10.34677/0021-342X-2019-2-18-34. (In Russ.)
7. Sarapulova G.I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243. pp. 388–392. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388. (In Russ.)
8. 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.)
9. Smirnov Yu.D., Suchkova M.V. Prospects for the beneficial use of ash from sewage sludge incineration in the national economy. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2019. No. 3. pp. 16–25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25. (In Russ.)
10. Stogny V.V., Stogny G.A., Lyubimova T.V. Geoecological risks of the Krasnodar region: the problem of integrated assessment of the geological hazards degree. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 121–133. DOI: 10.46698/VNC. 2021.40.95.010. (In Russ.)
11. Fedulova A.D. Influence of organic, organic-mineral and mineral fertilizer systems on heavy metals content in arable layer of soddy-podzolic soil in aftereffect. *Agrochemical Herald*. 2019. No. 4. P. 1505. DOI 10.24411/0235-2516-2019-10064. (In Russ.)
12. Bykova E., Dyachkova I. Modeling the size of protection zones of cultural heritage sites based on factors of the historical and cultural assessment of lands. *Land*. 2021. Vol. 10. DOI: 10.3390/land10111201.
13. Holland J.E., Bennett A.E., Newton A.C., White P.J., McKenzie B.M., George T.S., Pakeman R.J., Bailey J.S., Fornara D.A., Hayes R.C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. *Sense of the Total Environment*. 2018. Vol. 610. pp. 316–332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.020.
14. Korelskiy DS, Strizhenok AV, Ismailova DV Development and justification of the method of biotechnological reclaiming of oil-contaminated land. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. No.3. pp. 342–353.
15. Litvinovich A., Pavlova O., Lavrishchev A., Bure V., Saljnikov E. Dynamics of Soil pH after Utilization of By-products of Industrial Rock Processing as a Calcareous Material in Acid Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2021. Vol. 51. pp. 1–9. DOI: 10.1080/00103624.2020.1849267.
16. Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. Rehabilitation of disturbed lands with industrial wastewater sludge. *Minerals*. 2022. Vol. 12. No.376. DOI: 10.3390/min12030376.
17. Putra H., Yasuhara H., Sutoyo E., Fauzan M. Review of Enzyme-Induced Calcite Precipitation as a Ground-Improvement Technique. *Infrastructures*. 2020. Vol. 5. No. 66. 10.3390/infrastructures5080066.
18. Smirnov Yu.D. , Suchkov DV, Danilov AS, Goryunova TV Artificial soils for restoration of disturbed land productivity. *Eurasian mining*. 2021. No.2. pp. 92–96. DOI: 10.17580/em.2021.02.19.
19. Stekolnikov KE, Gasanova ES, Stekolnikova NV Agrogenic transformation (degradation) of chernozems of the Central Chernozem Region. *BIO Web of Conferences*. 2021. Vol. 36. Article No. 03021. DOI: 10.1051/ bioconf /20213603021.
20. Strizhenok AV, Korelskiy DS, Choi Y. Assessment of the Efficiency of Using Organic Waste from the Brewing Industry for Bioremediation of Oil-Contaminated Soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. No. 22. pp. 66–77. DOI: 10.12911/22998993/133966.

УДК 552.52: 553:691

DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013

Оригинальная статья

Теплоизоляционный пенобетон безавтоклавного твердения из местного нерудного минерального сырья

Б.Д. Тотурбиев¹, С.А. Мамаев¹, У.Д. Тотурбиева²

¹Институт геологии Дагестанского Федерального исследовательского центра РАН, Россия, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: dangeogis@mail.ru;

²Дагестанский государственный технический университет, Россия, 367030, г. Махачкала, пр-т И. Шамиля, 65, e-mail: totbat@mail.ru

Статья поступила: 01.06.2023, доработана: 12.08.2023, принята в печать: 18.08.2023

Резюме: Актуальность работы. Одним из приоритетных направлений повышения энергоэффективности ограждающих конструкций зданий и сооружений является использование теплоизоляционных изделий из ячеистого бетона. В этой связи пенобетон, получаемый по энергосберегающим технологиям и характеризующийся низкой плотностью, теплопроводностью и высокими эксплуатационными свойствами (прочностью, водостойкостью и т.д.), весьма актуален и перспективен. **Цель работы** обоснование возможности получения теплоизоляционного материала ячеистой структуры – пенобетона безавтоклавного твердения с использованием в качестве основы тонкомолотой бентонитовой глины и связующих веществ: портландцемента, коллоидного нанодисперсного полисиликата натрия с силикатным модулем 6,5 и модификатора «ДС-35» (патент) с применением пены на основе пенообразователя – алкилсульфатов с плотностью 1,0–1,2 г/см³. **Методика исследований.** Для получения достоверных данных при исследовании свойств и технологических параметров компонентов смеси, и на их основе теплоизоляционного материала, были применены современные методы испытаний для определения физико-механических характеристик, регламентируемые соответствующими ГОСТами. Комплексные физико-химические исследования проведены рентгенографическим, дифференциально-термическим и петрографическим анализами нерудного минерального сырья. **Результаты работы.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность получения по энергосберегающей технологии теплоизоляционного пенобетона безавтоклавного твердения, характеризующегося высокими эксплуатационными свойствами, позволяющими повысить энергоэффективность ограждающих конструкций зданий и сооружений. Установлен оптимальный состав для изготовления теплоизоляционного пенобетона, который содержит в мас. %: цемент 24,45–27,85; тонкомолотую бентонитовую глину 24,45–27,85 и с удельной поверхностью 2500–3000 см²/г; коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия 2–4; модификатор «ДС-35» 0,43–0,49; пенообразователь 0,30–0,75; воду 42,97–44,46. Разработан способ изготовления теплоизоляционного пенобетона из вышеуказанного состава.

Ключевые слова: нерудное минеральное сырье, бентонитовые глины, теплоизоляционные материалы, пенобетон, нанодисперсные полисиликаты натрия, добавки, безавтоклавное твердение.

Для цитирования: Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Тотурбиева У.Д. Теплоизоляционный пенобетон безавтоклавного твердения из местного нерудного минерального сырья. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013.

DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013

Original paper

Heat-Insulating foam concrete without autoclave hardening from local non-metal mineral raw

B.D. Toturbiev¹, S.A. Mamaev¹, U.D. Toturbiev²

¹Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
75 Yaragskiy Str., Makhachkala 367010, Russian Federation,
e-mail: dangeogis@mail.ru;

²Dagestan State Technical University,
65 I. Shamil Avenue, Makhachkala 367030, Russian Federation,
e-mail: totbat@mail.ru

Received: 01.06.2023, revised: 12.08.2023, accepted: 18.08.2023

Abstract: Relevance: One of the priority areas for improving the energy efficiency of the enclosing structures of buildings and structures is the use of heat-insulating products made of cellular concrete. In this regard, foam concrete produced by energy-saving technologies and characterized by low density, thermal conductivity and high performance properties (strength, water resistance, etc.) is very relevant and promising. **The aim** of the work is to substantiate the possibility of obtaining a heat-insulating material of a cellular structure – foam concrete without autoclave hardening using finely ground bentonite clay and binders as a base: Portland cement, colloidal nanodispersed sodium polysilicate with a silicate module of 6.5 and modifier “DS-35” (patent) using foam based on a foaming agent – alkyl sulfates with a density of 1.0-1.2 g/cm³. **Methods.** To obtain reliable data in the study of the properties and technological parameters of the components of the mixture, and on their basis of the heat-insulating material, modern methods of testing the physical and mechanical characteristics, regulated by the relevant GOSTs, were applied. Comprehensive physical and chemical studies were carried out by X-ray, differential thermal and petrographic analyzes of non-metallic mineral raw materials. To perform complex physical and chemical studies, X-ray, differential thermal and petrographic analyzes of non-metallic mineral raw materials were carried out. **Results.** Conducted theoretical and experimental studies have shown the possibility of obtaining heat-insulating foam concrete without autoclave hardening using energy-saving technology, which is characterized by high performance properties, which make it possible to increase the energy efficiency of building envelopes and structures. The optimal compositions for the manufacture of heat-insulating foam concrete, which contain wt. %: cement 24.45-27.85; finely ground bentonite clay 24.45-27.85 and with a specific surface area of 2500-3000 cm²/g; colloidal nanodispersed sodium polysilicates 2-4; modifier “DS-35” 0.43-0.49; foaming agent 0.30-0.75; water 42.97-44.46. A method for manufacturing heat-insulating foam concrete from the above composition has been developed.

Key words: non-metallic mineral raw materials, bentonite clays, heat-insulating materials, foam concrete, nanodispersed sodium polysilicates, additives, autoclave-free hardening.

For citation: Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbieva U.D. Heat-insulating foam concrete of non-autoclave hardening from local non-metallic mineral raw materials. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(3): 169-179. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013.

Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений повышения энергоэффективности ограждающих конструкций зданий и сооружений является использование теплоизоляционных изделий из ячеистого бетона [Зарубина, 2012; Камзолов и др., 2010; Вишневецкий и др., 2013, 2015; Кузнецова и др., 2016; Valor, 1954].

Исследования показали, что среди многообразия теплоизоляционных материалов весьма перспективными и актуальными являются ячеистые бетоны безавтоклавного твердения, а именно пенобетон, получаемый по энергосберегающим технологиям и характеризующийся низкой плотностью и теплопроводностью при этом высокими эксплуатационными свойствами (прочностью, водостойкостью и т.д.) [Сулейманова, 2010; Чистов, Краснов, 2010; Михеенков, 2008; Коломацкий, 2002; Ахундов, Удачкин, 2002; Amran et al., 2015; Huang, 2013; Liu et al., 2013; Mydin et al., 2010; Ramamoorthy et al., 2009].

В этой связи в Институте геологии ДФИЦ РАН теоретически и экспериментально обоснована возможность получения на основе нерудного и техногенного сырья, и нанодисперсных полисиликатов натрия строительных материалов нового поколения различного функционального назначения по инновационной, наукоемкой, энерго-ресурсосберегающей, экологически чистой технологии [Тотурбиев и др., 2020, 2022] и получен патент РФ (Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Юсупов А.Р. Состав и способ изготовления теплоизоляционного бетона. Патент на изобретение 2759255 С2, 11.11.2021. Заявка № 2018120061 от 30.05.2018).

С целью комплексного использования ресурсов нерудного сырья созданы научные основы получения коллоидного нанодисперсного полисиликата натрия и на его основе композиционные вяжущие вещества различного функционального назначения.

Определилось новое научное направление по получению нанодисперсных полисиликатных систем, обладающих уникальными связующими свойствами, обеспечивающие комплексное применение нерудного сырья и отходов производства в композициях с различным целевым назначением.

Таким образом, опираясь на ранее полученные результаты предыдущих исследований, намечается перспективность и актуальность проведения дальнейших научных исследований в этом направлении.

Для достижения поставленной цели исследований были решены следующие задачи:

- изучен и обоснован выбор местного нерудного сырья, связующих веществ, добавки пенообразователя для их совместного физико-химического соединения, а также поризации при получении пенобетонной теплоизоляционной композиции;
- научное обоснование возможных физико-химических процессов, происходящих при твердении пенобетонной теплоизоляционной композиции;
- оптимизация составов и разработка способа получения пенобетонной теплоизоляционной композиции;
- исследование физико-технических свойств разработанного теплоизоляционного пенобетона и проведение опытно-промышленного испытания.

