ISSN 2221-3198

Геология и геофизика юга России

№ 1 / 2022

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 12
№ 1 / 2022

Владикавказ 2021

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
д. т. н., проф. **В. И. Голик**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ
Ph. D., проф. **Ко-Лян Вэнь**, Национальный центральный университет, Тайвань
Ph. D., проф. **Г. П. Ганапати**, Центр по смягчению последствий стихийных бедствий и управлению, Технологический институт Веллуру, Индия
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. **А. Пинар**, Босфорский университет, Турция
д. г.-м. н., проф. **В. В. Стогний**, Кубанский государственный университет, г. Краснодар
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:
362027, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркуса 22
Тел.: 8 (8672) 501841
e-mail: vncran@yandex.ru
http://www.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, 2022

Фото на обложке – Этюд с горами (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
Alexey D. Gvishiani, Academician of RAS, Geophysical Center of RAS, Moscow
Mikhail Ch. Zalikhanov, Academician of RAS, High Mountain Geophysical Institute, Nalchik
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 Exploitatation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow
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
Peter. N. Shebalin, Corresponding Member of RAS, Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of RAS, Moscow
Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA
Vladimir I. Golik, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation
Kuo-Liang Wen, Ph. D., National Central University, Taiwan
Ganapathy Pattukandan Ganapathy, Ph.D, Prof. Centre for Disaster Mitigation and Management Vellore Institute of Technology, India
Vladimir M. Makeev, Dr. Sci. (Geol-Min.), E. M. Sergeev Institute of Geoecology of RAS, Moscow
Illarion D. Muzaev Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz
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
Ali Pınar, Ph. D., Prof., Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Department of Earthquake Engineering, Turkey
Valery V. Stogny, Dr. Sci. (Geol-Min.), Prof., Kuban State University, Krasnodar
Marina V. Rylnikova, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Institute of Comprehensive Exploitatation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Yuriy K. Chernov Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., North Caucasus Federal University, Stavropol
Vasiliy I. Cherkashin Dr. Sci. (Geol.-Min.), Institute of Geology of Daghestan Scientific Centre of RAS (IG DSC RAS), Makhachkala
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

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 Center of RAS
Founder address:
22, Markusa Str., Vladikavkaz, RNO-Alania, 362027 Russia
Tel.: +7 (8672) 501841
e-mail: vncran@yandex.ru
http://www.vncran.ru

Publisher:
Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center 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, 2022

Cover photo – An etude with mountains (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Бубнов С. Н., Герасимов В. Ю.
Раннепермские эффузивные и субвулканические образования Передового хребта Большого Кавказа (геохимическая и металлогеническая специализация пород) 6

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) 19

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Заалишвили В. Б., Бирюлин С. В., Козлова И. А., Мельков Д. А., Юрков А. К.
Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах 35

Попков В. И., Юдин В. В., Попков И. В., Толоконникова З. А.
Тектоника горы Собер-Баш (Северо-Западный Кавказ) 51

Эртелева О. О., Аптикаев Ф. Ф., Редди Картик К. С. К., Чанда С., Сомала С. Н.
Землетрясение Монте Кристо Рэйндж, 15 мая 2020 г.: расчетная интенсивность и макросейсмическое поле 62

ГЕОФИЗИКА

Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Никонова Н. В., Смирнова Л. Н., Уздин А. М.
Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности 75

Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Фидарова М. И.
Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Гоубанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. 89

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Парада С. Г.
Оценка потенциальной золотоносности Тырныаузского рудного узла на основе дистанционных геофизических данных (Северный Кавказ) 109

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Бадов А. Д., Бадов О. А., Дзахова Л. Х., Бязрова Д. Б.
Типология горных поселений Северной Осетии и основные направления их устойчивого развития 119

Свалова В. Б.
Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий 129

Тотурбиев Б. Д., Мамаев С. А., Тотурбиев А. Б.
Низкообжиговая, энергосберегающая, экологически безопасная технология производства керамических материалов на основе глинистых сланцев 148

ГЕОИНФОРМАТИКА

Яицкая Н. А., Бригида В. С.
Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных 162

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

Gazeyev V. M., Gurbanov A. G., Bubnov S. N., Gerasimov V. Yu.
Early Permian effusive and subvolcanic formations of the Front Range of the Greater Caucasus (geochemical and metallogenic rock specialization) 6

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) 19

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Zaalishvili V. B., Biryulin S. V., Kozlova I. A., Melkov D. A., Yurkov A. K.
Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions 35

Popkov V. I., Yudin V. V., Popkov I. V., Tolokonnikova Z. A.
Tectonics of the Soberbash Mountain (North-Western Caucasus) 51

Erteleva O. O., Aptikaev F. F., Reddy Karthik K. S. K., Chanda S., Somala S. N.
Monte Cristo Range earthquake May 15, 2020: calculated intensity and macroseismic field 62

GEOPHYSICS

Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Nikonova N. V., Smirnova L. N., Uzdin A. M.
Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface 75

Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Fidarova M. I.
Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002 89

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Parada S. G.
Assessment of the potential gold content of the Tyrnyauz ore node based on remote geophysical data (North Caucasus) 109

GEOECOLOGY

Badov A. D., Badov O. A., Dzakhova L. Kh., Byazrova J. B.
Typology of mountain settlements in North Ossetia and the main directions of their sustainable development 119

Svalova V. B.
Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories 129

Toturbiev B. D., Mamaev S. A., Toturbiev A. B.
Low-burning, energy-saving, environmentally safe technology for producing ceramic materials based on clay shales 148

GEOINFORMATICS

Yaitskaya N. A., Brigida V. S.
Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoecological problems. Spatial data interpolation 162

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5
DOI: 10.46698/VNC.2022.15.93.001

Оригинальная статья

Раннепермские эффузивные и субвулканические образования Передового хребта Большого Кавказа (геохимическая и металлогеническая специализация пород)

В. М. Газеев[1, 2], А. Г. Гурбанов[1, 2], С. Н. Бубнов[1], В. Ю. Герасимов[3]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: gurbanov@igem.ru;

[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр РАН», Россия, 363110, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1, e-mail: gazeev@igem.ru;

[3]Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана, Российской академии наук, Россия, 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 18/22, e-mail: gera-igem2008@yandex.ru

Статья поступила: 12.01.2022, доработана: 17.02.2022, одобрена в печать: 25.02.2022

Резюме: Актуальность работы. В пределах южной части Скифской плиты известны районы развития раннепермских вулкано-плутонических образований и ассоциирующих с ними золото-сульфидных, полиметаллических, сурьмяно-ртутных и урановых рудных объектов. Геохимические исследования этих пород необходимы для уточнения особенностей развития региона в этот временной период. **Целью исследования** является уточнение геохимических характеристик раннепермских вулканитов, расшифровка их геодинамической позиции и рассмотрение ассоциирующего с ними оруденения. Объектом для исследований выбраны эффузивные и субвулканические образования раннепермского возраста в зоне Передового хребта (ПХ) Большого Кавказа. **Методы исследования** включали: петрографическое описание пород, анализы методами RFA, ICP-MS; геохимические характеристики; построение и анализ дискриминационных и диагностических диаграмм; сравнение концентраций рудных элементов в исследованных и эталонных породах близкого петрохимического типа сформировавшихся в различных геодинамических обстановках. **Результаты работы.** Установлено, что в зоне ПХ в разрезах раннепермских пород распространены нормально и умеренно щелочные эффузивные и субвулканические породы. Это умеренно и низко магнезиальные, редко высоко калиевые породы известково-щелочной серии с калиево-натровым и натровым типами щелочности. Сопоставление вещественных показателей субвулканических пород с петрохимической систематикой гранитоидов показывает, что они обладают чертами как S-type так и I-type гранитов. На петрогенетической *Th/Yb – Ta/Yb* диаграмме фигуративные точки составов изученных пород сгруппированы в поле пород активных континентальных окраин. Вулканиты обогащены LREE, LILE и характеризуются негативными Nb, Ta, Ti (P) аномалиями. Спектры REE трахиандезибазальтов близки к профилю базальтов OIB. Все разновидности пород имеют повышенные содержания Sb и сходный профиль концентрации несовместимых элементов. Сделано предположение, что раннепермские эффузивные и субвулканические образования формировались в пределах вулканоплутонического пояса расположенного на активной континентальной окраине Скифской плиты. Раннепермская фаза магматической активизации, по-видимому, была связана с зарождавшимся здесь тыловым рифтом. Анализ вещественного состава изученных пород показал, что они имеют «смешанные» характеристики, обладая чертами магматических образований раз-

личных генетических и геохимических типов. Показано что с раннепермскими эффузивными и субвулканическими породами ассоциирует золото-сульфидное, сурьмяно-ртутное и урановое оруденение.

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

Благодарности: *Работа выполнена в рамках Госзадания ИГЕМ РАН РАН «Петрология и минерагения магматизма конвергентных и внутриплитных обстановок: история формирования крупных континентальных блоков» Регистрационный №* ЕГИСУ НИОКТР 121041500222-4 и подготовлена при поддержке гос. темы регистрационный номер АААА-А19-119040190054-8 в КНИО ВНЦ РАН.

Для цитирования: Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Бубнов С. Н., Герасимов В. Ю. Раннепермские эффузивные и субвулканические образования Передового хребта Большого Кавказа (геохимическая и металлогеническая специализация пород). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.15.93.001.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2022.15.93.001

Original paper

Early Permian effusive and subvolcanic formations of the Front Range of the Greater Caucasus (geochemical and metallogenic rock specialization)

V. M. Gazeev[1, 2], A. G. Gurbanov[1, 2], S. N. Bubnov[1], V. Yu. Gerasimov[3]

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

[2]Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1 Williams str., Prigorodny district, Mikhailovskoye 363110, Russian Federation, e-mail: gazeev@igem.ru;

[3]Mineralogical museum named A. E. Fersman of Russian Academy of Sciences (Minmuseum RAS), 18-2 Leninsky Avenue, Moscow 119071, Russian Federation, e-mail: gera-igem2008@yandex.ru

Reseived: 12.01.2022, revised: 17.02.2022, accepted: 25.02.2022

Abstract: Relevance. Within the southern part of the Scythian plate, there are known areas of development of Early Permian volcano-plutonic formations and associated gold-sulfide, polymetallic, antimony-mercury and uranium ore objects. Geochemical studies of these rocks are necessary to clarify the features of the development of the region during this time period. **The aim of the study** is to clarify the geochemical characteristics of the Early Permian volcanic rocks, to decipher their geodynamic position, and to consider the mineralization associated with them. The objects for research are effusive and subvolcanic formations of Early Permian age in the area of the Peredovoi Ridge (PR) of the Greater Caucasus. **Research methods** included: petrographic description of rocks, analyzes by RFA, ICP-MS; geochemical characteristics; construction and analysis of discriminatory t diagnostic diagrams; comparison of the concentrations of ore elements in the studied and reference rocks of a similar petrochemical type formed in different geodynamic settings**. Results**. It was found that normal and moderately alkaline effusive and subvolcanic rocks are widespread in the PR zone in the sections of Early Permian rocks. These are moderate and low magnesian, rarely high potassium rocks of the calc-alkaline series with potassium-sodium and sodium types of alkalinity. Comparison of the material parameters of subvolcanic rocks with the petrochemical systematics of granitoids shows that they have features of both S-type and I-type granites.

On the Th/Yb – Ta/Yb petrogenetic diagram, figurative points of volcanic and granitoid compositions are located in the rock field of active continental margins. The volcanics are enriched in LREE, LILE and are characterized by negative Nb, Ta, Ti (P) anomalies. The REE spectra of trachyandesite basalts are close to the profile of OIB basalts. All rock varieties have elevated Sb contents and a similar concentration profile of incompatible elements. As a result, it was assumed that the Early Permian effusive and subvolcanic formations were formed within the volcano-plutonic belt on the active continental margin. The Early Permian phase of magmatic activation was apparently associated with the rear rift originating here. Analysis of the material composition of the studied rocks showed that they have "mixed" characteristics, having the features of igneous formations of various genetic and geochemical types. It is shown that gold-sulfide, antimony-mercury and uranium mineralization is associated with Early Permian effusive and subvolcanic rocks.

Keywords: petrography, geochemistry, geodynamic typification, minerageny.

Acknowledgments: This work was supported by the State Assignment of IGEM RAS "Petrology and minerageny of magmatism in convergent and intraplate environments: history of formation of large continental blocks" Registration No. EGISU R&D 121041500222-4 and prepared with the support of the state. subject registration number AAAA-A19-119040190054-8 in the KNIO VSC RAS.

For citation: Gazeyev V. M., Gurbanov A. G., Bubnov S. N., Gerasimov V. Yu. Early Permian effusive and subvolcanic formations of the Front Range of the Greater Caucasus (geochemical and metallogenic rock specialization). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.15.93.001.

Введение

Актуальность работы. На рубеже среднего и верхнего палеозоя, при сближении, скучивании и шарьировании Предкавказского и Центрально-Кавказского мегаблоков, был сформирован первичный фундамент южной окраины Скифской плиты (СП). В карбоне, в результате широкого развития процессов гранитизации произошло окончательное его оформление. Однако после непродолжительной стабилизации тектонического режима, уже в позднем карбоне и перми здесь накапливаются мощные континентальные молассы содержащие вулканиты [Никишин, 2005; Омельченко, 2021]. В связи с тем, что с раннепермскими вулканитами ассоциирует разнообразное оруденение, их изучение актуально для уточнения особенностей геодинамического развития региона и минерагении этого периода. **Целью исследования** является петролого-геохимическое изучение раннепермских вулканитов зоны Передового хребта (ПХ) Большого Кавказа (БК), их геодинамическая типизация и рассмотрение ассоциирующего с ними оруденения. **Объектом для исследования** выбраны эффузивные породы «Кинырчадской» свиты (КС) и гипабиссальные породы «Кинырчадского» комплекса (КК) распространенные в зоне ПХ БК. Наиболее полный разрез КС известен по р. Аксаут. В его нижней части залегают красноцветные песчаники и конгломераты выше которых расположены туфы и лавы кислого состава (мощность до 100 м), далее идет толща чередования туфопесчаников и лав дацитового состава (до 250 м) и лав андезитов и андезибазальтов (до 200 м). Восточнее в бассейне р. Чучкур в основании разреза КС обнажаются андезитовые порфириты (мощность до 55 м), выше которых залегают конгломераты с прослоями песчаников и лавы дацитов, андезидацитов (до 450 м). Раннепермский, сакмарско-артинский возраст пород КС определяется на основании находок отпечатков Walchia sp. и следов Amphisauroides (Auxipex) minor (Heyler et Lessertiseur). Гипабиссальные образования КК представлены дайками и штокообразными телами гранит- и фельзит-порфиров (рис. 1). Ранненепермский возраст пород определяется с учетом прорыва ими эффузивов КС и находок их гальки в базальных слоях гималдыкской свиты (верхи ранней перми) [Семенуха и др., 2009].

Фактический материал и методы исследования

Фактическим материалом явилась коллекция образцов 2017 и 2019 гг. из объектов КС и КК (бассейны рек Аксаут и Чучкур). Аналитические работы выполнены в ЦКП «ИГЕМ-Аналитика» (рентгено-флуоресцентный метод (*XRF*) на спектрометре «Респект-100» и методом спектроскопии с индукционно – связанной плазмой (*ICP-MS*) на масс-спектрометре X-Series II). Точность анализов контролировалась российскими и международными стандартами. При построении диаграмм применялись силикатные анализы из отчетов 80-х годов XX века лаборатории петрографии ИГЕМ РАН.