Методика исследований

В работе для получения достоверных данных при исследовании свойств и технологических параметров компонентов смеси, и на их основе теплоизоляционного материала, были применены современные методы испытаний для определения физико-механических характеристик, регламентируемые соответствующими ГОСТами. Комплексные физико-химические исследования проведены рентгенографическим, дифференциально-термическим и петрографическим анализами нерудного минерального сырья. Одним из объектов исследований, разрабатываемого состава те-

плоизоляционного пенобетона ячеистой структуры, является местное нерудное минеральное сырье – бентонитовая глина, результаты определения химического и минералогического составов которой приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав исследуемой бентонитовой глины /
The chemical composition of the studied bentoth clay**

Химический состав, массовая доля % / Chemical composition, mass fraction %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	п.п.п
51,0	23,25	7,2	0,99	3,31	2,75	4,06	10

Таблица 2 / Table 2

**Минералогический состав исследуемой бентонитовой глины /
Mineralogical composition of the studied bentonite clay**

Содержания минералов, % / Mineral content, %			
Кварц / Quartz	Монтмориллонит / Montmorillonite	Гидрослюда / Hydromica	Каолинит / Kaolinite
3±1	82±7	6±2	7±2

Как видно из таблицы, в изучаемой нами бентонитовой глине главным слагающим минералом является монтмориллонит. Монтмориллонит – широко распространённый глинистый минерал из группы смектитов подкласса слоистых силикатов. Каолинит, гидрослюда и кварц в исследуемом образце находятся в подчиненном состоянии.

Эти глины широко применяются в сферах строительной индустрии, так как они не токсичны, обладают гидрофильностью и достаточной химической стойкостью.

Применяемые в качестве связующего и добавки коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия классифицируются как наноматериалы и представляют переходную область составов от жидких стекол к кремнезолям.

Основной полимерной составляющей полисиликатов является его структурный элемент-кремнекислородный тетраэдр.

Главным отличием полисиликатов от водных растворов силикатов является их полимерная форма, размеры кремнеземистых частиц от 4 до 5 нм, которые составляют 60% и более от общего содержания кремнезема. Это в свою очередь обеспечивает высокие прочностные свойства образующихся гелевых структур. По сравнению с водными растворами силикатов натрия эффективность полисиликатов натрия в 4 раза выше, что позволяет использовать технологические растворы с более низкой концентрацией.

Для получения пенобетона ячеистой структуры высокой прочности и очень низкой водопоглощающей способности, в состав разрабатываемого теплоизоляционного пенобетона вводится модификатор «ДС-35», который представляет водную дисперсию винилацетат акрилового сополимера с низковязкой средой без содержания растворителей и пластификаторов, полученный путем полимеризации мономер-

ров в жидкой фазе с определенной рецептурой. Физико-химические характеристики данного модификатора приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

**Физические и химические характеристики модификатора «ДС-35» /
Physical and chemical characteristics of the modifier “DS-35”**

Внешний вид / Appearance	Молочно-белая жидкость / milky white liquid
Массовая доля сухого вещества, % / Mass fraction of dry matter, %	47
pH	10,7
Цвет / Color	Белый/кремовый цвет / White/cream color
Размер частиц, мкм / Particle size, μm	0,04-0,1
Плотность, г/см ³ / Density, g/cm ³	1,04
Молекулярный вес / Molecular weight	Смесь – ? / mixture
Точка кипения / Boiling point	100°C
Точка плавления/область / Melting point/area	Приблизительно 0°C / Approximately 0°C
Растворимость в воде / Solubility in water	Смешивается / mixed up
Вязкость при 25°C, мПа·с / Viscosity at 25°C, mPa/s	1,200–2,000 мПа·с / 1,200-2,000 mPa/s
Минимальная температура пленкообразования, °C / Minimum film formation temperature, °C	-5°C
Химическая стабильность / Chemical stability	Продукт химически стабилен / The product is chemically stable

Результаты работы и их обсуждение

В процессе теоретических и экспериментальных исследований с использованием математического планирования эксперимента был оптимизирован состав теплоизоляционного пенобетона, который содержит в мас. %: цемент 24,45–27,85; тонкомолотую бентонитовую глину 24,45–27,85; коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия 2–4; модификатор «ДС-35» 0,43–0,49; пенообразователь 0,30–0,75; воду 42,97–44,46.

В нашем исследовании возможность такого сочетания вышеуказанных составляющих при получении теплоизоляционной композиции объясняется следующими научными предпосылками:

- применяемые в наших исследованиях бентонитовые глины обладают практически всеми свойствами природных наноразмерных частиц, так как они относятся к монтмориллонитовой группе (сметиты), следовательно, активно взаимодействуют с другими компонентами смеси, тем самым способствуют получению теплоизоляционного пенобетона с высокими показателями свойств.

- нанодисперсные частицы коллоидного полисиликата натрия активно вступающая в реакцию со свободной известью, имеющейся в портландцементе, образуют водонерастворимые силикаты кальция, что повышает прочность цементного камня. Возможно также образование подобных соединений, со свободными оксидами, имеющимися в бентонитовой глине. Кроме того, образующиеся гелевые структуры полисиликатов натрия, имеют высокие прочностные свойства за счет их полимерной формы, которая составляет более 60 % от общего содержания кремнезема.

- с введением в композицию теплоизоляционного пенобетона добавки-модификатора «ДС-35», акриловый сополимер, имеющийся в нем, вступает в реакцию с химически связанной водой, содержащейся в минералах бентонитовой глины, и образует химически стойкие и прочные соединения, придающие глине более высокую плотность, с образованием первично структурного каркаса из двойных солей и гидратов и гидроксо солей. При этом способствует возрастанию кристаллов гидросиликатов кальция, тем самым созданию камнеподобного материала очень высокой прочности, и низкой водопоглощающей способности.

Исходя из такого сочетания вышеуказанных составляющих для получения теплоизоляционной композиции, была изготовлена серия образцов размерами 10x10x10 см из предлагаемых оптимальных составов.

Для этого в первую очередь согласно пат. РФ 2124475 (пример 1), в лабораторных условиях были изготовлены образцы из полисиликатов натрия с силикатным модулем 6,5, полученных путем введения в 20%-ный водный раствор силиката натрия 16%-го гидрозоль диоксида кремния при их соотношении 1:1,5, с последовательным перемешиванием при 95°C, в течение 1,5 ч и с последующей выдержкой 0,5 ч, до образования коллоидного нанодисперсного полисиликата натрия.

В смеситель принудительного перемешивания засыпали отдозированные сухие тонкомолотые компоненты соответствующего состава (табл. 4), состоящие из портландцемента М 400 и тонкомолотой бентонитовой глины удельной поверхностью 2500–3000 см²/г и производили совместное сухое смешивание в течение 3–4 минут. Затем, в полученную таким образом сухую смесь, последовательно заливали коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия и водный раствор модификатора «ДС-35», перемешивали в течение 2–3 минут до образования сметанообразной массы. После чего в процессе перемешивания, в изготовленную массу вводили пену, полученную из пенообразователя на основе алкилсульфатов с плотностью 1,0–1,2 г/см³, для окончательного изготовления пеномассы. Завершающим этапом технологического процесса изготовления образцов пенобетона являлся розлив пеномассы в формы, выдержка в течение 3 суток и расформовка образцов.

Таким способом изготовленные образцы после твердения были испытаны на прочность при сжатии и определены их теплофизические свойства согласно соответствующим ГОСТам. Полученные данные приведены в таблице 4 в сравнении с аналогичными характеристиками теплоизоляционного бетона-прототипа.

Таблица 4 / Table 4

**Характеристика свойств теплоизоляционного пенобетона безавтоклавного
твердения из местного нерудного минерального сырья /
Characteristics of properties heat-insulating non-autoclaved foam concrete
from local non-metallic mineral cheese**

№ п/п. / No. p/p	Состав теплоизоляционного бетона, мас. %: / The composition of heat-insulating concrete, wt. %:						Средняя плотность сухого образца, кг/м ³ / Average dry sample density, kg/m ³	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/м·°C / Thermal conductivity coefficient, λ, W/m·°C	Прочность на сжатие после 28 суток нормального твердения МПа / Compressive strength after 28 days of normal hardening MPa
	Цемент / cement	Монтмориллонитовая глина с содержанием минерала монтмориллонита более 60% / montmorillonite clay with more than 60% montmorillonite minera lcontent	Глино порошок с содержанием глинистых частиц не более 50% / Clay powder with a content of clay particles not more than 50%	Пенообразующая добавка «Ника» / Foaming additive «Nika»	Пенообразователь на основе алкилсульфатов / Foaming agent based on alkylsulfates	Вода / Water			
1. прототип / 1. prototype	47,0	11,0	-	0,5	-	40,00	200	0,050	0,90
2. прототип / 2. prototype	44,0	13,8	-	0,7	-	42,80	200	0,050	1,00
3.	33,0	-	16,5	-	0,70	49,80	200	0,050	0,50
4.	34,7	-	14,2	-	0,75	50,35	200	0,051	0,52
5.	37,0	-	15,0	-	0,50	47,50	300	0,080	0,80
6.	39,7	-	16,0	-	0,30	44,00	500	0,100	1,10
7.	38,0	-	19,2	-	0,30	42,50	500	0,098	1,04

Полученные данные подтверждают, что прочность образцов из предлагаемого теплоизоляционного бетона, при почти равной их средней плотности (с плотностью образцов из бетона-прототипа), на 60% выше прочности образцов аналогичного теплоизоляционного бетона-прототипа, изготовленного из природного молотого глинопорошка. При этом коэффициент теплопроводности исследуемого теплоизоляционного пенобетона на 14% ниже, чем аналогичный показатель прототипа.

Все это доказывает активное совместное взаимодействие мелкодисперсных частиц тонкомолотой бентонитовой глины с нанодисперсными полиморфными частицами коллоидного полисиликата натрия, портландцемента, а также с добавкой-модификатором «ДС-35» и пеной из пенообразователя на основе алкилсульфатов с плотностью 1,0–1,2 г/см³.

Наряду с улучшением свойств исследуемого теплоизоляционного бетона введение в состав, взамен молотого глинопорошка, тонкомолотой бентонитовой глины и дополнительно связующего вещества (коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия и добавки модификатора «ДС-35»), способствует снижению расхода портландцемента. А это в целом приводит к снижению стоимости теплоизоляционного материала.

Учитывая высокие показатели свойств разработанного состава и способа изготовления теплоизоляционного бетона, была подана заявка на изобретение и в результате рассмотрения заявки получен патент [Yang et al., 2021]. Сравнительные характеристики разработанного теплоизоляционного бетона и прототипа (Патент РФ №2234484, С04 38/10, опубликован 20.08.2004 г.) приведены в таблице 4.

Проведена опытно-промышленная апробация разработанного теплоизоляционного материала. Подтверждением этого является то, что в цеху по изготовлению пенобетонных изделий ООО НПО «Шамхальский завод железобетонных изделий» изготавливались стеновые и перегородочные блоки для индивидуального строительства.

Выводы

Посредством теоретических и экспериментальных исследований разработан теплоизоляционный пенобетон безавтоклавного твердения по энергосберегающей технологии, характеризующийся высокими эксплуатационными свойствами, позволяющий повысить энергоэффективность ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Охарактеризован и изучен химический и минералогический состав сырьевых составляющих разрабатываемой композиции теплоизоляционного пенобетона.

Обоснован выбор: местного нерудного сырья, связующих веществ, добавки и пенообразователя для получения пористой структуры, и их физико-химического сочетания при получении пенобетонной теплоизоляционной композиции.

Установлен оптимальный состав для изготовления теплоизоляционного пенобетона при следующем соотношении компонентов в мас. %: цемент 24,45–27,85; тонкомолотая бентонитовая глина 24,45–27,85; коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия 2–4; модификатор «ДС-35» 0,43–0,49; пенообразователь 0,30–0,75; вода 42,97–44,46.

Разработан способ изготовления теплоизоляционного пенобетона, заключающийся в том, что компоненты (портландцемент и тонкомолотая бентонитовая глина) засыпают в смеситель и производят смешивание в течение 3–4 минут до получения однородной сухой смеси. В полученную, таким образом, сухую смесь, в первую очередь заливают коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия, изначально изготовленные из 20%-ного водного раствора силиката натрия и 16%-ного гидрозоля диоксида кремния, при их соотношении соответственно 1:1,5 и совместном перемешивании при 95°C в течение 1,5 ч с последующей выдержкой 0,5 ч. Затем вливают раствор модификатора «ДС-35» и перемешивают в течении 2–3 минут до образования сметанообразной массы. Далее в процессе перемешивания, в изготовленную массу вводится пена, полученная из пенообразователя на основе алкилсульфатов с плотностью 1,0–1,2 г/см³ для окончательного изготовления пеномассы. Завершающим этапом технологического процесса изготовления образцов пенобетона является розлив пеномассы в формы, выдержка в течение 3 суток и расформовка образцов.

Опытно-промышленные испытания и соответствующая корректировка технологии получения изделий из разработанного теплоизоляционного пенобетона осуществлялись в ООО НПО «Шамхальский завод железобетонных изделий».

Литература

1. Ахундов А.А., Удачкин В.И. Перспективы совершенствования технологии пенобетона. // Строительные Материалы. – 2002. – №3. – С. 10-11.
2. Вишневский А.А., Гринфельд Г.И., Куликова Н.О. Анализ рынка автоклавного газобетона России. // Строительные материалы. – 2013. – № 7. – С. 40–44.
3. Вишневский А.А., Гринфельд Г.И., Смирнова А.С. Производство автоклавного газобетона в России. // Строительные материалы. – 2015. – №6. – С. 52–55.
4. Зарубина Л.П. Теплоизоляция зданий и сооружений. Материалы и технологии. 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – С. 416.
5. Камзолов С.М., Корниенко В.Н., Руденко Г.С. Тепловая изоляция. Учебное пособие. – М.: МГУПБ, 2010. – С. 120.
6. Коломацкий А.С. Теплоизоляционный пенобетон. // Строительные Материалы. – 2002. – №3. – С. 18-19.
7. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Технология силикатных стеновых ячеистых материалов автоклавного твердения: учебное пособие. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2016. – 120 с.
8. Михеенков М.А. Активация – путь улучшения свойств неавтоклавного пенобетона. // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 280–282.
9. Сулейманова Л.А. Неавтоклавные газобетоны на композиционных вяжущих для энергоэффективного строительства. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – №4. – С. 47–52.
10. Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Тотурбиев А.Б. Композиционные строительные материалы из нерудного сырья мезозойско-кайнозойских осадочных толщ. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020. – №6(49). – С. 37–43.
11. Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Тотурбиев А.Б. Низкообжиговая, энергосберегающая, экологически безопасная технология производства керамических материалов на основе глинистых сланцев. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 148–161. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.82.011
12. Чистов Ю.Д., Краснов М.В. Наномодификаторы в неавтоклавном ячеистом бетоне. // Технологии бетонов. – 2010. – №7-8. – С. 68–70.
13. Amran Y.H.M., Farzadnia N., AbangAli A.A. Properties and applications of foam concrete; Overview. // Building construction material. 2015. – Vol. 101(P1). – pp. 990-1005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112
14. Huang Yu. Development of foreign energy-saving construction technologies. // Adv. Mater. Res. – 2013. Vol. 671-674(2). – pp. 2126-2128. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.671-674.2126
15. Liu Y., Yan H. and Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and the consequences of building energy consumption – Overview. Application. Energ. 115 (4), 164-173. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.062
16. Mydin M. A.O., Wang Y.C. Structural characteristics of a light system of enclosing structures made of foam concrete and steel during compression. // Thin-walled structures. – 2010. – Vol. 49(1). – pp. 66-76. DOI: 10.1016/j.tws.2010.08.007
17. Ramamoorthy K., Kunhanandan Nambiar E.K., Indu Siva Ranjani G. Classification of studies of the properties of foam concrete. // Cement-concrete composites. – 2009. – Vol. 31(6). P. 388396. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006
18. Valor R.S. Cellular concretes Part 1 Composition and methods of preparation. // ACI J. Proc. – 1954. – Vol. 50(5). – pp. 773-796. DOI: 10.14359/11794

19. Yang S., Yao H., Li J., Wang H., Zhang K., Wu S. et al. Preparation and properties of ready-to-use low-density foam concrete obtained from solid industrial waste. // *Building construction material*. – 2021. – Vol. 287(1). – p. 122946. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122946

References

1. Akhundov A. A. Prospects for improving foam concrete technology / A. A. Akhundov, V. I. Udachkin. *Building Materials*. 2002. No. 3. pp. 10-11. 3. Akhundov, A. A. Foam concrete – effective wall and heat-insulating.
2. Vishnevsky A.A., Grinfeld G.I., Kulikova N.O. Market Analysis of Autoclaved Aerated Concrete in Russia. *Construction Materials*. 2013. No. 7. pp. 40–44.
3. Vishnevsky A.A., Grinfeld G.I., Smirnova A.S. Production of autoclaved aerated concrete in Russia. *Building materials*. 2015. No. 6. pp. 52–55.
4. Zarubina L.P. Thermal insulation of buildings and structures. *Materials and technologies*. 2nd ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg. 2012. p. 416.
5. Kamzolov S. M., Kornienko V. N., Rudenko G. S. Thermal insulation. Tutorial. – M.: MGUPB. 2010. p. 120.
6. Kolomatsky A. S. Heat-insulating foam concrete. *Construction Materials*. 2002. No. 3. S. 18-19.
7. Kuznetsova G.V., Morozova N.N. Technology of silicate wall cellular materials of autoclave hardening: study guide. G.V. Kuznetsova, N.N. Morozov. Kazan: Publishing house Kazansk. state architect.-builds. un-t, 2016. 120 p.
8. Mikheenkov M. A. Activation – a way to improve the properties of non-autoclaved foam concrete. M. A. Mikheenkov. *Popular concrete science. Cellular concrete in construction*. 2008. pp. 280-282.
9. Suleymanova L.A. Non-autoclaved aerated concrete on composite binders for energy efficient construction [Text]. L.A. Suleimanova [et al.]. *Bulletin of BSTU im. V.G. Shukhov*. 2010. No. 4. pp. 47-52.
10. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbiev A.B. Low-burning, energy-saving, environmentally friendly technology for the production of ceramic materials based on shale. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. V. 12. No. 1. pp. 148-161.
11. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbiev A.B. Composite building materials from non-metallic raw materials of the Mesozoic-Cenozoic sedimentary strata. *Natural and technogenic risks. Building safety*. 2020. No. 6 (49). pp. 37-43.
12. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Yusupov A.R. Composition and method of manufacturing heat-insulating concrete. Patent for invention 2759255 C2, 11/11/2021. Application No. 2018120061 dated 05/30/2018.
13. Toturbiev B.D., Toturbiev A.B., Abdulaev M.Sh., Abdulganieva T.I. The use of argillite clays for the production of expanded clay. *Mining Journal: Moscow*: 2018, No. 3. pp. 58-62.
14. Toturbiev B.D., Toturbiev A.B. Alkali metal polysilicates are unique binders for obtaining nanodispersed sodium polysilicate compositions. *Industrial and civil construction*, 2017. No. 4. pp. 72-76.
15. Chistov, Yu. D. Nanomodifiers in non-autoclaved cellular concrete. Yu. D. Chistov, M. V. Krasnov. *Tekhnologii betonov*. 2010. No. 7-8. pp. 68-70.
16. Amran Y. H. M., Farzadnia N. and Abang Ali, A. A. (2015). properties and applications of foam concrete; Overview. *building construction material*. 101(P1), 990-1005. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.
17. Huang Yu (2013). Development of foreign energy-saving construction technologies. *Adv. mater. Res.* 671-674(2), pp. 2126-2128. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.671-674.2126.
18. Liu Y., Yan H. and Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and the consequences of building energy consumption – Overview. application. *Energ.* Vol. 115(4). Pp. 164-173. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.062.

19. Mydin M. A. O. and Wang Y. C. (2011). Structural characteristics of a light system of enclosing structures made of foam concrete and steel during compression. *Thin-walled structures*. Vol. 49(1). pp. 66-76. DOI: 10.1016/j.tws.2010.08.007.

20. Ramamoorthy K., Kunhanandan Nambiar E. K. and Indu Siva Ranjani G. (2009). Classification of studies of the properties of foam concrete. *Cement-concrete composites* 31 (6), -388396. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006.

21. Valor R. S. (1954). Cellular concrete Part 1 Composition and methods of preparation. *A.C.I. J. Proc.* Vol. 50(5). pp. 773-796. Doi: 10.14359/11794.

22. Yang S., Yao H., Li J., Wang H., Zhang K., Wu S. et al. (2021). Preparation and properties of ready-to-use low-density foam concrete obtained from solid industrial waste. *Buildingconstructionmaterial*. Vol. 287(1). p. 122946. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122946.

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014

Оригинальная статья

Геофизический мониторинг технологии разработки месторождений Садона

В.И. Голик^{1,2}, **О.Г. Бурдзиева**¹

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

²Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва, Б. Семеновская, 38

Статья поступила: 11.07.2023, доработана: 17.09.2023, принята в печать: 20.09.2023

Резюме: Актуальность статьи объясняется необходимостью поиска еще мало используемых резервов повышения эффективности горного производства в сложных условиях эксплуатации рудных месторождений Садонского рудного узла. **Целью статьи** является детализация зависимости состояния массива от техногенных напряжений при разработке рудных месторождений подземным способом. **Методы работы.** Соответствие технологий разработки месторождений полезных ископаемых принципам природопользования обеспечивается путем исследования динамики изменения параметров рудовмещающих массивов. Защите от наведенных сейсмических колебаний подлежат объекты инфраструктуры горных предприятий и земная поверхность, особенно при производстве добычных работ в уникальных условиях охраняемых территорий. В сфере добычи природных ресурсов Республики Северная Осетия–Алания с такими условиями применен и интерпретирован ряд геофизических исследований. **Результаты работы.** С использованием возможностей математического моделирования методом конечных элементов определен механизм работы сжимающих напряжений в зоне их сопряжения рудного целика с вмещающим массивом. Получены количественные критерии оценки состояния выработанного пространства в зависимости от его заполнения или изоляции. Предложено оценивать опасность разрушения земной поверхности по соотношению максимальных напряжений в модели к пределу прочности материала при растяжении. Приведены результаты моделирования техногенных напряжений на низкомолекулярных материалах. Установлено, что максимальные напряжения в элементах очистной камеры развиваются при максимальном значении коэффициента бокового распора. Показано, что заполнение выработанного пространства камер снижает уровень напряжений в зависимости от прочности заполнителя. Определено, что при варианте с изоляцией выработанного пространства без заполнения концентрация напряжений для данных условий максимальна. Полученные сведения о поведении рудовмещающего массива актуальны для проектирования горных работ при возобновлении горных работ Садонских рудников, а также для месторождений с аналогичными условиями локализации оруденения, как при использовании традиционных технологий, так и при извлечении металлов новыми перспективными технологиями с выщелачиванием на месте локализации оруденения.

Ключевые слова: рудовмещающий массив, динамика, сейсмичность, земная поверхность, месторождение, массив, напряжение.