Полученные результаты. Изученные субвулканические и эффузивные породы, представлены андезибазальтами, андезитами, дацитами, риодацитами, и их умеренно щелочными аналогами.

Андезибазальты, трахиандезибазальты, андезиты. Структура пород порфировая. Вкрапленники представлены плагиоклазом и реже амфиболом. Плагиоклаз (андезин, лабрадор-андезин) образует кристаллы, среди которых отмечены: ситовидные, с включениями стекла; деанортизированные и альбитизированные разновидности. Редкие кристаллы амфибола замещены и диагностируются по кристаллографическим очертаниям. Иногда встречается замещенный хлоритом пироксен,

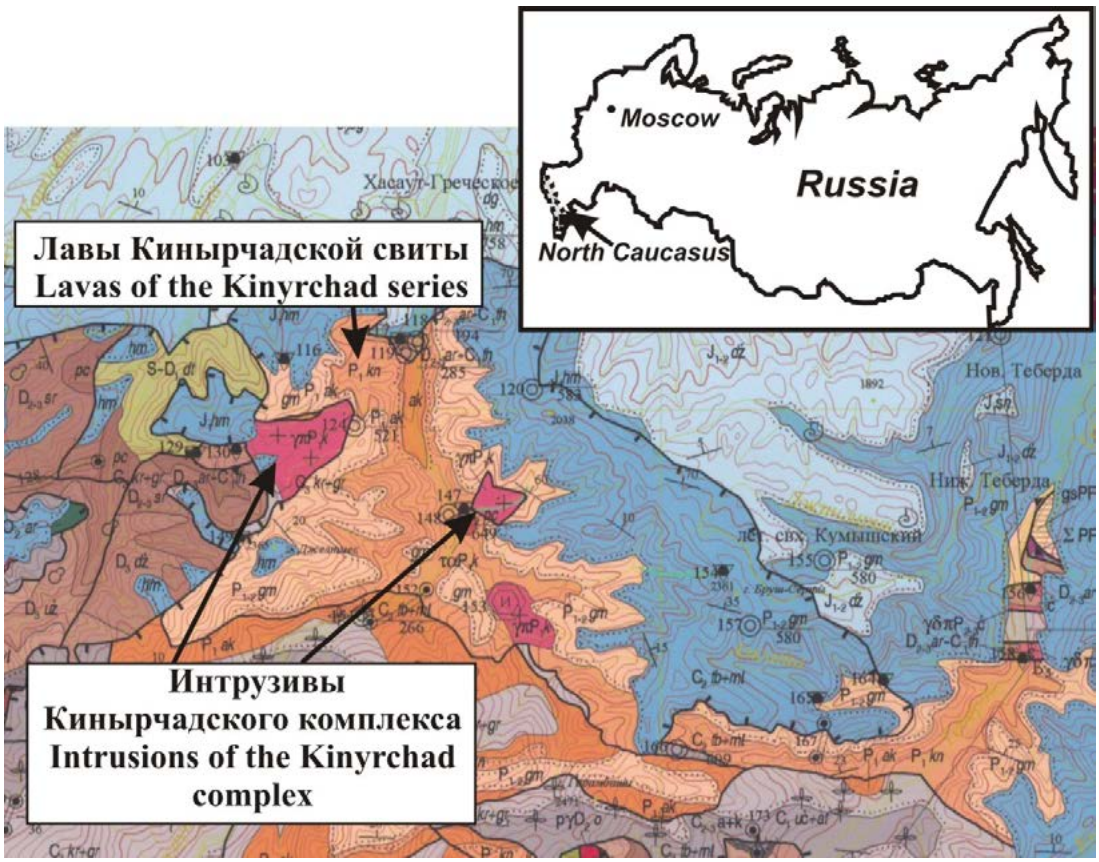
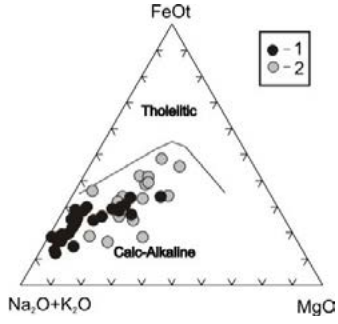
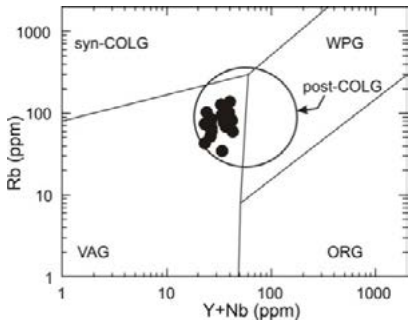


Рис. 1. Геологическая карта с раннепермскими отложениями и гипабиссальными интрузивами Кинырчатского комплекса р. Аксаут (материалы ФГУГП «Кавказгеолсъемка» листы К-37- VI, XII 2009 г.) /
Fig. 1. Geological map with Early Permian sediments and hypabyssal intrusions of the Kinyrchatsky complex. Aksaut (based on the materials of FSUE "Kavkazgeolsmyemka" sheets K-37-VI, XII 2009)

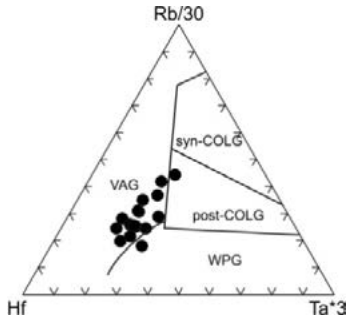
$Na_2O+K_2O) – SiO_2$



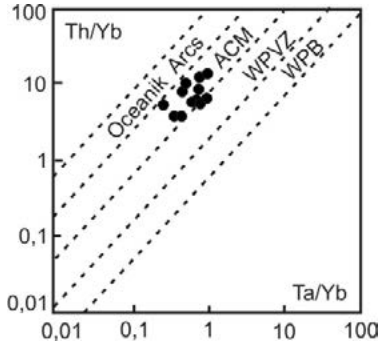
$(Na_2O+K_2O) – FeOt-MgO$



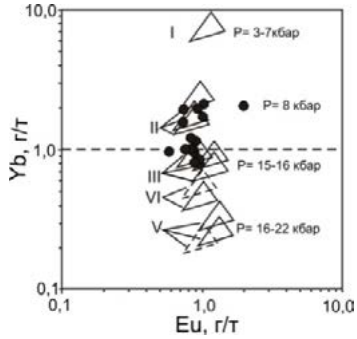
Rb- (Y+Nb)



Rb/30 – Hf – Ta×3



Th/Yb – Ta/Yb



Yb -Eu

Рис. 2. Составы пород на классификационных и петрогенетических диаграммах. Условные обозначения: 1 – RFA (ЦКП «ИГЕМ-Аналитика»); 2 – силикатные анализы из тематических отчетов. На диаграмме (Na^2O+K2O) – FeOt-MgO: tholeitic – толеитовые; calk-alkaline – известково-щелочные. На диаграмме Rb- (Y+Nb): syn-COLG – синколлизионные граниты; WPG – внутриплитные граниты; post-COLG – постколлизионные граниты; VAG – граниты вулканических дуг; ORG – граниты океанических хребтов. На диаграмме Rb/30 – Hf – Ta×3: syn-COLG – синколлизионные граниты; post-COLG – постколлизионные граниты; WPG – внутриплитные граниты. На диаграмме Th/Yb – Ta/Yb: Oceanic arcs – океанические дуги; ACM – активные континентальные окраины; WPVZ – внутриплитные вулканические зоны; WPB – базальты внутриплитные. На диаграмме Yb – (Yb -Eu): P – давление в кбар /

Fig. 2. Composition of rocks on classification and petrogenetic diagrams. Legend: 1 – RFA (SCC"IGEM-Analitika"); 2 – silicate analyses from thematic reports. On the (Na_2O+K_2O) – FeOt-MgOdiagram: tholeitic; calk-alkaline. On the Rb- (Y+Nb) diagram: syn-COLG – syn-collision granites; WPG – intraplate granites; post-COLG – post-collision granites; VAG – granites of volcanic arcs; ORG – granites of oceanic ridges. On the diagram Rb/30 – Hf – Ta×3: syn-COLG – syn-collision granites; post-COLG – post-collision granites; WPG – intraplate granites. On the diagram Th/Yb – Ta/Yb: Oceanic arcs; ACM – active continental margins; WPVZ – intraplate volcanic zones; WPB – intraplate basalts. On the diagram Yb – (Yb -Eu): P – pressure in kbar

а в трахиандезитах калиевый полевой шпат (КПШ). Основная масса (ОМ) сложена плагиоклазом, рудным минералом, хлоритом, карбонатом, редко сфеном, КПШ и кварцем. ***Дациты, трахидациты, риодациты.*** Структура пород сериально- и гломеропорфировая. Во вкрапленниках представлены плагиоклаз (олигоклаз – андезин), кварц и биотит. Иногда отмечается плагиоклаз с ситовидным ядром и реликты амфибола. ОМ состоит из кварца, плагиоклаза, рудного минерала, иногда с новообразованиями КПШ, эпидота, карбоната, серицита и халцедона. ***Гранит порфиры и кварцевые диорит порфиры***. Структура пород порфировая, иногда аплитовидная. Вкрапленники представлены альбитизированным плагиоклазом, КПШ, кварцем и биотитом. В кварцевых диоритах появляется роговая обманка замещающаяся хлоритом. ОМ аллотриаморфная, кварц – полевошпат – серицитовая.

На классификационной диаграмме $(Na_2O+K_2O) – SiO_2$ (рис. 2) фигуративные точки (ФТ) составов пород приурочены к области нормально щелочных и, реже, умеренно щелочных пород (от андезибазальтов до риодацитов). На AFM диаграмме они группируются вдоль трендов дифференциации пород известково-щелочных серий. На диаграммах SiO_2 – петрогенные элементы (рис. 3) отчетливо выделяется отрицательная корреляционная связь между TiO_2, Al_2O_3, MgO и положительная кор-

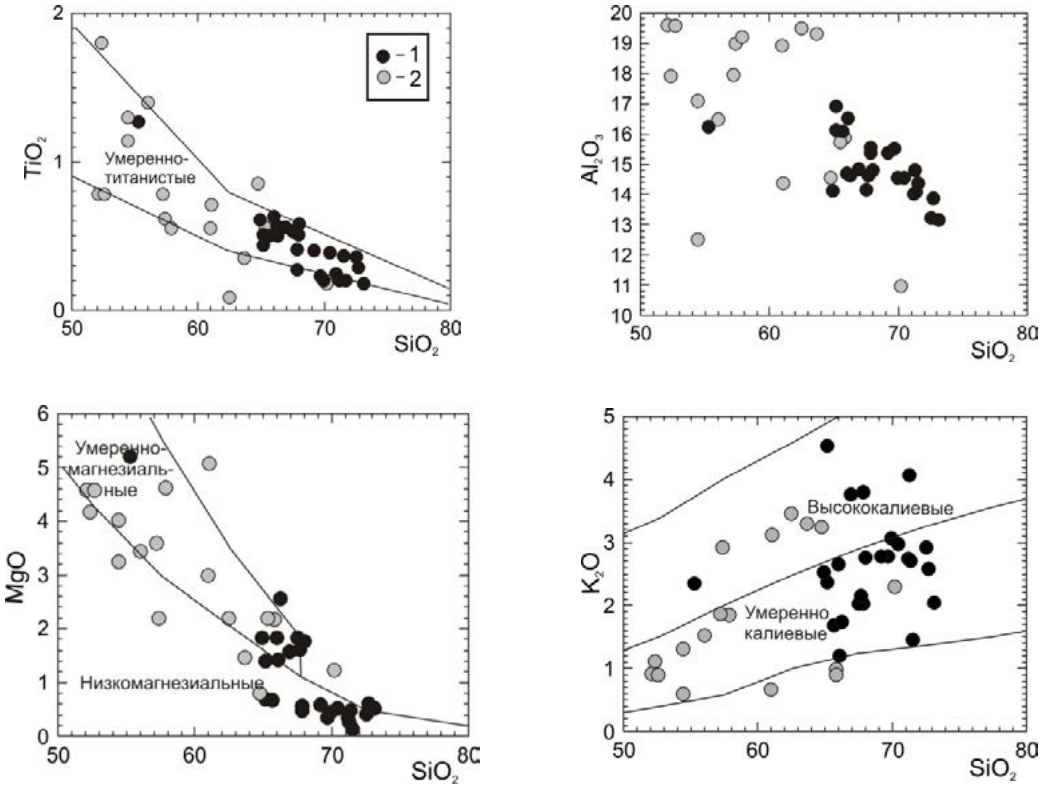


Рис. 3. Диаграммы концентраций петрогенных компонентов (в мас. %). Примечание – перевод надписей на диаграммах с русского языка на английский и наоборот: На диаграмме $TiO_2 – SiO_2$ умеренно титанистые – moderately titanium. MgO- SiO_2 умеренно магнезиальные – moderately magnesium, низкомагнезиальные – low-magnesium $K_2O – SiO_2$: высококалиевые – high-potassium; умереннокалиевые – moderate potassium /

Fig. 3. Diagrams of petrogenic components concentration (in weight percents). Note – translation of the inscriptions on the diagrams from Russian into English and vice versa: On the $TiO_2 – SiO_2$ diagram – moderately titanium. MgO- SiO2 moderately magnesium, low-magnesium $K_2O – SiO_2$: high-potassium; moderate potassium

Таблица 1 / Table 1

Результаты RFA раннепермских пород (оксиды в весовых %; элементы в г/т) / RFA results for Early Permian rocks (oxides in wt%; elements in g/t)

№ Обр. / Sample number	24	27	30	32	31	29	34	33	78	87	90
SiO_2	69,95	71,36	72,67	69,7	66,08	65,64	65,18	55,29	64,89	69,21	66,26
TiO_2	0,2	0,21	0,29	0,23	0,53	0,5	0,51	1,27	0,61	0,4	0,57
Al_2O_3	14,56	14,09	13,86	15,51	16,52	16,08	16,13	16,24	14,13	15,37	14,62
Fe_2O_3	1,46	2,95	2,82	1,92	4,1	3,76	3,36	7,4	3,69	2,82	3,78
MnO	0,06	0,04	0,03	0,05	0,02	0,06	0,06	0,12	0,08	0,02	0,08
MgO	0,45	0,48	0,61	0,35	1,42	0,68	0,7	5,2	1,83	0,58	2,57
CaO	2,42	1,65	0,45	2,02	0,69	2,19	2,87	6,21	3,88	0,92	1,94
Na_2O	3,62	2,64	4,9	3,42	6,51	5,19	3,99	4,1	2,6	6,43	3,83
K_2O	3,06	2,7	2,58	2,78	1,2	1,68	2,36	2,35	2,53	2,77	1,74
P_2O_5	0,1	0,09	0,1	0,12	0,14	0,12	0,19	0,6	0,13	0,1	0,11
ппп	3,93	3,69	1,51	3,78	2,64	3,97	4,54	0,9	5,52	1,16	4,21
Сумма / Sum	99,81	99,90	99,82	99,88	99,85	99,87	99,89	99,68	99,89	99,78	99,71
Cr	16	п.о./ld	12	п.о./ld	44	26	п.о./ld	163	17	12	23
V	17	п.о./ld	27	14	55	46	21	124	78	38	75
Ni	п.о./ld	п.о./ld	10	6	19	16	п.о./ld	103	п.о./ld	13	25
Cu	п.о./ld	п.о./ld	п.о./ld	п.о./ld	п.о./ld	п.о./ld	21	29	п.о./ld	15	3
Zn	48	68	55	35	66	46	58	94	42	45	59
Pb	11	14	17	12	16	<10	12	19	12	25	п. о. / ld
Rb	80	73	75	85	43	52	77	59	78	77	68
Sr	154	114	227	120	353	126	153	687	83	309	184
Ba	601	180	555	230	164	237	196	575	186	643	223
Nb	13	13	12	13	9	10	11	17	10	11	8
Zr	196	222	151	211	190	191	218	278	188	209	200
Y	12	11	11	14	14	16	14	26	25	24	29
Mg#	0,33	0,24	0,29	0,26	0,40	0,26	0,29	0,58	0,49	0,28	0,57
A/CNK	1,6	1,5	1,7	1,8	1,9	1,6	1,7	1,3	1,5	1,5	1,9