Для цитирования: Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014

Original paper

Geophysical monitoring of Sadon field development technology

V.I. Golik^{1,2}, O.G. Burdzieva¹

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

²Moscow Polytechnic University,
38 B. Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

Received: 11.07.2023, revised: 17.09.2023, accepted: 20.09.2023

Abstract: Relevance of the paper is explained by the need to search for still little-used reserves to increase the efficiency of mining production in complicated operating conditions of the ore sites of the Sadon ore node. **Aim** of the article is to detail the dependence of the massif state on anthropogenic stresses during the development of ore deposits by underground method. **Methods.** Compliance of technologies for the development of mineral deposits with the principles of nature management is ensured by studying the dynamics of changes in the parameters of ore-containing massifs. Infrastructure facilities of mining enterprises and the Earth's surface are subject to protection from induced seismic vibrations, especially during mining operations in the unique conditions of protected areas. In the field of extraction of natural resources of the Republic of North Ossetia-Alania with such conditions, a number of geophysical studies have been applied and interpreted. **Results.** Using the possibilities of mathematical modeling by the finite element method, the operation mechanism of compressive stresses in the zone of their interface of the ore whole with the host array is determined. Quantitative criteria for assessing the state of the developed space, depending on its filling or isolation, are obtained. It is proposed to assess the hazard of destruction of the Earth's surface in relation to the maximum stresses in the model to the tensile strength of the material. The results of modeling anthropogenic stresses on low-molecular materials are presented. It is established that the maximum stresses in the elements of the cleaning chamber develop at the maximum value of the lateral expansion coefficient. It is shown that the filling of the developed chamber space reduces the stress level depending on the strength of the filler. It is determined that in the case of the option with isolation of the developed space without filling, the stress concentration for these conditions is maximum. The information obtained on the behavior of the ore-containing massif is relevant for the design of mining operations during the resumption of mining operations of the Sadon mines, as well as for deposits with similar conditions of localization of mineralization, both when using traditional technologies and when extracting metals with new promising technologies with drilling at the site of localization of mineralization.

Keywords: ore-containing array, dynamics, seismicity, Earth's surface, deposit, array, stress.

For citation: Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of RussianSouth*. (in Russ.). 2023.13(3): 180-192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

Введение

В соответствии с принципами природопользования разработка месторождений полезных ископаемых должна обеспечивать сохранность прилегающей зоны окружающей среды.

Геодинамическая устойчивость геологической среды определяется ее геолого-геофизическими свойствами и уровнем напряжений в среде.

Геодинамическая устойчивость геологической среды оценивается путем определения геолого-геофизических свойств и изучения динамики их изменения в ходе сейсмокомониторинга. Физико-геологической основой процесса является высокая чувствительность литосферы к эндогенным и экзогенным воздействиям. Для установления зависимостей оценивают взаимозависимости параметры рудовмещающих массивов используют методы преломленных и отраженных волн.

Определив геолого-тектонические особенности месторождения, ранжируют его на участки по критерию сейсмичности.

Наведенная или техногенная сейсмичность возникает в процессе перераспределения напряжений в геологической среде под действием горного производства. Она служит детонатором для стихийных катастроф, например, сход ледника Колка, возможно, под влиянием крупномасштабного горного удара в недрах Садонских месторождений Северной Осетии – Алании.

В ходе анализа полученных данных устанавливают базовую сейсмичность участка. Ожидаемое сейсмическое воздействие гипотетических землетрясений и их магнитуда оцениваются по данным трех-компонентной акселерограммы.

Параметры воздействия наведенных колебаний на массив и поверхностные объекты зависят от физико-механических и структурных особенностей массива.

Садонское месторождение свинца, цинка, меди и железа локализовано на глубине до 250 м с простиранием 5 км и падением 1,5 км. Протяженность рудных тел до 50 м, амощность изменяется от первых сантиметров до 0,25 м. Геологические блоки протяженностью 80...160 м разобщены безрудными интервалами длиной 200...400 м.

В период разработки месторождения руду добывали системами с естественным управлением массивами. При технологии с открытым выработанным пространством разубоживание руд составляло 15 ... 40 %, а потери достигали 20 %. Потери запасов руд в недрах оцениваются в 2 млн. тонн с содержанием свинца около 2,6 % и цинка более 3%.

К настоящему времени сформулированы геомеханические аспекты технологий разработки месторождений физическими и физико-химическими технологиями [1-3]. Обобщены основные принципы получения и использования информации о параметрах напряженности участков земной коры, вмещающих месторождения [4-6]; согласовано понятие о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород и методах его оценки в ходе геофизического мониторинга [7-10]; разработаны методы геофизического контроля и освоены технические средства реализации их при подземной разработке рудных месторождений [11-13]; сформулированы принципы минимизации последствий техногенного вмешательства в недра горными работами для экосистем окружающей среды [14-16]; созданы методики и программное обеспечение их реализации при отработке месторождений [17-18]. Схожие вопросы горного производства стали целью исследований зарубежных специалистов данного направления горной науки [19-20].

Целью статьи является детализация зависимости состояния массива от техногенных напряжений при разработке рудных месторождений подземным способом в условиях сложноструктурных месторождений Садонского рудного узла в рамках системного геофизического мониторинга технологии разработки.

Цель достигается дифференцированной оценкой результатов геофизического мониторинга технологии разработки на этапах разработки месторождений в конкретных условиях локализации руд.

Материалы и методы исследования

Комплексный подход исследования включает в себя критический анализ результатов осуществленных в аналогичных условиях экспериментов, геолого – маркшейдерских документов и литературных источников.

Сейсмичность пород определяют путём измерений скоростей распространения волн напряжений и регистрации сейсмических явлений. Колебания возбуждают взрыванием зарядов взрывчатого вещества в скважинах, а также вибрационным или ударным импульсом. Сигналы от приемников усиливаются, фильтруются и преобразуются в цифровую форму.

Состояние массива пород оценивается на основе измерения напряжений методами электрометрического, гамма-гамма и акустического каротажа. Смещения и характер разрушения пород оцениваются геофизическими методами, в том числе с использованием датчиков давления.

Результаты работы и их обсуждение

Защищаемыми от наведенных сейсмических колебаний объектами являются: земная поверхность, шахтные выработки, линии электропередач, закладочные комплексы, шурфы, копры и здания инфраструктуры горных предприятий.

Система Глобального Позиционирования (GPS) нашла применение в сфере добычи природных ресурсов. Так, в 2007 г. в районе с. Мацута (РСО-Алания) была использована базовая станция. На участке протяженностью 15 км в направлении с. Галиат были отсняты 42 реперные точки. С целью повышения устойчивости принимаемого сигнала, как на ровере, так и на базовой станции использованы внешние антенны GPS. В условиях высокогорья важным фактором, влияющим на точность, является отражение навигационного сигнала от горных склонов. Точность определения плановых координат при использовании GPS в 2-4 раза выше, чем высоты. При определении координат точки в 3D пространстве основную роль в итоговой ошибке играет вертикальная составляющая.

Метод конечных элементов использовался при определении количественного значения сжимающих напряжений в элементах очистных выработок Садонских рудников. Метод рассматривает континуум данных, как совокупность дискретных элементов, границы которых определяются узловыми точками, а реакция континуума на внешнее воздействие описывается реакцией узловых точек.

Исследованиями установлено, что сжимающие напряжения имеют наибольшую величину в углах камер на контактах рудного целика с породами (рис. 1).

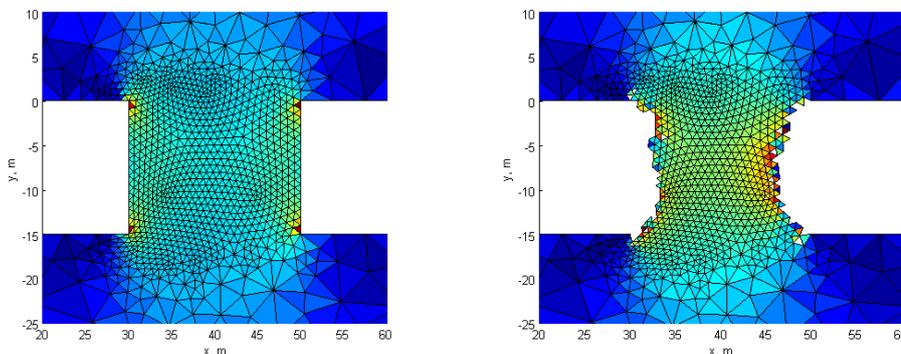


Рис. 1. Поведение рудного целика под влиянием напряжений: исходное и конечное состояние /
Fig. 1. Behavior of an ore pillar under stress: initial and final state

Математическая модель построена методом конечных элементов для условий Садонского полиметаллического месторождения в гранитах с параметрами:

- плотность, 2650 кг/м³;
- модуль Юнга, $4,64 \times 10^{10}$ Па;
- коэффициент Пуассона, 0,2;
- размер выработанного пространства по горизонтали, м;
- размер щели между элементами выработанного пространства, м.

Параметры b и l изменялись с интервалом 1 м в пределах 5...20 м и 10 ...50 м соответственно. Внешнее сейсмическое влияние моделировало воздействие с сейсмической интенсивностью 7, 8 и 9 баллов (табл. 1 – 3).

Таблица 1 / Table 1

**Динамические напряжения при воздействии 7 баллов, Мпа /
Dynamic stresses under impact of 7 points, МПа**

Параметры b и l , м / Parameters b and l , m	5	10	15	20
10	0,08	0,37	1,28	0,14
15	0,20	1,26	0,38	0,13
20	0,12	0,37	0,20	0,36
25	0,12	1,25	0,17	0,37
30	0,09	0,19	0,13	1,26
35	0,21	0,28	0,27	0,19
40	1,25	0,89	0,19	0,19
45	0,46	0,21	0,86	0,35
50	0,38	1,28	1,27	0,38

Таблица 2 / Table 2

**Динамические напряжения при воздействии 8 баллов, Мпа /
Dynamic stresses under impact of 8 points, МПа**

Параметры b и l , м / Parameters b and l , m	5	10	15	20
10	0,17	0,73	2,55	0,28
15	0,40	2,53	0,75	0,26
20	0,24	0,75	0,41	0,73
25	0,23	2,50	0,34	0,74
30	0,19	0,39	0,25	2,51
35	0,41	0,56	0,53	0,37
40	2,49	1,78	0,38	0,38
45	0,93	0,42	1,73	0,71
50	0,75	2,57	2,55	0,75

Таблица 3 / Table 3

**Динамические напряжения при воздействии 9 баллов, Мпа /
Dynamic stresses under impact of 9 points, MPa**

Параметры b и l, м / Parameters b and l, m	5	10	15	20
10	0,25	1,10	3,83	0,43
15	0,59	3,79	1,13	0,39
20	0,36	1,12	0,61	1,09
25	0,35	3,75	0,52	1,10
30	0,28	0,58	0,38	3,77
35	0,62	0,84	0,80	0,56
40	3,74	2,67	0,58	0,57
45	1,39	0,63	2,59	1,06

Моделирование на эквивалентных материалах (эпоксидная смола) применялось для определения динамики напряжений рудовмещающего массива в зависимости от состояния выработанного пространства.

Вмещающие породы были представлены эпоксималом – 70% и ангидридом – 30%. Модуль упругости эпоксимала при «замораживании» был 270 кг/см². Коромысло центрифуги вращали со скоростью 25-30 об/мин. Модель нагревали до 130°C 3 часа и охлаждали до комнатной температуры в течение 1,5 часов.

Варианты модели различались состоянием выработанного пространства:

- 1 – не заполнено;
- 2 – заполнено малопрочной породой;
- 3 – заполнено комбинировано породой и твердеющей смесью;
- 4 – заполнено твердеющая смесь.

Каждую модель располагали, как в однородной, так и в дискретной среде.

Садонское месторождение с параметрами: простирание 2500 м, восстание 500 м, мощность 10 м имитировалось моделью размерами 125×25×5 см.

Параметры моделируемой среды имеют следующие значения:

- прочность при растяжении 80 МПа
- коэффициент сцепления 300 кг/см²
- угол внутреннего трения 45°
- модуль сдвига 2,510⁻⁵ кг/см²
- объемный вес 2,72 г/см³
- прочность при сжатии 130 МПа
- влажность 3...5%

Определено, что заполнение выработанного пространства даже малопрочными смесями (до 1 МПа) по сравнению с вариантом без заполнения снизило напряжения в 1,3...1,7 раз. В однородной модели значение напряжений меньше, чем в дискретной модели.

Заполнение прочной твердеющей смесью снижает напряжения. Вариант закладки малопрочными смесями равнозначен изоляции выработанного пространства. Этот вариант модели наиболее близок к фактическому состоянию массива Садонского месторождения.

Напряженное состояние массива зависимости от состояния выработанного пространства в интервале 1,0 ... 9,2 МПа (табл.4).

Таблица 4 / Table 4

**Величина напряжений при отработке моделей, Мпа /
Stress value during model development, MPa**

Состояние модели / Model condition	Висячий бок / Hanging side		Лежачий бок / Recumbent side	
	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y
Без заполнения выработанного пространства / Without filling the goaf				
Однородная / Homogeneous	5.4	3.5	5.4	3.8
Дискретная / Discrete	9.3	8.1	6.4	4.8
С заполнением малопрочной смесью / Filled with low-strength mixture				
Однородная / Homogeneous	2.2	1.8	2.3	1.8
Дискретная / Discrete	4.6	3.7	3.4	2.8
С комбинированным заполнением / With combined filling				
Однородная / Homogeneous	1.8	1.7	1.7	1.8
Дискретная / Discrete	3.8	2.7	2.6	1.8
С заполнением прочной смесью / Filled with a strong mixture				
Однородная / Homogeneous	1.8	1.2	1.4	1.1
Дискретная с заполнением прочной смесью / Discrete with filling with a strong mixture	3.2	2.7	2.9	2.2

В качестве критерия геомеханической опасности может быть использовано отношение напряжений в модели к пределу прочности закладочного материала. По этому критерию более безопасны варианты с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями (табл.5).

Таблица 5 / Table 5

**Величина геомеханической опасности /
Magnitude of geomechanical hazard**

Состояние выработанного пространства / State of mined-out space	Вариант / Option	Максимальные напряжения, Мпа / Maximum stress, MPa	Коэффициент опасности / Hazard factor
Не заполнены / Not filled in	1	9.2	1.15
Заполнены породой / Filled with rock	2	4.7	0.58
Заполнены комбинировано / Filled in combination	3	3.7	0.47
Заполнены твердеющей смесью / Filled with hardening mixture	4	3.4	0.42

Моделирование на низкомолекулярных материалах с фоторегистрацией результатов было применено для оценки величины напряжений в элементах очистных выработок. Модели изготавливали из оптически активного полиуретана.

Глубина выработки от дневной поверхности 350 м, объемный вес налегающих пород $3,0 \text{ т/м}^3$.

Напряжения в модели и в натуре определяются из выражения:

$$G_i = \gamma H G_i / k$$

где G_n – напряжения в натуре, МПа;

G_m – напряжения в модели, МПа;

k – коэффициент подобия;

γ – плотность руды и пород, кг/м³;

H – глубина залегания точки от дневной поверхности, м.

Состояние массива исследовали при условиях:

- боковой распор 0,5; 1,0; 1,5;
- угол наклона силового вектора к вертикальной оси $\alpha = 0$;
- модуль твердеющей закладки $E = 0,1 \text{ МПа}$;
- модуль вмещающих пород – $1,4 \text{ МПа}$;
- варианты без закладки и с закладкой камер.

При коэффициенте бокового распора $\lambda = 0,5$ максимальные напряжения в зонах замков свода и стенках камер равны $7,6 \times 7,5 = 57 \text{ МПа}$, а в вершине свода потолочины $7,6 \times 2 = 15 \text{ МПа}$. Значения параметров напряжений приведены в виде рисунка, чтобы наглядно указать их положение в пространстве (рис. 2).

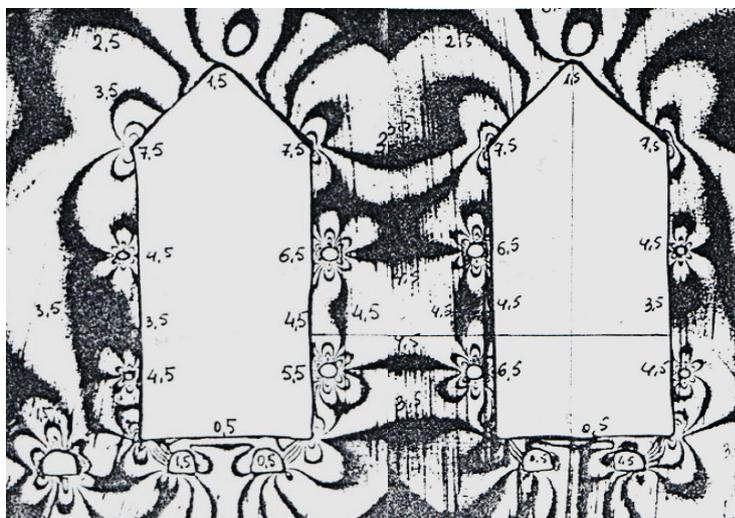


Рис. 2. Поля изохром при коэффициенте бокового распора 0,5: слева – открытая камера; справа – заложенная камера /
Fig. 2. Fields isochrome with a lateral expansion coefficient of 0.5: on the left – open chamber; on the right is a blocked camera

При коэффициенте бокового распора $\lambda = 1,0$ в зонах замков свода, потолочине и стенках камеры напряжения составляют: $7,6 \times 6,5 = 49 \text{ МПа}$. Такие же напряжения и в своде потолочины камеры.

При коэффициенте бокового распора $\lambda = 1,5$ в зонах замков свода потолочины и стенки камеры напряжения составляют $7,6 \times 6,5 = 49 \text{ МПа}$, а в своде потолочины до $7,6 \times 8,5 = 64 \text{ МПа}$ против 15 при коэффициенте бокового распоре 0,5).

Напряжения в потолочине составили:

- при коэффициенте бокового распора $\lambda = 0,5 - 7,6 \times 5,5 = 41$ МПа;
- при коэффициенте бокового распора $\lambda = 1,0 - 7,6 \times 13,5 = 102$ МПа;
- при коэффициенте бокового распора $\lambda = 1,5 - 7,6 \times 18,5 = 140$ МПа.

Максимальные напряжения на контурах камеры и в замках потолочины зарегистрированы при коэффициенте бокового распора 1,5 (табл.6).

Таблица 5 /Table 5

**Напряжения в элементах геомеханической системы, Мпа /
Stress in elements of the geomechanical system, МПа**

Expansion coefficient	Состояние выработанного пространства / Goaf condition	
	Открытое / Open	Заполненное твердеющей смесью / Filled with hardening mixture
Потолочина / ceiling		
0.5	3	2
1.0	7	5
1.5	13	9
левый замок свода / left vault lock		
0.5	5	6
1.0	4	5
1.5	3	4
правый замок свода / right vault lock		
0.5	5	5
1.0	5.5	6.5
1,5	6	8

Сложные горно-геологические условия разработки месторождений снижают полноту эксплуатации недр, увеличивают затраты на добычу, влияют на экономические, экологические и эргономические условия регионов.

Один из путей совершенствования технологии разработки месторождений – использование свойств горных массивов, прежде всего, действующих природных и техногенных напряжений (рис. 3).

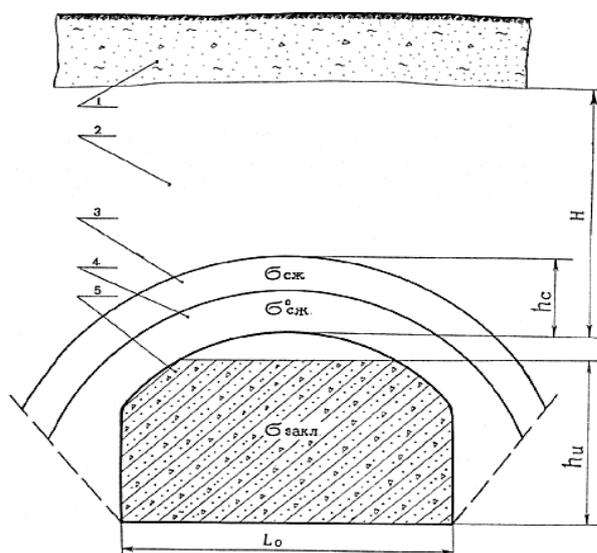


Рис. 3. Схема напряжений в геомеханической системе «нетронутый массив – нарушенный массив – выработанное пространство»: 1 – наносы; 2 – горные породы; 3- верхний слой нарушенных пород; 4 – нижний слой нарушенных пород; 5 – искусственный массив из твердеющей смеси; H-глубина работ; h_c – высота свода нарушенных пород над выработкой; h_u – высота искусственного массива /

Fig. 3. Stress diagram in the geomechanical system “intact massif – disturbed massif – mined-out space”: 1 – sediments; 2 – rocks; 3- upper layer of disturbed rocks; 4 – lower layers of disturbed rocks; 5 – artificial mass of hardening mixture; H- depth of work; h_c – height of the arch of disturbed rocks above the excavation; h_u – height of the artificial massif

Безопасность горных объектов и их инфраструктуры обеспечивается до тех пор, пока скорость смещения пород при максимальном воздействии не превысит допустимого для данных условий предела упругости.

Наибольшую опасность для массива горных пород и поверхности представляют взрывные работы, поэтому горные работы развивают так, чтобы волны напряжений распространялись не через нетронутый массив, а через выработанное пространство, где они гасятся.

Оставление выработанного пространства не заполненным увеличивает коэффициент опасности. Варианты заполнения только прочным или комбинированным по прочности материалом различаются незначительно, что открывает возможности снижения нормативной прочности твердеющей закладки при определенных геодинамических условиях.

Выводы

Поведение рудовмещающих массивов при разработке рудных месторождений подземным способом зависит от величины и знака природных и техногенных напряжений.

Защита объектов инфраструктуры горных предприятий и земной поверхности региона РСО-Алания осуществляется с использованием результатов геофизического мониторинга, в том числе, работы сжимающих напряжений в зоне контакта руд с вмещающим массивом, состояние выработанного пространства при его погашении, а так же механизм развития техногенных напряжений дифференцировано для элементов горной выработки.

Величина напряжений и состояние очистных выработок, как в процессе выемки руд, так и спустя неопределенно длительное время после их погашения регулируются путем регламентации свойств материала – заполнителя выработанного пространства.

Полученные сведения о поведении рудовмещающего массива актуальны для проектирования горных работ при доработке запасов месторождений Садонского рудного узла, а также для месторождений с аналогичными условиями локализации оруденения традиционными и новыми технологиями с выщелачиванием металлов на месте локализации оруденения.

Литература

1. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – №8. – С. 130-143. 2018. Том 1. С. 47-62.
2. Войтецкий Л., Коничек П., Мендецки М.Я., Голда И., Зуберек В.М. Геофизическая оценка эффективности взрывных работ для обрушения кровли при проходке длинномерного угольного пласта. // Чистая и прикладная геофизика. – 2020. – Т. 177. – С. 905-917.
3. Голик В.И. Геомеханические аспекты комбинирования технологий разработки месторождений Садона. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – №2. – С. 222-234.
4. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. / Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, М.В. Змеев. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. – 2017. – С. 170-182.