Примечание: 29, 31, 78, 90 дациты; 24, *30, 87 риодациты; 27, 32, 34 гранит порфиры; 33 трахиандезибазальт; п. о. – предел обнаружения. / Note: 29, 31, 78, 90 dacites;* 24, *30, 87 rhyodacites; 27, 32, 34 granite porphyry; 33 trachyandesitebasalt; ld – limit of detection.*

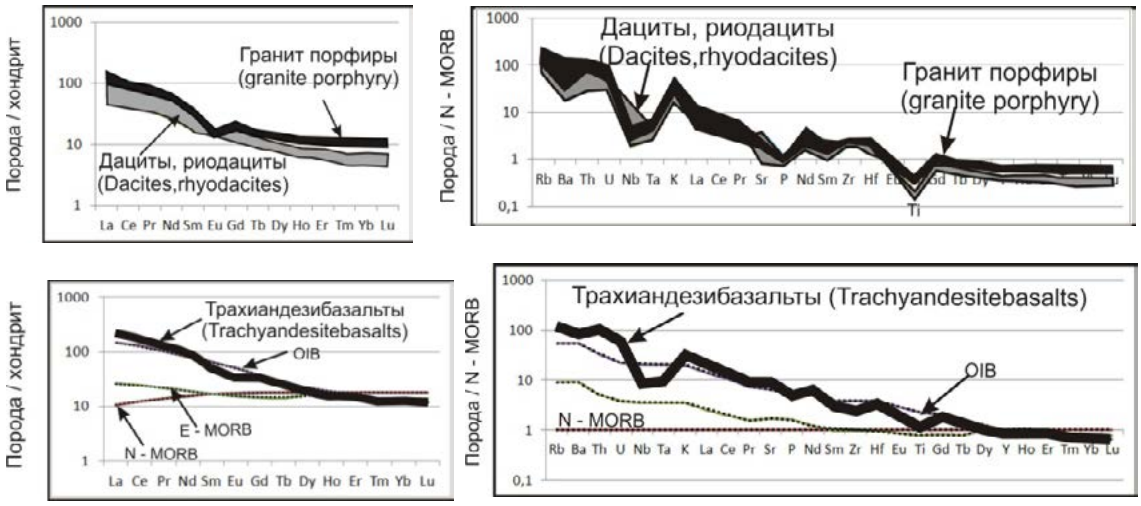


Рис. 4. Спайдер-диаграммы составов пород. Концентрации несовместимых элементов нормированы по N-MORB, концентрации REE – к хондриту по [San, McDonough, 1989] /
Fig. 4. Compositions of rocks on spider diagrams. Concentrations of incompatible elements normalized to N-MORB, REE concentrations normalized to chondrite according to [San, McDonough, 1989]

реляционная связь между K_2O и SiO_2. Это умеренно титанистые, умеренно и низко магнезиальные $Mg^{\#}$ *0,22-0,58*, умеренно и до высоко калиевых пород с калиево-натровым и реже натровым Na_2O/K_2O 0,5-5,4 (Σ/n=1,97) типом щелочности (табл. 1). Согласно классификации Л. В. Таусона породы КК относятся к гранитоидам андезитового ряда (*K/Rb*=267; *Ba/Rb*=4,4). На дискриминационных диаграммах (ДД) *Rb– (Y+Nb)* [Pearce et al., 1984; Pearce, 1996], *Rb/30 – Hf – Ta×3* [Harris et al., 1986.]

Таблица 2 / Table 2

Результаты ISP-MS раннепермских пород / ISP-MS results of Early Permian rocks

Элементы (в г/т) / Elements (in g/t)	Номера проб / Sample number										
	24	27	29	30	31	32	33	34	78	87	90
Be	2,08	2,01	1,09	1,62	0,90	2,16	2,9	1,78	1,85	2,13	1,68
Sc	1,69	1,83	3,50	1,88	4,41	0,69	20	1,59	7,25	4,68	6,22
Ti	1148	1246	2585	1564	2895	1138	8549	2085	3395	2183	2650
V	53,5	11,21	92,4	20,72	92,4	10,26	96	74,6	113	93,2	120
Mn	478	308	465	224	205	305	1125	464	724	237	705
Co	2,96	3,23	7,25	3,62	8,67	1,57	29	5,11	8,30	5,27	13,7
Ni	3,32	0,09	14,1	5,40	18,3	2,18	116	4,47	8,40	9,27	20,9
Cu	8,36	5,17	15,4	11,61	13,0	7,28	38	30,1	9,89	23,2	10,8
Zn	48,5	62,85	45,0	47,59	64,6	29,98	98	63,2	47,2	45,4	58,5
Ga	16,2	18,60	17,7	15,16	18,5	16,51	23	20,5	18,4	16,0	16,7
Rb	77,0	72,56	50,8	70,51	41,4	78,31	69	82,3	80,4	75,0	64,1
Sr	158	108	125	220	372	107	832	159	76,2	326	184
Y	10,3	11,21	11,1	8,89	10,6	9,93	24	10,5	19,2	18,2	19,1
Nb	8,12	10,98	4,35	7,93	5,32	7,55	19,9	6,62	8,20	8,93	5,15
Mo	0,39	0,33	0,51	0,51	0,69	0,59	2,4	0,67	0,23	0,28	0,20
Cd	0,04	0,15	0,04	0,09	0,02	0,14	0,13	0,08	0,02	0,06	0,05
Cs	2,79	4,47	2,15	2,49	1,97	2,22	1,27	3,04	4,77	1,61	8,61
Sb	3,4	-	1,92	-	1,6	-	-	0,89	3,85	1,89	19,5
Ba	492	145,4	193	481,2	111	162,2	549	184	198	579	179
La	28,3	29,91	14,2	16,47	15,3	21,25	52	18,1	28,3	23,8	9,85
Ce	54,1	57,26	29,9	30,49	29,8	42,76	107	37,4	55,5	57,2	23,7
Pr	5,64	6,49	3,31	3,38	3,24	4,50	12	4,00	6,52	6,36	3,15
Nd	19,1	22,53	12,2	11,80	12,2	15,86	45	14,7	22,5	24,2	12,4
Sm	3,56	3,88	2,56	2,13	2,31	2,76	7,8	2,78	4,32	4,48	3,22
Eu	0,98	0,91	0,86	0,57	0,74	0,77	1,99	0,93	0,95	0,81	0,73
Gd	3,27	3,30	2,48	1,99	2,21	2,47	6,7	2,53	4,02	3,93	3,42
Tb	0,39	0,44	0,38	0,3	0,31	0,35	0,92	0,40	0,63	0,63	0,55
Dy	2,07	2,34	1,90	1,70	1,80	1,91	4,8	1,97	3,29	3,11	3,12
Ho	0,38	0,44	0,39	0,31	0,36	0,35	0,87	0,36	0,71	0,62	0,64
Er	0,98	1,26	1,18	0,95	1,00	1,05	2,5	0,94	2,12	1,78	1,95
Tm	0,13	0,168	0,17	0,135	0,15	0,155	0,32	0,12	0,30	0,23	0,28
Yb	0,79	1,15	1,03	0,97	0,98	1,03	2,1	0,80	1,84	1,60	1,78
Lu	0,13	0,155	0,15	0,148	0,15	0,15	0,31	0,11	0,28	0,25	0,27
Hf	2,69	4,90	3,23	3,42	3,07	4,04	6,7	1,80	2,13	2,57	2,95
Ta	0,58	0,76	0,36	0,79	0,41	0,63	1,24	0,55	0,76	0,77	0,43
W	0,44	2,60	1,21	2,28	2,48	1,06	1,07	1,25	1,08	1,60	0,35
Pb	9,64	9,82	7,18	13,96	11,1	9,01	30	10,3	13,9	21,6	4,64
Th	8,85	9,38	3,88	5,77	3,73	5,93	12,1	4,77	13,4	16,0	9,97
U	1,81	2,53	1,69	2,51	1,60	2,17	2,8	2,07	3,11	4,0	2,43

(рис. 2) ФТ пород КС и КК сгруппированы в поле (*VAG*) – гранитов вулканических дуг. На ДД *Th/Yb – Ta/Yb* [Pearce, 1983; Gorton, Schandl, 2000] ФТ расположены в поле *ACM* – активных континентальных окраин (АКО). Сопоставление пород КК с петро-геохимической систематикой гранитоидов показывает, что они обладают чертами как *S-type* (*A/CNK*=1,6; *Zr*=211 г/т; *Ce+Zr+Y*=265 г/т; *CaO*=1,7%; *Nb*=12 г/т), так и *I-type* (*Rb/Sr*=0,3; *Sr*=223 г/т; *Rb/Ba*=0,32) гранитов. На ДД *Yb – Eu* [Туркина, 2000] ФТ расположены в треугольных областях модельных составов расплавов, образованных в результате дегидратационного плавления источников *TH*1, *TH*2 и *MORB* типа, при давлении от 8 до 15-16 кбар. Спектры редких земель в породах (рис. 4) нормированные к хондриту [San, McDonough, 1989] показывают повышенное содержание *REE* и их фракционирование с обогащением легкими *LREE*.

Спектр *REE* трахиандезибазальтов практически совпадает со спектром базальтов *OIB* – океанических островов и сопоставимых с ними базальтов континентальных рифтов и континентальных платобазальтов [Туркина, 2014]. $La^н/Yb^н$ отношение в трахиандезибазальтах равно 17,7; в гранитоидах КК и лавах КС р. Аксаут оно варьирует от 8,8 до 25,9; в лавах КС р. Чучкур от 3,9 до 14,1. Соответственно: $La^н/Sm^н$ =4,3; 3,8-5,1; 1,9-4,0. $Gd^н/Yb^н$=2,6; 1,6-3,4; 1,4-2,1. $\sum REE$ г/т=244; 70-130; 65-130. Количественный дефицит европия Eu/Eu^* $(Eu^*= (Sm_n+Gd_n)/2)$ составляет в: трахиандезибазальтах 0,82; в гранитоидах и лавах р. Аксаут 0,76-1,05; в лавах р. Чучкур 0,53-0,71. Концентрации несовместимых элементов (табл. 2) в породах КС и КК нормированных к *N-MORB* свидетельствуют о существенном их обогащении *LILE* и обеднении *HREE*, также наблюдаются характерные негативные аномалии *Nb, Ta, P, Ti*.

Особенности геохимической специализации пород отражены следующими ранжированными рядами кларков концентрации (*Кк>1,1*). Трахиандезибазальт $\mathbf{Sb}_{21}$, $\mathbf{Nb}_{2,8}$, $\mathbf{Ce}_{2,6}$, $\mathbf{Hf}_{2,2}$, $Ni_{1,9}$, $Mo_{1,8}$, $\mathbf{Sr}_{1,8}$, $\mathbf{Pb}_{1,8}$, $Be_{1,6}$, $\mathbf{Th}_{1,5}$, $U_{1,4}$, $Li_{1,3}$, $Sc_{1,3}$, $Ba_{1,3}$, $\mathbf{Zr}_{1,2}$, $\mathbf{Ta}_{1,2}$, $\mathbf{Zn}_{1,3}$, $Ga_{1,2}$. Гранит- и фельзит-порфиры $\mathbf{Sb}_{11}$ ($Zn_{0,9}$ $Pb_{0,4}$ $Cu_{0,4}$ $Ba_{0,3}$). Дациты, риодациты $\mathbf{Sb}_{20}$ $Ni_{1,1}$ ($Zn_{0,9}$ $Ba_{0,7}$ $Pb_{0,6}$ $Cu_{0,4}$). Их сравнение с петрогеохимическими типами пород разных геодинамических обстановок показывает, что трахиандезибазальты сопоставимы с породами вулкано-плутонических поясов тыловых рифтов АКО. Кислые породы сопоставимы с породами краевых вулкано-плутонических поясов АКО.

Результаты работы и их обсуждение

Зона ПХ БК, на рубеже среднего-верхнего палеозоя представляла собой покровно-складчатое сооружение, состоящее из разнообразных аллохтонных, окраинно-морских и островодужных структурно – вещественных комплексов [Омельченко, 2021; Газеев, Гурбанов, 2020]. Изученные вулканиты, залегающие в раннепермской молассе, представлены нормально и умеренно щелочными эффузивами и комагматичными им субинтрузиями. Изучение мультиэлементных и *REE* спектров пород показало, что трахиандезибазальты близки к базальтам *OIB* и базальтам континентальных рифтов. Умеренная магнезиальность $Mg^{\#}$=0,58 и величины отношения *REE: Sm/Yb*=3,1; La/Sm=6,6 позволяют предполагать, что они являются производными эволюционировавшего расплава, образовавшегося при плавлении перидотитов. Кислые породы близки к модельным составам расплавов образующихся при дегидратационном плавлении источников *TH1, TH2, MORB* типа. Наличие в вулканитах кристаллов плагиоклаза с ситовидными ядрами, содержащими вклю-

чения стекла является, вероятнее всего, признаком их роста при декомпрессии и сопровождающей ее дегазации [*Kuritani*, 1999]. По геохимической классификации субвулканические породы КК отнесены к гранитам андезитового ряда. В соответствии с палеотектоническими реконструкциями, граниты этого типа являются составной частью палео-островных дуг; они обычно проявлены в их тыловых частях, расположенных на континентальной окраине [Туркина, 2014]. Признаки гранитов *S-type* кислых пород КС и КК указывают на возможное их образование при плавлении метаосадочных пород [Лучицкая, 2014], которое происходило при участии трахиандезитового расплава. Можно констатировать, что изученные породы несут в себе «смешанные» петро-геохимические характеристики. Это, скорее всего, указывает на гетерогенную природу их магмагенерирующих источников. Одними из них, несомненно, являлись коровые континентальные образования варисцийского основания зоны ПХ БК, другие – мантийные резервуары с *OIB* и возможно *MORB*-подобными характеристиками вещества. Отметим, что подобные петро-геохимические особенности пород известны: в ряде неоген-четвертичных магматических ассоциаций Кавказа [Лебедев и др., 2009; Бубнов и др., 2016]; в четвертичных вулканитах южной части Срединного хребта Камчатки [Волынец и др., 2018]; в среднемиоценовых вулканитах грабена Симане о-ва Хонсю [Miyake, 1994; Федоров, 2006] и др.