5. Кочарян Г.Г., Золотухин С.Р., Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Спунгин В.Г. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений. // ФТПРПИ. – 2018. – №1. – С. 16–24.
6. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры. // Маркшейдерский вестник. – 2016. – №1. – С. 35–43.
7. Петров Ю.С., Хадзарагова Е.А., Соколов А.А., Шарипзянова Г.Х., Таскин А.В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №11-1. – С. 178-188.
8. Хайрутдинов А. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Kowalik T., Тюляева Ю. С. Управление напряженно-деформационным состоянием массива горных пород путем формирования разнопрочностной закладки. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №10. – С. 42–55.
8. Халкечев Р. К., Каширский А. С., Халкечев К. В. Управление технологией разрушения материалов на основе математического моделирования устойчивого и неустойчивого развития трещин. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №11. – С. 359–366.
9. Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng. An extension failure criterion for brittle rock. // Deep Rock Behaviour in Engineering Environments. – 2020. – Vol. 2020. – pp. 1–12.
10. Fanzhen Meng, Gui Yuan Wang L., Hui Zhou. Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 13. Iss. 1. – pp. 221–247.
11. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremenkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. // Materials. – 2023. – Vol. 16. – p. 726.
12. Li C.C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses. // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. London: Taylor & Francis Group. – 2018. – Vol. 1. – pp. 47–62.
13. Naithani A.K. Rock Mass Classification and Support Design using the Q-System. // Journal of the Geological Society of India. – 2019. – Vol. 94. – pp. 443.
14. Rybak J., Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A., Akinshin I. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill. // Mining Science. – 2021. – Vol. 28. – pp. 19-32.
15. Scholz C.H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3rd ed. // Cambridge : Cambridge University Press. – 2018. – 519 p.
16. Sepehri M., Apel D. B., Adeeb S., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. // Engineering Geology. – 2020. – Vol. 266. – pp.105–117.
17. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaeв G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. // International Journal of GEOMATE. – 2018. – Vol. 15(47). – pp. 158-163.
19. Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma et al. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – Vol. 29. Iss. 4. – pp. 571–576.
20. Qinghua Lei, KeGao. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 113. – pp. 121–133.

References

1. Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshev A.M. The 100th anniversary of the department of mining engineering of URSMU. News of higher educational institutions. Mining Journal. 2020. No. 8. pp. 130–143. 2018. Vol. 1. pp. 47–62. (In Russ.)
2. Wojtecki, Ł., Konicek, P., Mendecki, M.J. et al. Geophysical Evaluation of Effectiveness of Blasting for Roof Caving During Longwall Mining of Coal Seam. Pure Appl. Geophys. 2020. Vol. 177, pp. 905–917. DOI: 10.1007/s00024-019-02321-1
3. Golik V.I. Geomechanical aspects of combining technologies for developing Sadon deposits. News of Tula State University. Geosciences. 2022. No. 2. pp. 222–234. (In Russ.)
4. Geomechanical and aerogasdynamic consequences of undermining of the territories of mining allotments in the mines of Eastern Donbass. Kachurin N.M., Stas G.V., Korchagina T.V., Zmeev M.V. In: Proceedings of the Tula State University. Geosciences. Vol. 1. 2017. pp. 170–182. (In Russ.)
5. Kocharyan G.G., Spungin V.G., Zolotukhin S.R., Kalinin E.V., Panas'yan L.L. Stress–strain state of rock mass in the zone of tectonic fractures in the korobkov iron ore deposit. Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54. No. 1. pp. 13–20. DOI: 10.1134/S1062739118013270.
6. Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of properties and the condition of the massif of rocks by underground mining of fields of difficult structure. Mine Surveying Bulletin. 2016. No. 1. pp. 35–43. (In Russ.)
7. Petrov Yu.S., Khadzaragova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.Kh., Taskin A.V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2020. No. 11-1. pp. 178–188. (In Russ.)
8. Khairutdinov A.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Kowalik T., Tyulyaeva Yu.S. Stress-strain behavior control in rock mass using different-strength backfill. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2020. No. 10. pp. 42–55. (In Russ.)
8. Khalkechev R.K., Kashirsky A.S., Khalkechev K.V. Rupture control in materials based on mathematical modeling of stable and unstable fracture propagation. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2014. No. 11. pp. 359–366. (In Russ.)
9. Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng. An extension failure criterion for brittle rock. Deep Rock Behaviour in Engineering Environments. 2020. Vol. 2020. pp. 1–12.
10. Fanzhen Meng, Gui Yuan Wang L., Hui Zhou. Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. Vol. 13. Iss. 1. pp. 221–247.
11. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremenkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. Materials. 2023. Vol. 16. p. 726.
12. Li C.C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. London: Taylor & Francis Group. 2018. Vol. 1. pp. 47–62.
13. Naithani A.K. Rock Mass Classification and Support Design using the Q-System. Journal of the Geological Society of India. 2019. Vol. 94. pp. 443.
14. Rybak J., Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A., Akinshin I. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill. Mining Science. 2021. Vol. 28. pp. 19–32.
15. Scholz C.H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2018. 519 p.
16. Sepehri M., Apel D. B., Adeeb S., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. Engineering Geology. 2020. Vol. 266. pp. 105–117.

17. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaeв G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15(47). pp. 158-163.

19. Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma et al. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29. Iss. 4. pp. 571–576.

20. Qinghua Lei, KeGao. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019. Vol. 113. pp. 121–133.

УДК 556:622.211(477.61/.62)

DOI: 10.46698/VNC.2023.93.35.015

Оригинальная статья

Гидравлические аспекты режима гидросферы на полях угольных шахт (на примере Восточного Донбасса)

А.В. Мохов 

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

Статья поступила: 14.06.2023, доработана: 01.09.2023, принята к публикации: 08.09.2023

Резюме: Статья посвящена выявлению механизма трансформации гидравлического режима подземных и поверхностных вод на полях действовавших и ликвидированных с затоплением выработок угольных шахт Восточного Донбасса. **Актуальность исследований.** Определяется необходимостью развития научных основ прогнозирования гидродинамических последствий освоения угольных объектов подземным способом для решения вопросов их эксплуатации, охраны и реабилитации окружающей среды. **Цель исследований.** Совершенствование теоретических основ фильтрационного взаимодействия гидросферы и горных выработок угольных шахт. **Методы исследований.** Применены стандартные методы сбора натурных данных о режиме гидросферы региона, обработки и анализа информации. **Результаты исследований.** Эксплуатация и ликвидация угольных шахт вызвала сильные нарушения гидросферы Восточного Донбасса. Для участков эксплуатации и массовой (после 1995 г.) ликвидации шахт характерно нарушение состояния подземных и поверхностных водных объектов. Механизмы формирования нарушений окружающей среды разнообразны. Основной причиной снижения уровней подземных вод, утечек поверхностных вод являются их дренаж горными выработками по зонам водопродящих трещин сдвижения и откачка воды из шахт. Снижение уровней может быть вызвано формированием фильтрационно-емкостной структуры и новых очагов разгрузки. Выявлены утечки из водоемов без поступления воды в шахту по разрывным нарушениям. Локальные снижения уровня происходят под влиянием изменения емкостных свойств пород. Крупные депрессии подземных вод развиваются в основном у контура зон водопродящих трещин сдвижения над выработанным пространством сближенных разрабатываемых угольных пластов. Ликвидация шахт с затоплением выработок вызвала подъем уровня подземных вод, сокращение депрессий, появление источников шахтных вод в понижениях рельефа земной поверхности вдоль выходов кровли разрабатываемых пластов. Выпуск или откачка шахтных вод из шахт способствуют сохранению небольших депрессий подземных вод. Затопленные выработки становятся источниками прорывов шахтных вод в другие горные выработки, их растекания в недрах.

Ключевые слова: Восточный Донбасс, угольные залежи, подземная эксплуатация, ликвидация шахт, режим подземных и поверхностных вод, гидравлические аспекты.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания ЮНЦ РАН, № Г.р. проекта 122020100345-8.

Для цитирования: Мохов А.В. Гидравлические аспекты режима гидросферы на полях угольных шахт (на примере Восточного Донбасса). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 193-201. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.35.015.

DOI: 10.46698/VNC.2023.93.35.015

Original paper

Hydraulic aspects of the hydrosphere regime in the fields of coal mines (on the example of Eastern Donbass)

A.V. Mokhov 

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

Received: 14.06.2023, revised: 01.09.2023, accepted: 08.09.2023

Summary. The article is devoted to identifying the mechanism of transformation of the hydraulic regime of underground and surface waters in the fields of working and liquidated mine of coal mines in Eastern Donbass due to flooding. **Relevance.** It is determined by the need to develop the scientific basis for predicting the hydrodynamic consequences of the development of coal objects by underground methods in order to resolve issues of their operation, protection and rehabilitation of the environment. **Aim.** Improving the theoretical foundations of filtration interaction between the hydrosphere and the workings of coal mines. **Methods.** Standard methods were used for collecting field data on the regime of the region's hydrosphere, processing and analyzing information. **Results.** The exploitation and liquidation of coal mines caused severe disturbances in the hydrosphere of Eastern Donbass. Areas of exploitation and mass (after 1995) liquidation of mines are characterized by disruption of the condition of the state of underground and surface water bodies. The mechanisms of formation of environmental disturbances are varied. The main reason for the decrease in groundwater levels and leakage of surface water is their drainage by mine workings along the zones of water-conducting subsidence cracks and pumping out of water from mines. A decrease in levels may be caused by the formation of a filtration-capacitive structure and new centers of unloading. Leaks from reservoirs were revealed without water entering the mine trough rock faults. Local level decreases also occur under the influence of changes in the capacitive properties of rocks. Large groundwater depressions develop mainly near the contour of zones of water-conducting shear cracks above the mined-out space of adjacent mined coal seams. The liquidation of mines with the flooding of workings caused a rise in the level of groundwater, a reduction in depressions, and the appearance of sources of mine water in depressions of the earth's surface along the outcrops of the roof of the developed layers. The release or pumping of mine water from mines helps maintain small groundwater depressions. Flooded workings become sources of mine water breakthroughs into other mine workings and their spreading into the depths.

Key words: Eastern Donbass, coal deposits, underground exploitation, liquidation of mines, regime of underground and surface waters, hydraulic aspects.

Acknowledgements: *The work was carried out as part of the implementation of the state task of the UNC RAS, state registration number of the project 122020100345-8.*

For citation: Mokhov A.V. Hydraulic aspects of the hydrosphere regime in the fields of coal mines (on the example of Eastern Donbass). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(3): 193-201. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.35.015.

Введение

Одним из следствий подземной эксплуатации угольных залежей является площадное снижение уровней подземных вод (ПВ) и осушение горных пород. Обычно сокращение расхода водотоков и водоемов на поверхности вплоть до их исчезновения. Для участков ликвидации шахт с затоплением выработок типичны тенденции

возврата ряда характеристик гидросферы к исходному состоянию, появление выходов шахтных вод. Большую остроту приобрели эти вопросы в Восточном Донбассе.

Научно-методические основы прогнозирования трансформации гидросферы в этих ситуациях разработаны недостаточно, базируются на горно-геометрических построениях, слабо учитывают натурные данные.

Причины спада уровней ПВ, утечек из гидросети исследователями разных стран связываются с дренажным влиянием выработанного пространства (ВП) шахт посредством зон водопроводящих трещин сдвижения (ЗВТС), подъема уровня при затоплении шахт – снижением разгрузки ПВ вследствие сокращения сечения трещин [Безопасная..., 1975; Вартанян, 2003; Гидрогеология ..., 1971; Зубков и др., 2017; Норватов, 1988; Правила ..., 1998; Мироненко и др., 2002; Рыбникова и др., 2013; Трубецкой и др., 2021; Cao Zhiguo et al., 2014; Fan Limin et al., 2021] и рядом других причин [Одинцев и др., 2015; Mokhov, 2007]. Распространение дренажа ПВ локализуется на ограниченных площадях и частях массива (Гидрогеология ..., 1971). Влияние геоструктурных и ряда других факторов рассмотрено в [Илюхин, 2012; Закруткин и др., 2022; Парада и др., 2023; Vatugin, 2020]. Выявлено самопроизвольное растекание вод затопленных шахт [Мохов, 2012; Mokhov, 2007].