Раннепермские вулканиты характеризуются повышенными содержаниями сурьмы (*Кк Sb 11-21),* и с ними ассоциируют различные рудопроявления и месторождения. В долине р. Кышкыт (правый приток р. Аксаут) вещественный состав руд ряда рудопроявлений представлен киноварью, метацинобаритом, пиритом, галенитом, халькопиритом, блеклыми рудами, реальгаром, аурипигментом. Здесь же отмечены проявления урана и золота. [Родзянко и др., 1971]. В бассейне р. Чучкур (левый приток р. Худес) в метасоматических породах развитых в эффузивах КС, известно «Чучкурское» золото-сульфидное месторождение. В составе рудных минералов установлены: пирит, арсенопирит, золото, серебро, блеклые руды, сфалерит, халькопирит и галенит [Богуш, 1995]. Предполагается, что повышенное содержание благородных металлов Чучкурского месторождения [Богуш и др., 2020] связано с флюидоактивной зоной пермского палеовулкана и обусловлено мобилизацией *Au, Pt, Pd* из девонской черносланцевой толщи.

Выводы

Изучены петрохимические и геохимические особенности раннепермских эффузивных и субинтрузивных образований ПХ БК. На основании анализа дискриминационных и спайдер-диаграмм показано, что вулканиты следует считать сложными образованиями, геохимические характеристики которых несут признаки как надсубдукционной (краевой вулкано-плутонический пояс на СП), так и тыловой рифтовой обстановки. Установлено, что изученные субвулканические образования имеют «смешанные» геохимические характеристики, обладая чертами как S-type так и I-type гранитов. Полученные данные по вещественному составу изученных пород указывают на их гетерогенную природу при участии в их генезисе как коровых, так и мантийных источников вещества. Отмечено, что для раннепермских вулканитов характерны повышенные концентрации сурьмы и с ними ассоциирует золото – сульфидное, сурьмяно-ртутное и урановое оруденение.

Литература

1. Богуш И. Я. Золотоносные березиты на Северном Кавказе. // Доклады АН РФ. – 1995. – Т. 342. № 2. – С. 205-208.

2. Богуш И. А., Рябов Г. В., Черкашин В. И. Генезис и рудоносные структуры Чучкурского месторождения благородных металлов Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 1. – С. 81-95.

3. Бубнов С. Н., Докучаев А. Я., Курчавов А. М. и др. Плиоценовые игнимбриты Большого Кавказа: вещественный состав и источники расплавов. // Науки о Земле. – 2016. – Вып. 2. – С. 12-51.

4. Волынец А. О., Певзнер М. М., Толстых М. Л. и др. Вулканизм южной части Срединного хребта Камчатки в неоген-четвертичное время. // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. № 12. – С. 1979-1996.

5. Газеев В. М., Гурбанов А. Г. Раннепалеозойские габброиды архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ): геодинамическая типизация и минерагения. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 3. – С. 6-22.

6. Гусев Г. С., Кудрявцев Ю. К., Гущин А. В. и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.

7. Лебедев В. А., Бубнов С. Н., Чернышев И. В. и др. Геохронология и петрогенезис молодых (плиоценовых) гранитоидов Большого Кавказа: Джимарский полифазный массив, Казбекская неовулканическая область. // Геохимия. – 2009. – № 6. – С. 582-602.

8. Лучицкая М. В. Гранитоидный магматизм и становление континентальной коры северного обрамления Тихого океана в мезозое-кайнозое. – М.: ГЕОС, 2014. – 360 с.

9. 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.

10. Омельченко В. Л. Офиолиты Северного Кавказа и некоторые проблемы геологии его древних комплексов. – Ессентуки, 2021. – 167 с.

11. Родзянко Н. Г., Джумайло В. И., Савин С. В., и др. Геология и геохимия Центральной части Северного Кавказа (Эндогенные месторождения). – РнД.: Изд. Ростовского ун-та, 1971. – 204 с.

12. Семенуха И. Н., Черных В. И., Соколов М. Г., и др. Объяснительная записка, листы К-37-VI, К-37-XII (Карачаевск), серия кавказская, второе издание. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. – 204 с.

13. Туркина О. М. Модельные геохимические типы тоналит-трондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты. // Геохимия. – 2000. – № 7. – С. 704-717.

14. Туркина О. М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. – 118 с.

15. Федоров П. И. Кайнозойский вулканизм в зонах растяжения на восточной окраине Азии. // Тр. ГИН РАН. – 2006. – Вып. 537. – 316 с.

16. 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.

17. Harris N. B. W., Pearce J. A., Tindle A. G. Geochemical characteristics of collision – zone magmatism. // Coward M. P., Ries A. C. (Eds) Collisions. Geol. Soc. Spec. Pub. – 1986. – Vol. 19. – pp. 67-81.

18. 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.

19. Miyake Y. Geochemistry of igneous rocks of Shimane peninsula, formed within a Miocene back-arc rifting zone at the Japan sea margin. // Geochem. J. – 1994. – Vol. 28. – pp. 451-472.

20. Pearce J. A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. // Continental basalts and mantle xenoliths. / Eds. C. J. Hawkesworth, M. J. Norry. Shiva Press, Nantwich, U. K. – 1983. – pp. 230-249.

21. Pearce J.A., Harris N.B. W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. // J. Petrol. – 1984. – Vol. 25. – pp. 956-983.

22. Pearce J.A. Sources and settings of granitic rocks. // Episodes. – 1996. – Vol. 19. No. 4. – pp. 120-125.

23. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // Geol. Spec. Publ. – 1989. – No. 42. – pp. 313-345.

References

1. Bogush I.Ya. Gold-bearing beresites in the North Caucasus. Doklady Akademii Nauk of the Russian Federation. 1995. Vol. 342. No. 2. pp. 205-208. (In Russ.)

2. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Genesis and ore-bearing structures of the Chuchukur noble metals deposit of the North Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 81-95. (In Russ.).

3. Bubnov S.N., Dokuchaev A.Ya., Kurchavov A.M. et al. Pliocene ignimbrites of the Greater Caucasus: material composition and sources of melts. Earth Sciences. 2016. Issue. 2. pp. 12-51. (In Russ.)

4. Volynets A.O., Pevzner M.M., Tolstykh M.L. et al. Volcanism of the southern part of the Sredinny Ridge of Kamchatka in the Neogene-Quaternary. Geology and geophysics. 2018. Vol. 59. No. 12. pp. 1979-1996. (In Russ.)

5. 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. (In Russ.)

6. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V. Geochemical and metallogenic specialization of structural-material complexes. Saint Petersburg, VSEGEI. 1999. 514 p. (In Russ.)

7. Lebedev V.A., Bubnov S.N., Chernyshev I.V. et al. Geochronology and petrogenesis of young (Pliocene) granitoids of the Greater Caucasus: Dzhimara polyphase massif, Kazbek neovolcanic region. Geochemistry. 2009. No. 6. pp. 582-602. (In Russ.)

8. Luchitskaya M.V. Granitoid magmatism and formation of the continental crust of the northern rim of the Pacific Ocean in the Mesozoic-Cenozoic. Moscow. GEOS. 2014. 360 p. (In Russ.)

9. 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. GEOKART. GEOS. 2005. 351 p. (In Russ.)

10. Omelchenko V.L. Ophiolites of the North Caucasus and some problems of the geology of its ancient complexes. Essentuki. 2021. 167 p. (In Russ.)

11. RodziankoN. G., DzhumayloV. I., SavinS. V., et al. Geology and Geochemistry of the Central Part of the North Caucasus (Endogenic Deposits). Rostov-on-Don. Rostov University. 1971. 204 p. (In Russ.)

12. Semenukha I.N., Chernykh V.I., Sokolov M.G., et al. Explanatory note, sheets K-37-VI, K-37-XII (Karachaevsk), Caucasian series, second edition. Saint Petersburg, VSEGEI, 2009. 204 p. (In Russ.)

13. Turkina O.M. Model geochemical types of tonalite-trondhjemite melts and their natural equivalents. Geochemistry. 2000. No. 7. pp. 704-717. (In Russ.)

14. Turkina O.M. Lectures on the geochemistry of magmatic and metamorphic processes. Novosibirsk, RIC NSU. 2014. 118 p. (In Russ.)

15. Fedorov P.I. Cenozoic volcanism in stretch zones on the eastern margin of Asia. In: Proceedings of GIN RAS. 2006. Issue 537. 316 p. (In Russ.)

16. 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.

17. Harris N. B. W., Pearce J. A., Tindle A. G. Geochemical characteristics of collision – zone magmatism. M. P. Coward, A. C. Ries (Eds) Collisions. Geol. Soc. Spec. Pub. 1986. Vol. 19. pp. 67-81.

18. 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.

19. Miyake Y. Geochemistry of igneous rocks of Shimane peninsula, formed within a Miocene back-arc rifting zone at the Japan sea margin. Geochem. J. 1994. Vol. 28. pp. 451-472.

20. Pearce J. A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. Continental basalts and mantle xenoliths. / Hawkesworth C. J., Norry M. J. (Eds) Shiva Press, Nantwich, U. K. 1983. pp. 230-249.

21. Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrol. 1984. Vol. 25. pp. 956-983.

22. Pearce J. A. Sources and settings of granitic rocks. Episodes. 1996. Vol. 19. No. 4. pp. 120-125.

23. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. Geol. Spec. Publ. 1989. No. 42. pp. 313-345.

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.4+504.4.054
DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002

Оригинальная статья

Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области)

В. Е. Закруткин, Е. В. Гибков, В. Н. Решетняк

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

Статья поступила: 02.02.2022, доработана: 21.02.2022, одобрена в печать: 01.03. 2022

Резюме: Актуальность работы. Восточный Донбасс – региональная природно-техногенная геохимическая аномалия, представляющая собой зону размещения месторождений угля и предприятий угледобывающей промышленности. Традиционно это один из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов Ростовской области и Юга России в целом. Одной из наиболее значимых геоэкологических проблем здесь является деградация малых рек, которые на протяжении многих лет испытывают большое влияние угольной промышленности, в первую очередь техногенных шахтных вод, с которыми в речную сеть ежегодно поступают десятки и сотни тысяч тонн тяжелых металлов, особенно соединений железа и марганца. Как следствие меняется химический состав не только водной толщи, но и донных отложений, происходит преобразование минералогического состава осадков. **Цель исследований** – изучение химического состава и выявление некоторых особенностей минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца. **Методы исследований.** Содержание породообразующих оксидов определяли стандартным методом силикатного анализа. Гранулометрический анализ проб и минеральный состав выделенных фракций изучались традиционными методами. Дальнейшая обработка и интерпретация данных проведена с применением классических геохимических диаграмм. **Результаты исследований.** Установлено, что донные отложения рек бассейна Северского Донца крайне неоднородные с точки зрения гранулометрического, химического и минерального состава. Это песчано-алевритовые, глинистые и слабосортированные осадки. Выявлено, что донные отложения в исследуемом районе формируются за счет совокупного влияния природных и антропогенных факторов. Среди последних определенную роль играют техногенные шахтные воды и продукты физико-химической трансформации породных отвалов в виде техногенного делювия и пролювия. Снижение степени техногенного воздействия в последние годы и обменные процессы в системе «вода – донные отложения» определили низкую степень загрязненности аллювия большинства рек бассейна железом, марганцем и другими металлами. Процессы аутигенного минералообразования, протекающие в стадии диагенеза, способствуют переводу железа и, вероятно, сопутствующих ему металлов в относительно инертные формы. Наиболее ярким примером подобных процессов являются новообразования магнетита за счет гидроокислов железа под восстанавливающим влиянием разлагающегося органического вещества.

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., 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. 12 (1): 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002

Original paper

Chemical composition and certain features of mineral formation in the river sediments of the Seversky Donets River basin (within the Rostov region)

V. E. Zakrutkin, E. V. Gibkov, V. N. Reshetnyak

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

Reseived: 02.02.2022, revised: 21.02.2022, accepted: 01.03.2022

Abstract: Relevance. Eastern Donbass is a regional natural-technogenic geochemical anomaly zone, where coal deposits and coal mining enterprises are located. Historically, this is one of the most environmentally problematic areas of the Rostov region and the South of Russia in general. One of the most significant geoecological problems within this area is the deterioration of small rivers' state, which has been greatly influenced by the coal industry for many years. Primarily it has been influenced by technogenic mine waters carrying tens and hundreds of thousands of tons of heavy metals, especially iron and manganese. As a result, the chemical composition of water column and river sediments has changed, and the mineralogical composition of sediments has transformed. **Aim of research** is to study the chemical composition and reveal certain features of mineral formation in the river sediments of the Seversky Donets River basin. **Methods.** The content of rock-forming oxides was determined by the common method of silicate analysis. The grain size analysis of samples and the mineral composition of the separated fractions were studied by conventional methods. Further data processing and interpretation has carried out using classical geochemical diagrams. **Results.** It has been established that the river sediments of the Seversky Donets River basin are extremely heterogeneous in terms of grain size, chemical and mineral composition. These are sandy-silty, clayey and poorly sorted sediments. It has revealed that river sediments within the study area are formed due to the combined influence of natural and anthropogenic factors. Among the latter, technogenic mine waters and products of the physico-chemical transformation of rock dumps in the form of technogenic talus and proluvium play a specific role. The decrease in the degree of technogenic impact in recent years and the exchange processes in the "water – river sediments" system have determined the low degree of alluvium pollution in the most rivers within the basin with iron, manganese and other metals. The processes of authigenic mineral formation occurring at the stage of diagenesis promote the conversion of iron and, probably, associated metals into relatively inert forms. The most striking example of such processes are neogenesis of magnetite due to reducing effect of decaying organic matter with iron hydroxides as matter supply.

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, https://rscf. ru/project/22-27-00305/ at the Southern Federal University.*

For citation: 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). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002.

Введение

Северский Донец – река общей протяженностью 1053 км – берет свое начало в Белгородской области на Среднерусской возвышенности, по которой и проходит большую часть своего пути. В нижнем течении (примерно треть протяженности) река протекает вдоль Донецкого складчатого сооружения и только ближе к устьевой зоне рассекает дислоцированные породы массива. Последний сложен образованиями каменноугольной, меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем [Погребнов и др., 1985; Мохов, 2021; Давыденко и др., 2021]. Отложения карбона, общей мощностью до 22 км, развиты повсеместно и слагают основание Донецкого складчатого сооружения. Главным образом они представлены терригенно-карбонатной угленосной толщей средне- и верхнекаменноугольного возраста представленной песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами, известняками. Породы карбона содержат запасы высококачественного каменного угля, промышленная разработка которых осуществлялась на протяжении последних двух столетий, что привело к формированию здесь региональной природно-техногенной геохимической аномалии, представляющей собой зону размещения месторождений угля и предприятий угледобывающей промышленности (Восточный Донбасс). Традиционно Восточный Донбасс – это один из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов Ростовской области и Юга России в целом. При этом одной из наиболее значимых геоэкологических проблем здесь является деградация малых рек, которые на протяжении многих лет испытывают большое влияние угольной промышленности, в первую очередь техногенных шахтных вод [Гавришин, 2020; Мохов, 2016], с которыми в речную сеть ежегодно поступают десятки и сотни тысяч тонн тяжелых металлов, особенно соединений железа и марганца. Как следствие меняется химический состав не только водной толщи, но и донных отложений, происходит преобразование минералогического состава осадков. Учитывая, что донные отложения являются одним из важнейших компонентов окружающей среды, отражающей не только состав поверхностных вод, но и совокупность геохимических процессов, протекающих на водосборных площадях, их всестороннее изучение является весьма актуальным.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись донные отложения рек бассейна нижнего течения Северского Донца в пределах Ростовской области (рис. 1). Сеть наблюдательных створов, в которых отбирались пробы донных осадков, была заложена с учетом равномерного охвата водосборной площади главной водной артерии Восточного Донбасса – Северского Донца – и его основных притоков (рр. Кундрючья, Быстрая, Калитва, Лихая, Большая и Малая Каменки, Большая Гнилуша). Опробование в пределах рек, как правило, осуществлялось в верховьях, среднем течении и устьевых участках, однако в некоторых малых реках (Большая Каменка, Быстрая и Большая Гнилуша), вследствие их малой протяженности, исследовались верховья и устьевые участки водотоков. Отбор проб донных отложений проводился 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.

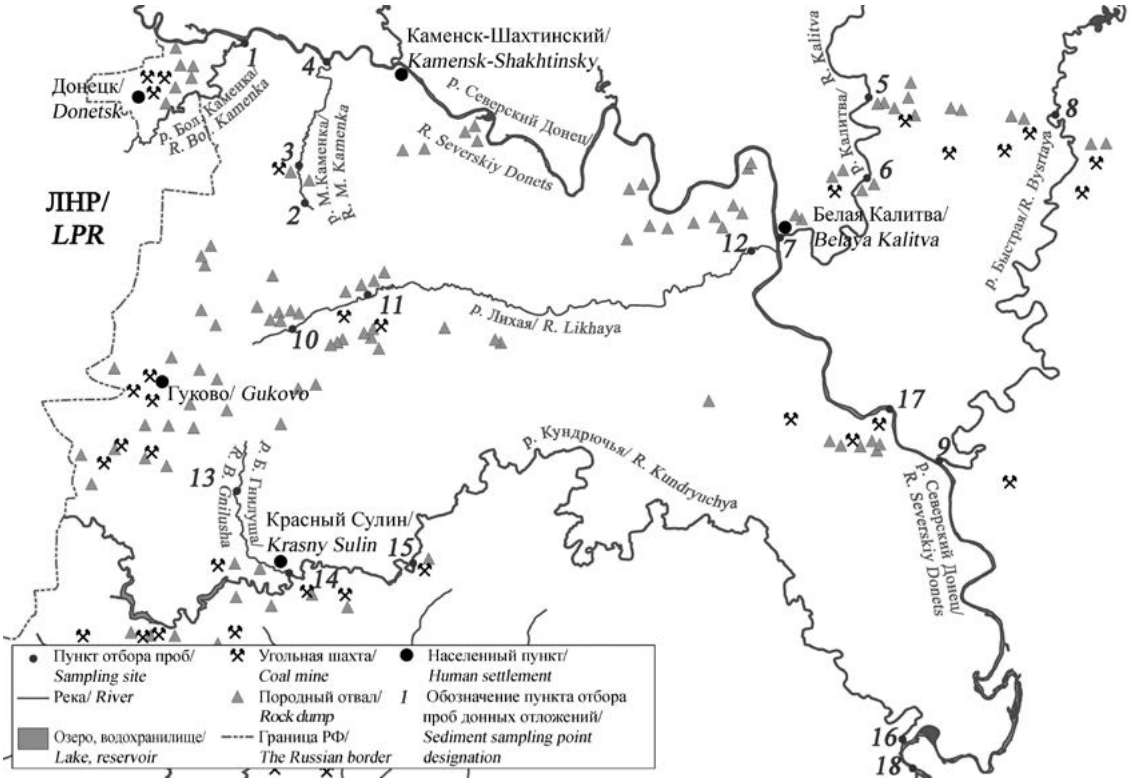


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб донных отложений рек бассейна Северского Донца и основных объектов угледобывающей промышленности /
Fig. 1. Layout of river sediments sampling points and the main objects of the coal mining industry within the Seversky Donets River basin

После морфологического описания отобранные пробы донных осадков высушивались до воздушно-сухого состояния и передавались в лабораторию для определения их гранулометрического, минерального и химического составов. Гранулометрический состав определялся ситовым, пипеточным и комбинированным 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. Содержание породообразующих оксидов определяли традиционным методом силикатного анализа.

Внешне изученный аллювий представляет собой осадки от светло-серого до черного цвета, иногда с коричневатым оттенком. Многие из них имеют полужидкую консистенцию с большим количеством разлагающейся органики современного происхождения (ОСП). С точки зрения гранулометрического состава это илы пелитовой, алевропелитовой и песчаной размерности частиц, а также смешанные слабосортированные осадки (хлидолиты). В малых реках бассейна, как правило, преобладает пелитовая фракция, выход которой варьирует от 25% в устье р. Малая Каменка до 92-93% в верховье Большой Гнилуши и среднем течении р. Лихая. Основная часть этой фракции представлена глинистыми минералами, в подчиненном количестве присутствуют современное органическое вещество, кальцит, чешуйки слюд, угольные частицы, кварц и полевые шпаты. В донных же отложениях более полноводных средних рек и самого Северского Донца резко преобладает песчано-алевритовая фракция, доля которой составляет от 80 до 97%. Основная часть мате-

риала представлена зернами кварца и полевого шпата. В пределах отдельных участков рек в заметном количестве (до 22%) присутствует терригенный обломочный материал в виде частиц песчаника, углистых аргиллитов, алевролитов, карбонатов и кремнистых пород.

В составе тяжелой фракции преобладают ильменит, магнетит с гематитом и гидроокислы железа. В отдельных случаях значительная доля тяжелой фракции приходится на аутигенный пирит. В меньших количествах встречаются карбонаты, представленные сидеритом и кальцитом. К группе второстепенных минералов относятся циркон, рутил, кианит, ставролит, турмалин. Существенно реже встречаются амфиболы, мусковит, биотит, хромит, хромшпинелиды.

Результаты работы и их обсуждение

В таблице 1 показан химический состав донных отложений, а на диаграмме А-К В.Е. Закруткина (рис. 2) демонстрируется их соответствие тому или иному типу терригенных осадочных образований.

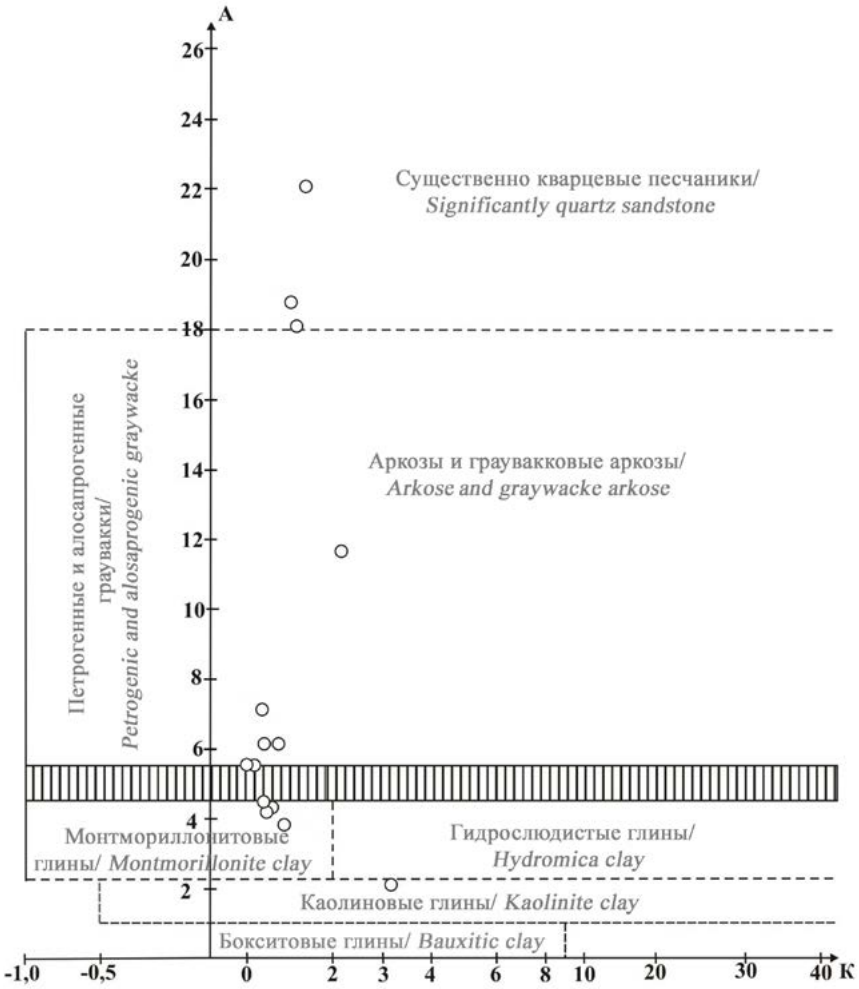


Рис. 2. Фигуративные точки донных отложений рек бассейна Северского Донца на диаграмме А – К, где А – $(SiO_2+Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$, К – $(K_2O – Na_2O)/Na_2O$ [Закруткин, 1982] /
Fig. 2. Imaging points of river sediments of the Seversky Donets River basin in the diagram A – K, where A – $(SiO_2+Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$, K – $(K_2O – Na_2O)/Na_2O$ [Zakrutkin, 1982]

Таблица 1 / Table 1

Химический состав (в %) донных отложений рек бассейна Северского Донца / Chemical composition (%) of river sediments within the Seversky Donets River basin

Река, участок на рисунке 1 / River, section in Fig. 1	Характеристика донных отложений / Characteristics of bottom sediments	Место отбора проб / Sampling location	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO	ППП / PPP	Сумма / The amount
Большая Каменка; 1 / Large Kamenka; 1	Алеврито-пелитовый ил темно-серого цвета, обогащенный ОСП / Silt-pelitic silt of dark gray color, enriched with organics of modern origin (OMO)	Устье / Mouth	59,7	14,2	5,4	3,8	1,4	0,5	0,7	2,0	1,0	0,3	0,1	11,6	100,5
Малая Каменка; 4 / Small Kamenka; 4	Алевролитовый ил светло-серого цвета / Siltstone silt of light gray color	Устье / Mouth	82,5	4,6	1,9	3,2	0,4	0,6	0,4	1,0	0,4	0,1	0,0	4,9	100,0
Малая Каменка; 3 / Small Kamenka; 3	Алеврито-пелитовый ил светло-серого цвета, с частицами каменного угля / Silt-pelitic silt of light gray color, with particles of coal	Средняя часть реки / Middle part of the river	56,6	13,2	5,3	5,4	1,5	0,8	0,7	2,1	1,0	0,2	0,1	13,7	100,5
Малая Каменка; 2 / Small Kamenka; 2	Алеврито-пелитовый ил темно-серого цвета, обогащенный ОСП / Silt-pelitic silt of dark gray color, enriched with OMO	Верховье реки / Upper reaches of the river	65,5	9,4	4,1	5,0	1,0	0,4	0,5	1,5	0,8	0,2	0,1	12,1	100,4
Лихая; 12 / Lichay; 12	Алеврито-пелитовый ил серо-коричневого цвета, обогащенный ОСП / Silt-pelitic silt of gray-brown color, enriched with OMO	Устье / Mouth	53,0	8,9	3,8	13,4	1,3	1,7	0,5	1,5	0,7	0,2	0,1	15,4	100,4
Лихая; 11 / Lichay; 11	Глинистый ил темно-серого цвета, обогащенный ОСП / Clay silt of dark gray color, enriched with OMO	Верховье реки / Upper reaches of the river	46,6	15,9	2,5	7,7	2,2	2,9	0,7	2,1	0,7	0,2	0,3	18,0	99,8

Река, участок на рисунке 1 / River, section in Fig. 1	Характеристика донных отложений / Characteristics of bottom sediments	Место отбора проб / Sampling location	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO	ППП / PPP	Сумма / The amount
Лихая; 10 / Lichay;	Глинистый ил темно-серого цвета, обогащенный ОСП с частицами каменного угля / Clay silt of dark gray color, enriched with OMO with coal particles	Верховье реки / Upper reaches of the river	59,8	11,6	4,8	6,0	1,5	0,9	0,7	1,8	1,0	0,3	0,1	12,0	100,4
Калитва; 7 / Kalitva; 7	Тонкозернистый серый песок, с включениями ОСП / Fine-grained gray sand, with OMO inclusions	Устье / Mouth	84,6	3,9	1,4	3,5	0,4	0,1	0,3	0,8	0,3	0,1	0,0	5,1	100,4
Калитва; 6 / Kalitva; 6	Тонкозернистый светло-серый песок / Fine-grained light gray sand	Средняя часть реки / Middle part of the river	95,1	1,1	0,7	1,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	1,2	100,2
Калитва; 5 / Kalitva; 5	Тонкозернистый светло-серый песок / Fine-grained light gray sand	Верховье реки / Upper reaches of the river	92,6	2,0	0,8	1,7	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,0	0,0	1,9	100,0
Быстрая; 9 / Bystray; 9	Алевролитовый серый ил, содержащий большое количество частиц угля и углистых сланцев / Siltstone gray silt containing a large number of coal particles and carbonaceous shales	Устье / Mouth	71,4	6,2	2,1	1,1	0,4	0,5	0,4	1,3	0,4	0,1	0,0	16,6	100,4
Быстрая; 8 / Bystray; 8	Тонкозернистый светло-серый песок / Fine-grained light gray sand	Верховье реки / Upper reaches of the river	91,5	1,9	0,9	2,4	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,0	2,7	100,1
Кундрючья; 16 / Kundruchy; 16	Алеврито-пелитовый ил серо-коричневого цвета, обогащенный ОСП / Silt-pelitic silt of gray-brown color, enriched with OMO	Устье / Mouth	65,4	11,0	4,2	5,1	1,6	0,8	0,6	1,7	0,8	0,1	0,1	8,8	100,1

Река, участок на рисунке 1 / River, section in Fig. 1	Характеристика донных отложений / Characteristics of bottom sediments	Место отбора проб / Sampling location	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO	ППП / PPP	Сумма / The amount
Кундрючья; 15 / Kundruchy; 15	Алеврито-пелитовый ил темно-серого цвета, обогащенный ОСП / Silt-pelitic silt of dark gray color, enriched with OMO	Средняя часть реки / Middle part of the river	55,0	14,7	5,6	6,5	1,4	1,5	0,7	2,1	0,9	0,2	0,1	11,5	100,3
Большая Гнилуша; 14 / Large Gnilushka; 14	Глинистый ил от темно-серого до черного цвета, обогащенный ОСП / Clay silt from dark gray to black, enriched with OMO	Устье / Mouth	44,2	11,0	11,4	6,7	1,7	2,6	0,6	1,7	0,9	0,3	0,6	18,9	100,5
Большая Гнилуша; 13 / Large Gnilushka; 13	Алеврито-пелитовый ил темно-серого цвета, обогащенный ОСП / Silt-pelitic silt of dark gray color, enriched with OMO	Верховье реки / Upper reaches of the river	58,9	11,0	4,1	7,2	1,5	0,6	0,7	1,8	1,1	0,2	0,2	12,6	100,0
Северский Донец; 18 / Seversky Donec; 18	Среднезернистый светло-серый песок / Medium-grained light gray sand	Устье / Mouth	95,2	0,8	0,4	2,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	1,4	100,5
Северский Донец; 17 / Seversky Donec; 17	Тонкозернистый серый песок, с частицами ОСП / Fine-grained gray sand, with OMO particles	Средняя часть реки / Middle part of the river	80,2	4,3	1,5	5,0	0,3	0,4	0,4	0,8	0,4	0,1	0,0	6,6	100,0

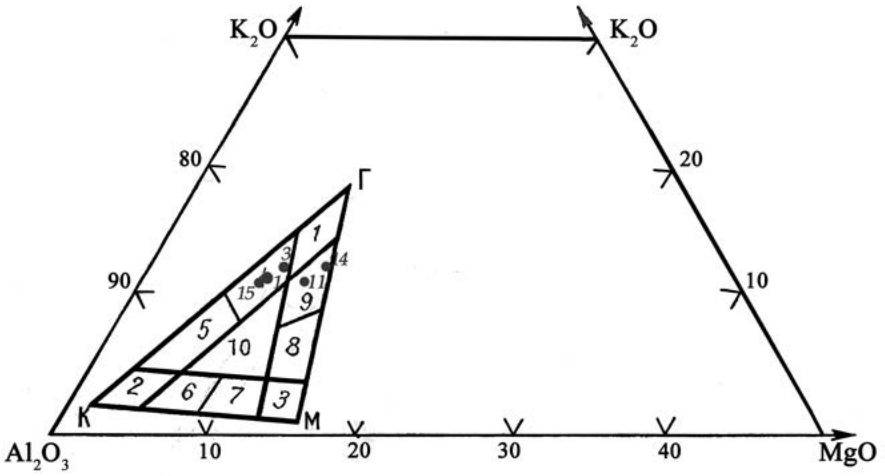


Рис. 3. Положение фигуративных точек донных отложений на треугольной диаграмме для определения исходного минерального состава [Закруткин, 1982] /
Fig. 3. Position of imaging points of river sediments in a triangular diagram used to determine the initial mineral composition [Zakrutkin, 1982]

Как видно из диаграммы, фигуративные точки состава донных осадков распределены неравномерно. При этом отложения Северского Донца, Калитвы, Быстрой расположены преимущественно в поле псаммитов, а Большой Каменки, Лихой, Кундрючьи и Большой Гнилуши – в основном в поле глин.