Современное состояние гидросферы сформировалось в Восточном Донбассе под влиянием полуторавековой разработки угля подземным способом и «мокрой», то есть, с затоплением горных выработок, ликвидации многих десятков шахт. К настоящему моменту времени здесь имеется 5 действующих шахт. За годы эксплуатации произошло распространение ВП на большой площади с проникновением на глубину до 1 км. Положение площадей с преобладанием сильного спада уровней к началу массовой ликвидации (около 1995 г.) отражено на рисунке 1. Гидрогеологическая обстановка здесь к ее концу (около 2015 г.) коренным образом различается.

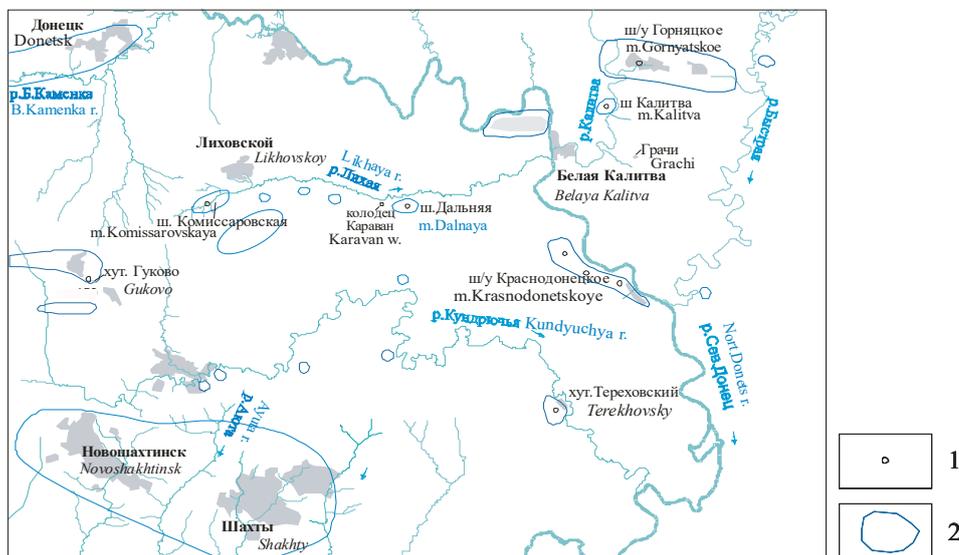


Рис. 1. Площади с преобладающим снижением уровней подземных вод под влиянием водоотливов действующих шахт и распространения шахтных вод к 2023 г. после ликвидации шахт (Восточный Донбасс)

Условные обозначения: 1 – Угольная шахта, упомянутая в тексте; 2 – Площади с преобладанием снижения уровней подземных вод (до начала ликвидации шахты) и распространения шахтных вод в выработанном пространстве (к 2023 г.) /

Fig. 1. Areas with a predominant decrease in groundwater levels under the influence of dewatering of existing mines and the spread of mine waters by 2023 after the liquidation of mines (Eastern Donbass)

Symbols: 1 – The coal mine mentioned in the text; 2 – Areas with a predominance of a decrease in groundwater levels (before the start of the liquidation of the mine) and the spread of mine waters in the goaf (by 2023)

Настоящая публикация посвящена рассмотрению натуральных данных о гидравлических событиях в недрах, реакции гидросети региона на рубеже тысячелетий в связи с разработкой угольных залежей и ее сворачиванием. Их исследование позволяет раскрыть типологию и механизмы гидравлической трансформации гидросферы как научной основы разработки прогнозов.

Материалы и методы исследования

Использованы личные полевые материалы автора, литературные данные. Применены стандартные методы сбора и обработки информации.

Результаты исследований и их обсуждение

Одни из первых свидетельств о трансформации гидродинамического режима ПВ на полях действующих шахт Донбасса в целом к середине 1960-х гг. помещены в [Гидрогеология..., 1971]. Указывается на незатронутость режима ПВ верхних горизонтов над ВП дренирующим влиянием шахт. На выходах угольных пластов происходит формирование общих депрессий ПВ разных шахт длиной нескольких километров. Чередование водоносных и водоупорных пород затрудняет дренаж массива. В указанном источнике приведен ряд конкретных данных о влиянии шахт.

С подобными явлениями автор настоящей публикации сталкивался практически повсеместно при обследовании земельных отводов шахт и пьезометров в различных частях региона с 1970-х гг. по настоящее время.

На большей части поля действовавшей шахты (ш.) «Комиссаровская» (у пос. Лиховской) имелись естественные выходы ПВ и колодцы. В колодце с весенним самоизливом воды ее меженный уровень стабильно находился на глубине 4–5 м. Показателем распространения депрессии поверхности ПВ в кровле пласта угля и сохранения ее после ограниченного затопления шахты служит отсутствие водозаборных скважин и колодцев на выходе кровли, при наличии их на выходе почвы пласта. Режим ПВ колодца не изменился.

На подработанной части поля действующего Горняцкого шахтоуправления (ш/у) зафиксированы крупные выходы ПВ, которые после затопления выработок сохранились. Родники и балочные водотоки имелись и имеются на поле соседней ш. «Калитва» до и после затопления. На поле действующего ш/у «Краснодонецкое» (у пос. Синегорский) имелись естественные выходы ПВ из почвы разрабатываемого пласта и на удалении свыше 70–80 м над ВП. «Мокрая» ликвидации шахты привела к выделению из данного интервала шахтных вод по ЗВТС.

Протяженность депрессий вдоль простирания может быть также довольно небольшой даже при длительном водопонижении.

Так, наблюдения показывают сохранение круглогодичного самоизлива колодца «Караван», находящегося в 1,3 км вдоль простирания слоев от границ ВП по разрабатываемому на протяжении десятилетий пласту антрацита ш. «Дальняя». Колодцем каптируются слои в 75–90 м над угольным пластом. В целике на промплощадке, рядом с границей ВП скважина каптирует слои песчаников и известняка в интервале, расположенном ближе к разрабатываемому пласту, чем у колодца. Колодец

и скважина находятся также в 2 км от границы ВП по простиранию затопленной свыше 20 лет назад ш. № 410. Отсутствие влияния горных работ на эти водопункты указывает на малые размеры и изолированность сформированной водоотливом депрессии, слабое распространение возмущений как вдоль, так и вкрест простирания слоев. Наклонное залегание слоев ($25\text{--}30^\circ$) препятствует перетоку и значительной разгрузке ПВ в рельеф.

Материалы обследования полей действующих шахт указывают на преобладание локализации автономных депрессий ПВ между относительно удаленными друг от друга разрабатываемыми пологими и полого-наклонными пластами. Снижение уровней тяготеет к объемам дренажа массива посредством ЗВТС, проявляясь в виде полос вдоль простирания на выходах пластов. Типовую схему дренажа объектов иллюстрирует рисунок 2.

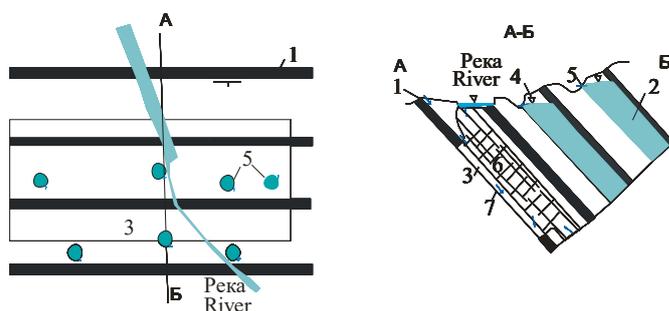


Рис. 2. Схема фильтрационного взаимодействия угольной шахты со скоплениями подземных и поверхностных вод

Условные обозначения: 1 – угольный пласт; 2 – водоносный горизонт; 3 – выработанное пространство; 4 – уровень подземных вод; 5 – родник; 6 – зона водопроводящих трещин сдвижения; 7 – поток воды/

Fig. 2. Scheme of filtration interaction of a coal mine with accumulations of underground and surface water

Symbols: 1 – coal seam; 2 – aquifer; 3 – goaf; 4 – level groundwater; 5 – spring; 6 – zone of water-conducting subsidence cracks; 7 – water flow

Выводы о размещении каналов поступления ПВ в шахты согласуются с данными о локализации утечек сюда из поверхностных водотоков.

Так, в створе, расположенном в 200 м ниже по течению от выхода разрабатываемого пласта под аллювий, расход р. Аюта у г. Шахты оказался на $45\text{ м}^3/\text{ч}$ меньше, чем в 1,5 км выше по течению [Гидрогеология ..., 1971]. Аналогичная ситуация существовала на стадии эксплуатации и сохранилась после затопления выработок на ш/у «Краснодонецкое». Здесь автором обнаружено исчезновение на участке выхода ЗВТС в кровле угольного пласта и возобновление балочного водотока через 70–100 м. На поле ш. «Западная» Горняцкого ш/у имелся и после ее затопления сохраняется протяженный водоток явно в условиях отсутствия его дренажа. Подработка русла реки (глубина около 250 м) ш. «Краснолучская» (западнее ш. «Комиссаровская») на участках выхода в долину сместителей крутопадающих сбросов привела к потере расхода (около $1100\text{ м}^3/\text{ч}$ на дистанции 700 м) и поступлению в шахту соизмеримого водопритока. Обнаружена утечка около $70\text{ м}^3/\text{ч}$ воды из балочного водотока. На участке зафиксирована серия фонтанирующих скважин. Вероятно развитие сдвижением локальных водопроводящих дизъюнктивных каналов.

В хуторе Тереховский обнаружен случай сильного влияния шахтного водоотлива на ПВ покровных отложений. За 3 года вне поля шахты развился спад уровня

воды в толще песков местами до 15 м. Произошло резкое сокращение дебита источников ПВ в балке. Эти эффекты обусловлены охватом хутора депрессией ПВ, протяженностью свыше 1 км от границы ВП.

В целом отметим, что на подработанных территориях имелось и имеется много водотоков и водоемов, не участвующих в обводнении выработок – признак невовлечения в дренаж ПВ всей надугольной толщи.

Формирование депрессий возможно также под влиянием причин, непосредственно не связанных с водоотливом и дренажом ЗВТС.

Так, в конце 1990-х гг. в восточной части хутора Гуково (у г. Гуково) произошел внезапный спад уровня амплитудой до 3 м уровня ПВ в колодцах и скважинах, каптирующих мощный слой песчаников углепродуктивных отложений, прекращение круглогодичного самоизлива одного из колодцев. Трансформация связана с подработкой этой части хутора на глубине около 0,8 км. Дополнительные водопроявления в шахте отсутствовали. В западной части хутора режим ПВ изменений не претерпел. В хуторе в целом он сохраняется в течение двух десятилетий без изменений, несмотря на затопление шахты. На причину спада указывают результаты изучения сдвижения земной поверхности, показавшие старт события при ее оседании на величину около 0,35 м. Как показано нами ранее, геомеханические основания позволяют связать спад с ростом ёмкостных свойств слоя, что создало иллюзию ухода воды. Положение уровня регулирует созданный сдвижением очаг разгрузки ПВ в овраге на более низкой отметке.

О возможности локального появления неводопроводящих каналов свидетельствуют случаи ухода крупных прудов на полях действующих шахт. Один из них произошел у г. Новошахтинск (канал утечки воды остался невыясненным), второй – у г. Краснодон. Приращения водопритока в шахты не произошло. Последнее событие интересно уходом воды по образовавшейся в чаше водоема в тальвеге балке крупной трещине. Изучение материалов показало, что причиной утечки послужило отслаивание при сдвижении лежачего бока надвига от висячего с формированием поглощающей емкости, не получившей немедленную сообщаемость с ВП.