Учитывая, что границы между отдельными типами глин на диаграмме А-К в определенной степени условны, дальнейшее уточнение минерального состава изучаемых глинистых отложений осуществлено с помощью метода треугольных диаграмм [Закруткин, 1982]. Из анализа данных, приведенных на одной из этих диаграмм (рис. 3), а также уточняющей ее таблицы (таблица 2), следует, что наиболее распространённым глинистым минералом среди проанализированных проб является гидрослюда, иногда со значительной примесью каолинита (реки Большая и Малая Каменка, Кундрючья), либо монтмориллонита (Лихая и Большая Гнилуша).

Таблица 2 / Table 2

Характеристика минерального состава глинистых донных отложений рек бассейна Северского Донца / Mineral composition of the clayey river sediments of the Seversky Donets River basin

Река / River	Номер участка / Plot Number	Номер секции / Section number	Тип глины / Type of clay
Большая Каменка / Large Kamenka	1	4	Каолинит-гидрослюдистый / Kaolinite-hydrosluidic
Малая Каменка / Small Kamenka	3	4	Каолинит-гидрослюдистый / Kaolinite-hydrosluidic
Лихая / Lichay	11	9	Монтмориллонит-гидрослюдистый / Montmorillonite-hydrosluidic
Большая Гнилуша / Large Gnilushka	14	9	Монтмориллонит-гидрослюдистый / Montmorillonite-hydrosluidic
Кундрючья / Kundruchy	15	4	Каолинит-гидрослюдистый / Kaolinite-hydrosluidic

В дополнение к приведенной выше диаграмме А-К нами использована также классификационная диаграмма М. М. Хиррона [Herron, 1988], применявшаяся рядом авторов для характеристики донных отложений и состава речной взвеси [Fabris et al., 2021; Moraes et al., 2020; Sonfack et al., 2021]. На этой диаграмме, помимо традиционных терригенных отложений, выделены поля существенно ожелезненных образований (железистых сланцев и песчаников), что позволяет фиксировать один из главных источников поступления железа, марганца и других сопутствующих металлов в донные отложения – техногенные шахтные воды.

В этом плане заслуживает внимания положение на диаграмме (рис. 4) фигуративной точки устьевого створа р. Большая Гнилуша в поле железистых сланцев. Донные отложения в данном створе представлены черным, преимущественно пелитовым илом (содержание пелитовой фракции 84%) с самым высоком содержанием современной органики (порядка 19%), а также с самой высокой долей тяжелой фракции (2,07%), в которой определяющими являются гематит-магнетитовые образования, в сумме составляющие 90% выхода фракции. В подчиненном количестве присутствуют гидроокислы железа, ильменит и некоторые другие минералы.

Такие особенности гранулометрического и минерального состава осадка (резкое преобладание пелитовой составляющей, наряду с самым высоким выходом тяжелой фракции гематит-магнетитового состава) невозможно объяснить с точки зрения законов механической дифференциации вещества в осадочном процессе, поэтому возникает мысль об аутигенном происхождении магнетита с гематитом за счет гидроокислов железа под восстанавливающим влиянием разлагающегося органического вещества, присутствующего в обильном количестве в данном створе.

В то же время повсеместно распространенный в тяжелой фракции ильменит имеет явно терригенное происхождение, о чем свидетельствует прямая зависимость с высоким значением коэффициента аппроксимации между его содержанием

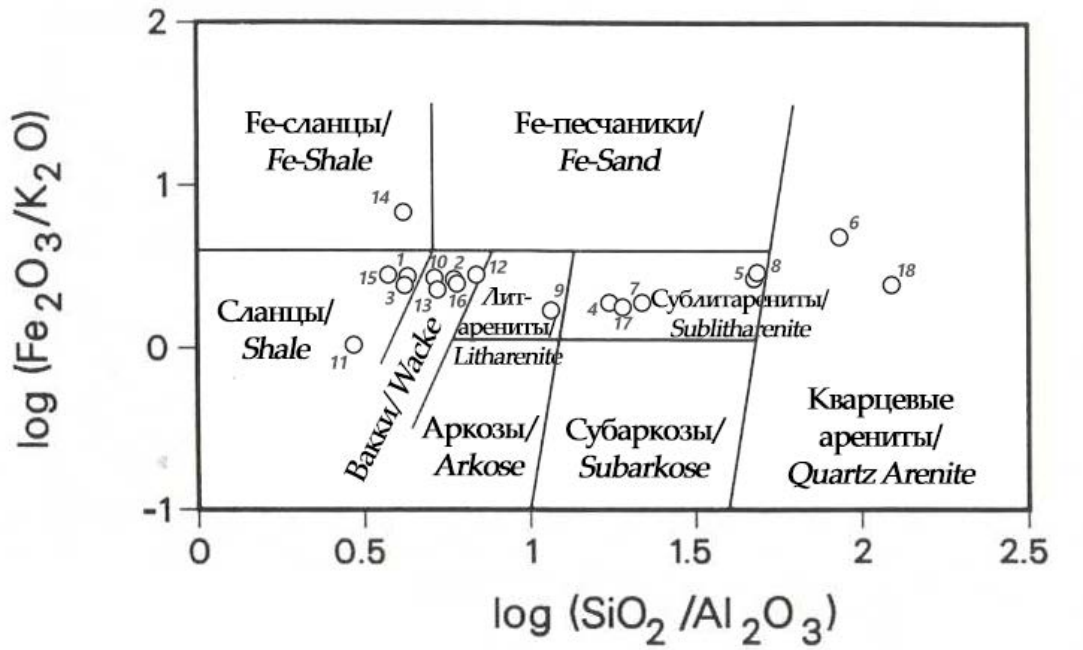


Рис. 4. Положение фигуративных точек состава донных отложений рек бассейна Северского Донца на диаграмме Хиррона [Herron, 1988] /
Fig. 4. Position of imaging points of the sediments composition in the rivers of the Seversky Donets River basin in the Herron diagram [Herron, 1988]

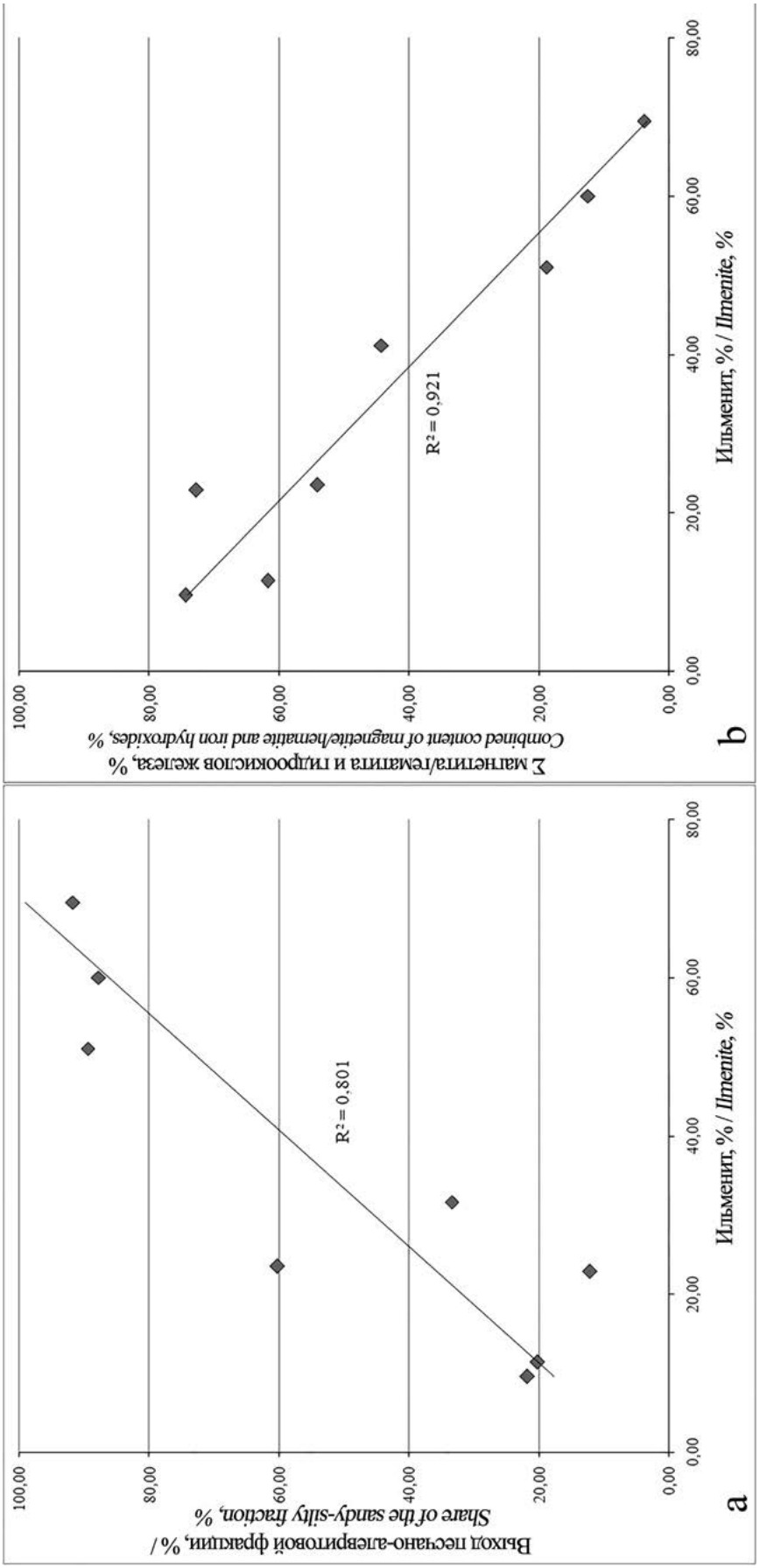


Рис. 5. (а) Зависимость содержания ильменита от выхода песчано-алевритовой фракции (в среднем по рекам), (б) зависимость содержания ильменита от суммарного содержания окислов и гидроокислов железа /

Fig. 5. (a) Correlation between the ilmenite content and the share of the sandy-silty fraction (average value for the rivers), (b) correlation between the ilmenite content and the combined content of iron oxides and hydroxides

и выходом песчано-алевритовой фракции (рис. 5а). Магнетит же в совокупности с другими оксидами и гидрооксидами железа находится в обратной зависимости с содержанием ильменита (рис. 5б), что является дополнительным подтверждением иного, аутигенного происхождения минерала и его повсеместного распространения. Новообразования магнетита в современных осадках отмечались и другими авторами [Semenov et al., 2017].

Как известно, формирование донных отложений происходит в результате сложного взаимодействия различных процессов как природного, так и техногенного происхождения. С учетом высокой степени расчлененности рельефа и преобладанием водной эрозии над ветровой [Сидаренко, 2020] в пределах бассейна Северского Донца, основным путем поступления вещества в водотоки и донные отложения рек будет смыв с водосборной площади. При этом водной эрозии подвергается не только почвенный покров, но и продукты физико-химического разрушения породных отвалов (терриконов), зачастую расположенных в непосредственной близости от изучаемых рек (рис. 1). Как показывает анализ экзогенных процессов в угольных бассейнах с шахтным способом добычи [Солнцева, Никифорова, 1982; Зубова и др., 2015; Welch et al., 2021; Clark et al., 2018] отвалы вскрышных и вмещающих пород под воздействием атмосферных осадков подвергаются трансформации, в результате чего формируются высокоминерализованные водотоки, оказывающие воздействие на почвенный покров, подземные и поверхностные воды. Помимо этого, с поверхности терриконов дождевыми потоками выносится и твердый материал в виде техногенного делювия и пролювия, который, перемещаясь, главным образом, по овражно-балочной системе, в конечном счете попадает в речную сеть.

Факт участия техногенного делювия в формировании вещественного состава донных отложений подтверждается и нижеследующей диаграммой (рис. 6), где по вертикальной оси показаны величины железного модуля, а по горизонтали – значения модуля общей нормативной щелочности. На этой диаграмме выделены поля черноземов южных и обыкновенных, наиболее распространенных типов почв в бассейне Северского Донца и материала техногенного делювия породных отвалов. Оба эти поля относятся к диапазону нормальной железистости, следовательно, техногенные делювий, пролювий и тем более почвенный покров не могли являться источниками формирования донных отложений повышенной степени ожелезненности. В этой связи естественно предположить, что локализация фигуративных точек в верхней части диаграммы будет говорить о высоком влиянии техногенных шахтных вод, что подтверждается положением устьевого створа р. Большая Гнилуша в зоне высокожелезистых образований.

Положение большей части фигуративных точек речного аллювия в поле нормальной железистости хорошо согласуется с его слабой степенью загрязненности, установленной по суммарному показателю Z_C, несмотря на общепризнанный факт воздействия угледобывающей промышленности на поверхностные водные объекты Восточного Донбасса [Закруткин и др., 2016; Гавришин, 2020, 2019; Гавришин и др., 2018]. Данное обстоятельство можно объяснить, по крайней мере, двумя причинами: во-первых, улучшением качества речных вод [Закруткин и др., 2016], связанным с сокращением объемов загрязняющих веществ, прежде всего железа и марганца, поступающих в речную сеть; во-вторых – активным взаимодействием донных осадков с водной толщей, сопровождающимся переходом макро- и микроэлементов в поверхностные воды. Так, в частности, как показали результаты про-

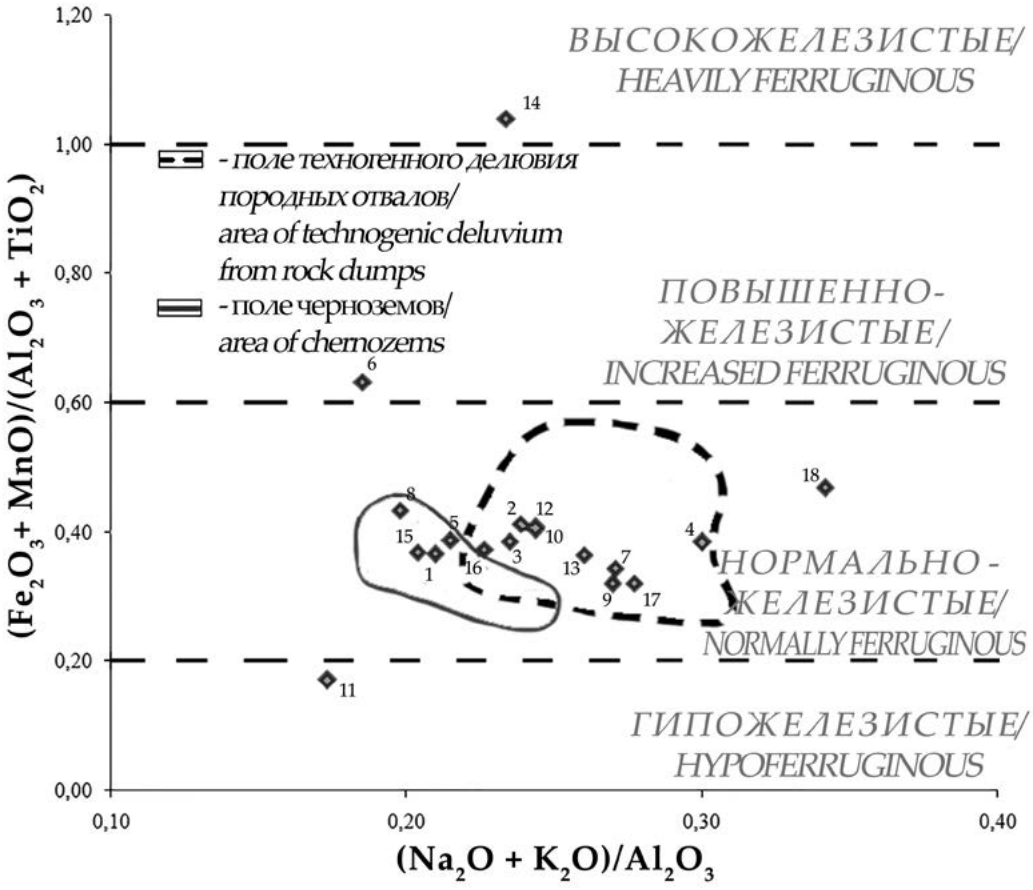


Рис. 6. Положение фигуративных точек донных отложений рек бассейна Северского Донца и полей черноземов [Вальков и др., 2008] и техногенного делювия породных отвалов [Коломенский и др., 2005] на диаграмме (Fe_2O_3+FeO+MnO)/ (Al_2O_3 + TiO_2) – (Na_2O+K_2O)/Al_2O_3 /
Fig. 6. Position of imaging points of river sediments in the Seversky Donets River basin and areas of chernozems [Valkov et al., 2008] and technogenic deluvium from rock dumps [Kolomensky et al., 2005] in the diagram (Fe_2O_3+FeO+MnO)/ (Al_2O_3 + TiO_2) – (Na_2O+K_2O)/Al_2O_3

веденных нами экспериментов [Закруткин и др., 2016], исследуемые донные отложения могут являться источником вторичного загрязнения железом, марганцем и другими металлами. При этом обменные процессы в системе «донные отложения – речная вода» протекают достаточно быстро, в результате чего уже в течение часа концентрация железа в речной воде увеличивается в 1,5 раза; марганца – в 16-20 раз в сравнении с их исходными содержаниями.

Выводы

1. Химический состав донных отложений формируется за счет совокупного влияния природных и антропогенных факторов, среди последних определенную роль играют техногенные геохимические потоки, сформированные в процессе угледобычи и последующей ликвидации нерентабельных шахт – техногенные шахтные воды и продукты физико-химической трансформации породных отвалов в виде техногенного делювия и пролювия.

2. Снижение степени техногенного воздействия в последние годы, в связи с истощением источника поступления загрязняющих веществ в речную сеть и обмен-

ные процессы в системе «вода – донные отложения» определили низкую степень загрязненности аллювия большинства рек бассейна железом, марганцем и другими металлами.

3. Процессы аутигенного минералообразования, протекающие в стадию диагенеза, способствуют детоксикации донных отложений за счет перевода железа и вероятно сопутствующих ему металлов в относительно инертные формы. Ярким результатом подобных процессов являются новообразования магнетита за счет гидроокислов железа под восстанавливающим влиянием разлагающегося органического вещества.

Литература

1. Вальков В. Ф. Почвы Юга России. / В. Ф. Вальков, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – РнД: Изд-во «Эверест», 2008. – 276 с

2. Гавришин А. И. Оценка качества химического состава поверхностных вод в Восточном Донбассе. // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. – №4. – С. 61-67. DOI: 10.31857/S0869-78092019461-67

3. Гавришин А. И. Шахтные воды в управлении качеством грунтовых вод в Восточном Донбассе. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 127-138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008

4. 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

5. Давыденко Д. Б., Парада С. Г. Опыт разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 22-27. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003.

6. Закруткин В. Е. Высокоуглеродистые формации раннего докембрия европейской части СССР. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1982. – 286 с.

7. 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.

8. Зубова Л. Г., Зубов А. Р., Зубов А. А., Харламова А. В., Воробьев С. Г., Макаришина Ю. И., Буняченко В. В. Терриконы: монография. – Луганск: Ноулидж, 2015. – 712 с.

9. Мохов А. В. Некоторые аспекты применения метода гидрогеологических аналогий для обеспечения промышленного освоения угольных месторождений подземным способом. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №4. – С. 94-101.

10. Мохов А. В. О происхождении и морфологии Z-образных расщеплений угольных залежей (на примере Восточного Донбасса). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 121-134. DOI: 10.46698/VNC.2021.31.82.010.

11. Погребнов Н. Н., Очертенко И. А., Трощенко В. В. Структурная геология Донецкого угольного бассейна. – М.: Недра, 1985. – 149 с.

12. Коломенский Г. Ю., Гипич Л. В., Коломенская В. Г. Техногенные месторождения. // В кн.: Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. / Гл. ред. акад. Г. Г. Матишов. – Ростов н/Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. – С. 85-101.

13. Сидаренко Д. П. Интенсивность проявления эрозионных процессов в Ростовской области. // Экология и водное хозяйство. – 2020. – №2 (5). – С. 86-102. DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-86-102

14. Солнцева Н. П., Никифорова Е. М. Влияние техногенных потоков на геохимию лесных почв (в связи с угледобычей). // В кн.: Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. – М.: Наука, 1982. – С. 82-119.

15. Clark E. V., Daniels W. L., Zipper C. E., Eriksson K. Mineralogical influences on water quality from weathering of surface coal mine spoils. // Appl Geochem. – 2018. – Vol. 91. – pp. 97-106. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2018.02.001

16. Fabris A.-S., Larouche P., Montero-Serrano J.-C. Characterization of suspended matter size and composition in the St. Lawrence Estuary (eastern Canada). // Regional Studies in Marine Science. – 2021. – Vol. 45. – 101838. DOI: 10.1016/j. rsma. 2021.101838

17. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. // J. Sed. Petrol. – 1988. – Vol. 58. – pp. 820-829. DOI: 10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D

18. Moraes A. M., Sahoo P. K., Guimarães J. T. F., Leite A. S., Salomão G. N., Souza-Filho P. W. M., Júniora W. N., Dall'Agnol R. Multivariate statistics and geochemical approaches for understanding source-sink relationship – a case study from close-basin lakes in Southeast Amazon. // J. S. Am. Earth Sci. – 2020. – Vol. 99. – Article 102497. DOI: 10.1016/j. jsames. 2020.102497

19. 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

20. Sonfack N. A., Ngueutchoua G., Kontchipe Ngagoum Y. S., Temgo Sopie F., Nkouathio D. G., Wouatong A. S. L., Tchatchueng R., Nguemo Kenfack G. R., Njanko T. Mineralogical and geochemical signatures of surface stream sediments from Dibamba River basin, SW Cameroon: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. // Journal of African Earth Sciences. – 2021. – Vol. 181. – 104251. DOI: 10.1016/j. jafrearsci. 2021.104251

21. Welch C., Barbour S. L., Hendry M. J. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: a systematic global review. // Sci. Total Environ. – 2021. – Vol. 795. – Article 148798. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2021.148798

References

1. Valkov V. F., Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. Soils of the South of Russia. Rostov-on-Don: Everest, 2008. 276 p. (In Russ.)

2. Gavrishin A. I. Assessment of the quality of the chemical composition of surface waters in the Eastern Donbass. Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. 2019. No. 4. pp. 61-67. DOI: 10.31857/S0869-78092019461-67 (In Russ.)

3. Gavrishin A. I. The mine water in the management of groundwater pollution in the Eastern Donbass. Geology and geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 127-138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008 (In Russ.)

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

5. Davydenko D. B., Parada S. G. Experience of Dividing Potential Fields of Donbass into Background, Residual and Local Components and some Results of Interpretation. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 22-27. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003 (In Russ.)

6. Zakrutkin V. E. High-carbon formations of the Early Precambrian of the European part of the USSR. Rostov-on-Don. SFU, 1982. 286 p. (In Russ.)

7. 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.)

8. Zubova L.G., Zubov A.R., Zubov A.A., Kharlamova A.V., Vorobyov S.G., Makarishina Yu.I., Bunyachenko V.V. Waste heaps: monograph. Lugansk, Knowledge, 2015. 712 p. (In Russ.)

9. Mokhov A.V. Some aspects of the application of the method of hydrogeological analogies to ensure the industrial development of coal deposits by the underground method. Geology and geophysics of the South of Russia. 2016. No. 4. pp. 94-101. (In Russ.)

10. Mokhov A.V. On the origin and morphology of *Z*-shaped splitting of coal deposits (on the example of Eastern Donbass). Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 121-134. (in Russ.)

11. Pogrebnov N.N., Ochertenko I.A., Troshchenko V.V. Structural geology of the Donetsk coal basin. Moscow. Nedra, 1985. 149 p. (In Russ.)

12. Kolomensky G.Yu., Gipich L.V., Kolomenskaya V.G. Technogenic deposits. Problems and prospects of the integrated development of the mineral resources of the Eastern Donbass. Rostov-on-Don. SSC RAS, 2005. pp. 85-101. (In Russ.)

13. Sidarenko D.P. The intensity of erosion processes in Rostov Region. Ecology and water management. 2020. No. 2. Issue 5. pp. 86-102. DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-86-102 (In Russ.)

14. Solntseva N.P., Nikiforova E.M. Influence of technogenic flows on the geochemistry of forest soils (in connection with coal mining). Mining and geochemistry of natural ecosystems. Moscow. Nauka, 1982. pp. 82-119. (In Russ.)

15. Clark E.V., Daniels W.L., Zipper C.E., Eriksson K. Mineralogical influences on water quality from weathering of surface coal mine spoils. Appl Geochem. 2018. Vol. 91. pp. 97-106. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2018.02.001.

16. Fabris A.-S., Larouche P., Montero-Serrano J.-C. Characterization of suspended matter size and composition in the St. Lawrence Estuary (eastern Canada). Regional Studies in Marine Science. 2021. Vol. 45. 101838. DOI: 10.1016/j. rsma. 2021.101838.

17. Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. J.Sed. Petrol. 1988. Vol. 58. pp. 820-829. DOI: 10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D.

18. Moraes A.M., Sahoo P.K., Guimarães J.T. F., Leite A.S., Salomão G.N., Souza-Filho P.W. M., Júniora W.N., Dall'Agnol R. Multivariate statistics and geochemical approaches for understanding source-sink relationship – a case study from close-basin lakes in Southeast Amazon. J.S.Am. Earth Sci. 2020. Vol. 99. Article 102497. DOI: 10.1016/j. jsames. 2020.102497.

19. 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. No. 2. pp. 252-256. DOI: 10.17516/1997-1397-2017-10-2-252-256.

20. Sonfack N.A., Ngueutchoua G., Kontchipe Ngagoum Y.S., Temgo Sopie F., Nkouathio D.G., Wouatong A.S. L., Tchatchueng R., Nguemo Kenfack G.R., Njanko T. Mineralogical and geochemical signatures of surface stream sediments from Dibamba River basin, SW Cameroon: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. Journal of African Earth Sciences. 2021. Vol. 181. 104251. DOI: 10.1016/j. jafrearsci. 2021.104251.

21. Welch C., Barbour S.L., Hendry M.J. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: a systematic global review. Sci. Total Environ. 2021. Vol. 795. Article 148798. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2021.148798.

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.3
DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003

Оригинальная статья

Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах

В. Б. Заалишвили[1], С. В. Бирюлин[2], И. А. Козлова[2], Д. А. Мельков[1], А. К. Юрков[2]

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

[2]Институт геофизики УрО РАН, Россия, 620016, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100, e-mail: akyurkov@mail.ru

Статья поступила: 11.02.2022, доработана: 01.03.2022, одобрена в печать: 09.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Интерес к прогнозу землетрясений по-прежнему актуален и исследования в этом направлении продолжаются. Изучено большое количество природных явлений, предваряющих или вызываемых землетрясениями. В настоящее время таких явлений насчитывается около двухсот. К наиболее чётко проявляющимся и достаточно хорошо исследованным относятся явления, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. Известны примеры успешного использования гидрогеодинамических, сейсмологических и радоновых признаков предвестников при краткосрочном прогнозе сейсмических событий. Несмотря на широкий спектр проведенных радоновых исследований, не были выявлены надежные признаки поведения объемной активности радона, связанные с процессом подготовки сейсмического события. **Цель исследования.** Целью работы является изучение возможности применения особенностей изменения радонового поля (поля объемной активности почвенного радона) при подготовке тектонического землетрясения в сейсмически активных регионах с отличающейся геодинамической обстановкой. **Методы работы.** Мониторинг радона выполнялся на геофизических полигонах в Южно-Курильском и Кавказском регионах. Измерения выполнялись при принудительной доставке почвенного воздуха к детектору (адвективный режим). **Результаты работы.** Результаты радонового мониторинга на станции Кармадон показывают, что поведение кривой ОАР перед землетрясениями ближней зоны не противоречит закономерностям, установленным для Южно-Курильского региона.

Ключевые слова: землетрясение, краткосрочный прогноз, радоновый мониторинг, магнитуда, Курильские острова, Северный Кавказ.