В ходе массовой ликвидации подъем ПВ привел к сокращению размера депрессий. Выделениями шахтных вод охвачены в основном участки выходов ЗВТС на поверхность, часто в понижениях рельефа. Там, где уровни ПВ сохранялись на стадии эксплуатации неизменными, их повышение отсутствует. Однако, у гг. Шахты, Новошахтинск, Гуково восстановления уровней на естественных отметках не произошло, ввиду откачки или выпуска воды из затопленных шахт. Контуры площадей с преобладанием подъема уровней распространения крупных затопленных ВП показаны на рисунке 1.

Аналогичные рассмотренным гидрогеологические и иные последствия проявлялись до начала Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.), в ходе нее, конце и по завершению, когда были затоплены, и восстанавливались все шахты бассейна в целом.

Появление интрузий воды в ВП шахт привело к изменению гидрогеологической обстановки [Мохов, 2012]. Зафиксированы прорывы и перетоки воды отсюда через целики в ш. «Западная» (до 50000 м³/ч), из ш. «Несветаевская» в ш. «Соколовская» (до 200 м³/ч) в г. Новошахтинск [Mokhov, 2007; Мохов, 2012] при нарастании и ослаблении гидростатического давления на целик. Водопроявления имели пульсирующий характер, указывая на периодическое раскрытие, смыкание и волны рас-

пространения проводящих трещин, формирования значительных градиентов напора ПВ. Известны выбросы воды из шахт на поверхность.

Нами выявлено несколько случаев далекого растекания вод шахтного состава, приведших к замещению низко минерализованных ПВ. В наиболее ярком из них (у пос. Грачи) величина сухого остатка и содержание сульфат-ионов в воде неглубокой скважины выросли за 3 года в 3–4 раза. Поступление воды из ш. «Калитва» произошло на расстояние не менее чем на 7 км с подъемом на 130 м выше уровня ее затопления. Вероятными путями растекания служат слои песчаников, известняков и зоны разрывных нарушений. Причиной этих событий является разрядка напряженного состояния, созданного действием в горном массиве архимедовых сил со стороны подземных водных объектов [Мохов, 2012].

Выводы

К началу массовой ликвидации шахт на периферии региона произошло развитие крупных депрессий поверхности ПВ вдоль простирания слоев. Спад уровней охватил в основном дренируемые водоотливом шахт части горного массива. Зафиксированы утечки воды из гидросети в выработки шахт и недр. В условиях водоотведения из шахт снижение уровней ПВ связано с существованием природной и формированием при сдвигении водопроводящей структуры, ростом емкостных свойств пород, понижением базиса дренажа водных объектов. Формирование депрессий продолжается у пяти действующих шахт, а их поддержание локализуется на участках откачки и выпуска воды из затопленных шахт. Ликвидация вызвала подъем поверхности, сокращение размеров депрессий ПВ, выделения шахтных вод на земной поверхности на участках выхода сюда ЗВТС.

Литература

1. Батугин А.С. О роли тектонофизических исследований в оценке промышленной и геологической безопасности разработки угольных месторождений. // ГИАБ. – М.: МГУ. – 2021. – № 2-1. – С. 241-250.
2. Безопасная выемка угля под водными объектами. / Б.Я. Гвирцман, Н.Н. Кацнельсон, Е.В. Бошнятов и др. – М.: Недра, 1977. – 175 с.
3. Варганян Г.С. Геодинамические процессы во флюидосфере и некоторые их следствия. // Отечественная геология. – 2003. – №3. – С. 44–50.
4. Гидрогеология СССР. Т. VI. Донбасс. – М.: Недра, 1971. – 480 с.
5. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк В.Н. Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – №1 Т. 12. – С. 19-34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002.
6. Зубков В.В., Зубкова И.А. Формирование зоны техногенных водопроводящих трещин над очистной выработкой. // Науки о Земле. – 2017. – №5(59). – С. 172-175. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59146.
7. Илюхин Д.А. Зависимость параметров зон водопроводящих трещин от геологического строения подрабатываемой толщи. // Маркш.-геодезич. обеспечение рац. использ., охраны недр и строительства сооружений. – Межвуз. сб. науч. тр. Юж.-Рос.гос.техн.ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ). – 2012. – С. 41-46.
8. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Т.1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. – М.: МГУ, 2002. – 611 с.
9. Мохов А.В. Гидродинамическая эволюция пустотного пространства каменноугольных шахт под влиянием затопления. // Вестник Южного научного центра РАН. – 2012. – Т. 8. № 3. – С. 42-49.

10. Норватов Ю.А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых). – Л.: Недра, 1988. – 261 с.
11. Одинцев В.Н., Милетенко Н.А. Прорыв воды в горные выработки как следствие самопроизвольного гидроразрыва массива горных пород. // ФТПРПИ. – 2015. – №3. – С. 3-16.
12. Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №2. – С.95-105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008.
13. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. // Минтопэнерго РФ, РАН, ВНИМИ. – СПб: Недра, 1998. – 291 с.
14. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Геофильтрационная модель массива горных пород в области влияния обрабатываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала. // Литосфера. – 2013. – №3. – С. 130-136.
15. Трубецкой К.Н., Милетенко Н.А. Прогноз гидрогеомеханических процессов при подработке водных объектов. // Горный журнал. – 2021. – №3. – С. 73-79. DOI: 10.17580/gzh.2021.03.02.
16. Batugin A.S. Reactivation of major faults during strong rock bursts as realization of tectonic process. // Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering ISRM 2019. – Foz do Iguassu, Brasil. – 2020. – pp. 1261-1268.
17. Cao Zhiguo, Li Quansheng, Dong Binqi. Water Resource Protection and Utilization Technology and Application of Coal Mining in Shendong Mining Area [J]. // Coal engineering. – 2014.- – Vol. 46(10). – pp. 162-164+168.
18. Cao Zhiguo, Ju Jinfeng, Xu Jialin. Distribution model of water-conducted fracture main channel and its flow characteristics[J]. // Journal of China Coal Society. – 2019. – Vol. 44(12). – pp. 3719-3728.
19. Fan Limin, Wu Qunying, Peng Jie, et al. Thoughts and methods of geological environment monitoring for large coal bases in the middle reaches of the Yellow River [J]. // Journal of China Coal Society. – 2021. – Vol. 46(5). – pp. 1417-1427.
20. Liu Gui, Wang Yilong, Gao Chao, etc. Feasibility analysis of multiple coal seams mining under reservoir and dam[J]. // Coal Science and Technology. – 2020. – Vol. 48(10). – pp. 185-191.
21. Mokhov A.V. Fissuring due to Inundation of Coal Mines and Its Hydrodynamic Implications. // Doklady Earth Sciences. – 2007. – Vol.414. No.4. – pp. 519-521. DOI: 10.1134/S1028334X0704006X.

References

1. Batugin A.S. On the role of tectonophysical research in assessing the industrial and geocological safety of coal deposits development. GIAB. – M.: MGGU. 2021. No. 2-1. pp.241-250. (in Russ.)
2. Safe mining of coal under water bodies. B.Ya. Gvirtzman, N.N. Katsnelson, E.V. Boshenyatov and others. Moscow. Nedra, 1977. 175 p. (in Russ.)
3. Vartanyan G.S. Geodynamic processes in the fluidosphere and some of their consequences. Otechestvennaya geologiya. 2003. No. 3. pp. 44–50. (in Russ.)
4. Hydrogeology of the USSR. T. VI. Donbass. Moscow. Nedra, 1971. 480 p. (in Russ.)
5. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak V.N. Chemical composition and some features of mineral formation in the bottom sediments of the rivers of the Seversky Donets basin (within the Rostov region). *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2022. No. 1. pp. 19-34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002.
6. Zubkov V.V., Zubkova I.A. Formation of a zone of technogenic water-conducting cracks over a stope working. *Nauki o Zemli*. 2017. No. 5(59).pp. 172-175. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59146. (in Russ.)
7. Ilyukhin D.A. Dependence of the parameters of the zones of water-conducting cracks on the geological structure of the undermined stratum. *Marksh.-geodesic. providing rac. use, protection*

of subsoil and construction of structures. Interuniversity. Sat. scientific tr. South-Russian state technical university (NPI). Novocherkassk. YuRGTU (NPI). 2012. pp. 41-46. (in Russ.)

8. Mironenko V.A., Rumynin V.G. Problems of hydrogeoeology. T.1. Theoretical study and modeling of geomigration processes. Moscow. MGGU. 2002. –611 p. (in Russ.)

9. Mokhov A.V. Hydrodynamic evolution of the void space of coal mines under the influence of flooding. Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 8. No. 3. pp. 42-49. (in Russ.)

10. Norvatov Yu.A. Study and forecast of the technogenic regime of groundwater (during the development of mineral deposits). Leningrad. Nedra, 1988.261 p. (in Russ.)

11. Odintsev V.N., Miletenko N.A. Water breakthrough into mine workings as a consequence of spontaneous hydraulic fracturing of a rock mass. FTPRPI. 2015. No. 3. pp. 3-16. (in Russ.)

12. Parada S.G., Hamburg K.Yu. Ore-magmatic systems of the Eastern Donbas. Geology and geophysics of the South of Russia. 2023. No. 2. pp. 95-105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008.

13. Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in coal deposits. Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, Russian Academy of Sciences, VNIMI. St. Petersburg. Nedra, 1998. 291 p. (in Russ.)

14. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Geofiltration model of a rock mass in the area of influence of mined and liquidated mines of the folded Urals. Lithosphere. 2013. No. 3. pp. 130-136. (in Russ.)

15. Trubetskoy K.N., Miletenko N.A. Forecast of hydrogeomechanical processes during the underworking of water bodies. Mining Journal. 2021. No.3.pp. 73-79. DOI: 10.17580/gzh.2021.03.02. (in Russ.)

16. Batugin A.S. Reactivation of major faults during strong rock bursts as realization of tectonic process. Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering ISRM 2019. Foz do Iguassu, Brasil. 2020. pp. 1261-1268.

17. Cao Zhiguo, Li Quansheng, Dong Binqi. Water Resource Protection and Utilization Technology and Application of Coal Mining in Shendong Mining Area [J]. Coal engineering. 2014. Vol. 46(10). pp. 162-164+168.

18. Cao Zhiguo, Ju Jinfeng, Xu Jialin. Distribution model of water-conducted fracture main channel and its flow characteristics[J]. Journal of China Coal Society. 2019. Vol. 4(12). pp. 3719-3728.

19. Fan Limin, Wu Qunying, Peng Jie, et al. Thoughts and methods of geological environment monitoring for large coal bases in the middle reaches of the Yellow River [J]. Journal of China Coal Society. 2021. No.46(5). pp. 1417-1427.

20. Liu Gui, Wang Yilong, Gao Chao, etc. Feasibility analysis of multiple coal seams mining under reservoir and dam[J]. Coal Science and Technology. 2020. Vol. 48(10). pp. 185-191.

21. Mokhov A.V. Fissuring due to Inundation of Coal Mines and Its Hydrodynamic Implicatios. Doklady Earth Sciences. 2007. – Vol. 414. No.4. pp. 519-521. DOI: 10.1134/S1028334X0704006X.

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 ($MВт/см^2$) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье (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 , const , \sin , \cos , \min , \max , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_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 ν , 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
(№ 3. 2023 г. Том 13)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 29.09.2023 г. Дата фактического выхода 09.10.2023 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 24,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 96.

Свободная цена.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.

Издатель:

**Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра
"Владикавказский научный центр Российской академии наук"**

Адрес издателя и редакции:

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

тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

<http://geosouth.ru>

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.

362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3