Для цитирования: Заалишвили В. Б., Бирюлин С. В., Козлова И. А., Мельков Д. А., Юрков А. К. Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах. *Геология и геофизика Юга России.* 2022. 12 (1): 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003

Original paper

Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions

V. B. Zaalishvili[1], S. V. Biryulin[2], I. A. Kozlova[2], D. A. Melkov[1], A. K. Yurkov[2]

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

[2]Institute of Geophysics Ural Branch of RAS, 100 Amundsena Str., Ekaterinburg 620016, Russian Federation, e-mail: akyurkov@mail.ru

Reseived: 11.02.2022, revised: 01.03.2022, accepted:09.03.2022

Abstract: Relevance. Interest in earthquake prediction is still relevant and research in this direction continues. A large number of natural phenomena that precede or are caused by earthquakes have been studied. Currently, there are about two hundred such phenomena. The phenomena associated with changes in the stress-strain state of rocks are among the most clearly manifested and fairly well studied. There are examples of successful use of hydrogeodynamic, seismological and radon signs of precursors in the short-term prediction of seismic events. Despite the wide range of radon studies conducted, reliable signs of the behavior of volumeradonactivity associated with the process of preparing a seismic event have not been identified. **Aim.** The aim of the work is to study the possibility of applying the features of the radon field change (the field of volumesoilradon activity) in the preparation of a tectonic earthquake in seismically active regions with different geodynamic conditions. **Methods**. Radon monitoring was carried out at geophysical landfills in the South Kuril and Caucasus regions. Measurements were performed with forced delivery of soil air to the detector (advective mode). **Results.** The results of radon monitoring at the Karmadon station show that the behavior of the VRA curve before earthquakes in the near zone does not contradict the patterns established for the South Kuril region.

Keywords: earthquake, short-term forecast, radon monitoring, magnitude, Kuril Islands, North Caucasus.

For citation: Zaalishvili V. B., Biryulin S. V., Kozlova I. A., Melkov D. A., Yurkov A. K. Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii =Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.

Введение

Интерес к изучению землетрясений носит волнообразный характер. Интенсивность исследований активизируется и соответственно количество публикаций возрастает после очередного катастрофического события, повлекшего за собой человеческие жертвы и материальные потери. Спустя несколько лет или месяцев все успокаивается, проблема отходит на второй план до следующего события. Такая ситуация, в целом оправдана. На протяжении уже почти ста лет проблема прогноза землетрясений, несмотря на усилия большого количества ученых из разных стран, до сих пор не решена. Отсюда скептицизм научного сообщества по поводу возможного решения этого вопроса. Тем не менее, проблема по-прежнему актуальна и ис-

следования в этом направлении продолжаются [Toader et al., 2016; Yakut et al, 2017; Fu, Lee, 2018; Fu et al., 2021; Ambrosino et al., 2018; Przylibski et al., 2020; Kawabata et al., 2020; Kumar et al., 2020; Sabbarese et al., 2020; Zhao et al., 2021; Chowdhury et al., 2022], в том числе на основе современных методов машинного обучения [Zmazek et al., 2005; Singh et al., 2017; Tareen et al., 2019; Ambrosino et al., 2020; Rafique et al., 2020; Sahoo, 2020; Haideretal., 2021; Miretal., 2022].

Изучено большое количество природных явлений, предваряющих или вызываемых землетрясениями. В настоящее время таких явлений насчитывается около двухсот. К наиболее чётко проявляющимся и достаточно хорошо исследованным относятся явления, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. Известны примеры успешного использования таких предвестников при краткосрочном прогнозе сейсмических событий. Успешно спрогнозировано Хайченское землетрясение 1975 года по совокупности гидрогеодинамических, сейсмологических и радоновых признаков [Fu, Tatsuoka, 1984]. Следует отметить, документально зарегистрированный, среднесрочный прогноз землетрясения Тохоку в 2011 году по анализу слабой сейсмичности [Любушин, 2011], прогноз землетрясения 6 апреля 2009 года в городе Л'Акуила по данным радонового мониторинга [Giuliani et al., 2009].

Наиболее вероятно, что прогноз землетрясения может быть осуществлен только на основании комплексного анализа регистрируемых явлений при мониторинговых наблюдениях. Практически все известные случаи успешного прогноза основывались на результатах сейсмологических, гидрогеодинамических, радоновых исследований и дополнялись результатами ряда других наблюдений. Связь сейсмологических наблюдений с процессом подготовки землетрясений очевидна. С их помощью осуществляется долгосрочный прогноз сейсмической опасности территорий. Разработано и используется довольно много методик применения сейсмологических наблюдений для среднесрочного и краткосрочного прогнозирования землетрясений. В частности, уже упоминавшийся, прогноз землетрясения Тохоку [Любушин, 2013] выполнен на основе оригинальной методики по анализу слабой сейсмичности. Гидрогеодинамический мониторинг непосредственно связан с вариациями уровня столба жидкости в скважинах и колодцах, вызываемыми изменением напряженно-деформированного состояния горных пород в области подготовки землетрясения. Следует отметить вариант гидрогеодинамического мониторинга, разработанного в Институте геофизики УрО РАН на основе измерений движения жидкости по стволу скважины по изменениям температуры в стационарных информативных точках [Юрков и др., 2011]. Эта модификация гидрогеодинамического способа существенно расширила его возможности.

Целью работы является изучение возможности применения особенностей изменения радонового поля (поля объемной активности почвенного радона) при подготовке тектонического землетрясения в сейсмически активных регионах с отличающейся геодинамической обстановкой.

Применение радона в качестве предвестника землетрясений обусловлено тем, что он, являясь промежуточным продуктом распада в урановом ряду, распространен во всех горных породах. За счёт короткого периода полураспада ^{222}Rn (3,82 дня) он не накапливается в поровом пространстве горных пород, что позволяет регистрировать его небольшие вариации, вызываемые изменениями напряженно-деформированного состояния верхней части геологического разреза. Газообразный

радон, образующийся в горных породах, частично остается в кристаллической решётке, частично переходит в поровые жидкости и мигрирует через взаимосвязанные поры посредством диффузии [Ghosh et al., 2009]. Разработанная в Институте геофизики УрО РАН методика проведения мониторинговых наблюдений позволила снизить влияние метеоусловий, увеличить информативный объем горных пород и устранить влияние детектора радона на напряженно-деформированное состояние горных пород в измеряемой точке. Разработанная методика была апробирована при исследовании горных ударов на шахтах СУБРа [Булашевич и др., 1996].

Несмотря на широкий спектр проведенных радоновых исследований, не были выявлены надежные признаки поведения объемной активности радона, связанные с процессом подготовки сейсмического события [Conti et al., 2021]. Это может быть обусловлено также тем, что существуют и радоновые аномалии нетектонического происхождения, которые могут быть поразительно похожи на тектонические, таким образом, по-видимому, только часть всех зарегистрированных предвестников радона реальна в том смысле, что они физически связаны с процессом подготовки надвигающегося землетрясения [Woith, 2015]. Приведенный ниже обзор радоновых исследований освещает существующие точки зрения на информативность радонового предвестника.

В 1988 году Назаров и Неро измеряли концентрации ^{222}Rn в подземных водах, и установили связь концентраций с изменениями напряжения земной коры или повышением напряжения в сейсмически активных зонах. Долгосрочные измерения радона в воде и газе необходимы для понимания изменений концентрации радона в зависимости от сейсмичности. Интерпретация различных параметров, связанных с землетрясениями, является сложной задачей, поскольку землетрясения происходят в разных геологических и тектонических условиях, и характеристики землетрясений отличаются друг от друга. Изменение концентрации радона обусловлено не только тектонической структурой, но и изменением литологии. Перед землетрясением Тохоку в 2011 году в обсерватории Накайдзу на полуострове Идзу было зафиксировано аномальное увеличение концентрации радона. Ришон и др. обнаружили аномальное увеличение содержания почвенного газа радона за 22 дня до землетрясения в Миндоро (M 7,1) [Ye et al., 2015].

Дже Вук Ким и др. исследовали взаимосвязь между концентрацией радона в помещении и землетрясениями на первом этаже Университета Донгук в Кенджу, Республика Корея, в период с февраля 2016 года по январь 2017 года. Измерения фиксировались с помощью детектора RAD 7 каждые 30 минут. В результате выявлены сходные всплескоподобные закономерности между распределением концентрации радона в помещении и землетрясениями: внезапное увеличение концентрации радона в помещении за 1-4 дня до землетрясения, постепенное снижение перед землетрясением и внезапное падение в день землетрясения [Kim et al., 2018].

В Пайхэ Т. Куо и др. наблюдали аномалии радона подземных вод перед землетрясениями M 6,3 Цзяньсянь и M 6,4 в Мейнонге, произошедшими 4 марта 2010 года и 5 февраля 2016 года соответственно. Концентрация радона в подземных водах в обоих случаях снижалась с фонового уровня почти на 30%. Аномалии радона, наблюдаемые в известняковом источнике Пайхэ, подтвердили, что небольшой трещиноватый водоносный горизонт можно использовать в качестве эффективного средства измерения естественной деформации, применяя радон в качестве предшественника землетрясений для предупреждения о землетрясениях на юго-западе Тайваня [Kuo et al., 2018].

Сунарно и др. отслеживали аномалии концентрации радона в камере в течение периода на факультете ядерной инженериии физики, Джокьякарта, Индонезия. Они проанализировали взаимосвязь между изменениями концентрации радона и произошедшим землетрясением. Это изменение произошло за два дня до землетрясения. Наиболее значительное изменение произошло за два дня до землетрясения магнитудой 5,8 в Маланге 19 июля 2018 года. Характер изменения концентрации радона показывает, что, если землетрясение имеет значительную магнитуду и расположено ближе к положению детектора, поэтому концентрация радона объяснит гораздо более значительные изменения. Гипоцентр, эпицентр, магнитуда и расстояние землетрясения от местоположения датчика концентрации радона важны для прогнозирования землетрясений, основанного на изменениях концентрации радона [Firdaus et al., 2020].

Приведенные исследования показывают, что дальнодействие радонового предвестника, и время проявления его перед землетрясением изменяются в очень больших пределах.

Объекты и методика исследований

Оба региона, в которых проводились исследования (Южные Курилы, Северный Кавказ), являются сейсмоактивными и характеризуются различными геолого-тектоническими условиями. Многолетний радоновый мониторинг параллельно с мониторингом землетрясений выполнялся в Южно-Курильске и Кармадоне.

Курило-Камчатская зона Тихого океана – один из наиболее тектонически активных районов Земли, отличающийся высокой современной сейсмической и вулканической активностью и привлекающий в связи с этим внимание специалистов разных направлений наук о Земле. Район характеризуется наличием зоны субдукции.

Выполненный ретроспективный анализ результатов непрерывного восьмилетнего мониторинга ОАР на Южно-Курильском геодинамическом полигоне, позволил получить закономерности поведения объемной активности радона при подготовке землетрясений. В результате проведённых исследований были получены ответы на некоторые вопросы. Выявлены временные границы проявления радонового предвестника перед событием, его «дальнодействие», влияние особенностей геологического строения исследуемого района. Учитывались опыт и результаты радонового мониторинга при исследовании горных ударов, двухлетний мониторинг на восьми станциях Северного Тянь-Шаня. Физической основой интерпретации данных служило предположение о наличии деформаций изгиба при подготовке горных ударов и землетрясений [Уткин, Юрков, 2009]. Практически все варианты проявления тектонических движений на земной поверхности, а также в горных выработках [Уткин, Юрков, 2009], приводят к деформациям изгиба. С наличием таких деформаций связано образование зон сжатия, растяжения и нейтральной зоны. Соответственно и поведение радона (объемной активности радона – ОАР) будет различаться.

На основе разработанной методики [Козлова и др., 2021] было выделено 164 аномалии ОАР. 148 из рассмотренных аномалий предшествовали землетрясениям, произошедшим в радиусе 500 километров от станции наблюдения (рис. 1).

Эпицентральная зона проявления предвестника определялась на основании деформационной модели [Добровольский, 1991]. Согласно модели, радиус проявления деформаций связан с соотношением магнитуды землетрясения к логарифму расстояния. Если результат соотношения (K) превышает 2,5, то процесс подготовки

Рис. 1. Тектонические землетрясения в поле значений ОАР. Ромбами обозначены события, отразившиеся в кривых аномалий ОАР. Точками обозначены события, которые не отразились в кривых аномалий ОАР. Жёлтая прямая линия соответствует K=2,5; прерывистая прямая линия соответствует отношению K=2 [Козлова и др., 2021] /

Fig. 1. Tectonic earthquakes in the field of VRA values. The rhombuses indicate the events reflected in the curves of the anomalies of the VRA. The dots indicate events that were not reflected in the curves of the anomalies of the VRA. The yellow straight line corresponds to K=2.5; the broken straight line corresponds to the ratio K=2 [Kozlova et al., 2021]

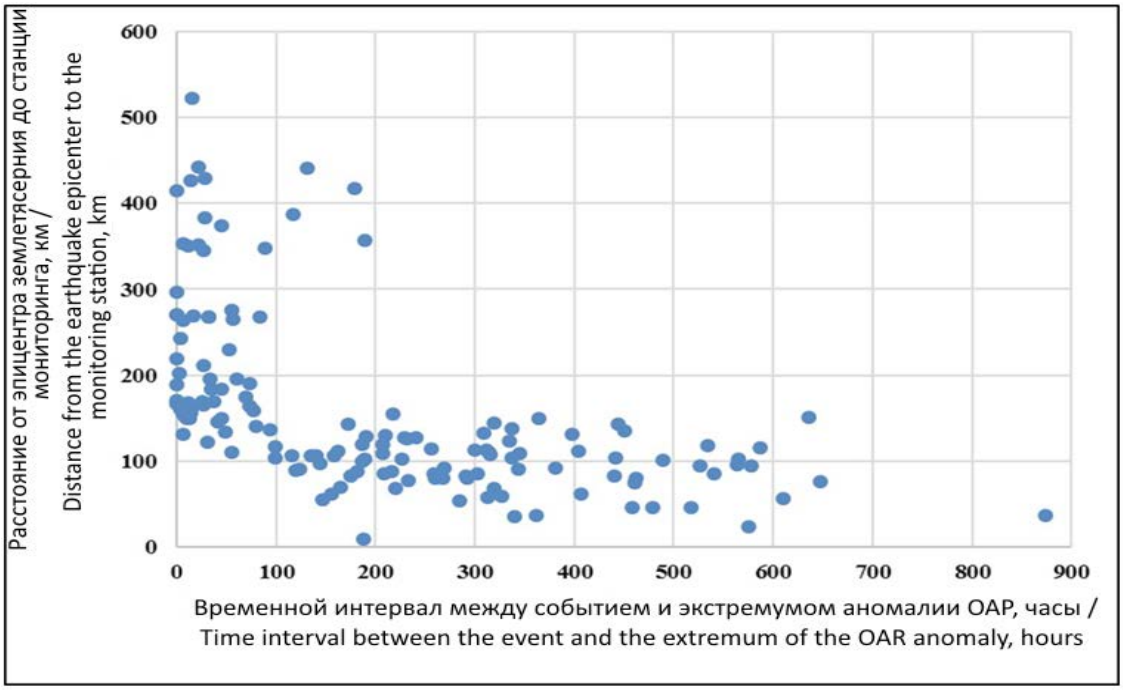


Рис. 2. График времени проявления событий с K≥2 относительно экстремума предшествующей аномалии [Бирюлин и др., 2021] /

Fig. 1. Time graph of the events occurrence with K≥2 relative to extremum of preceding anomaly [Biryulin et al., 2021]

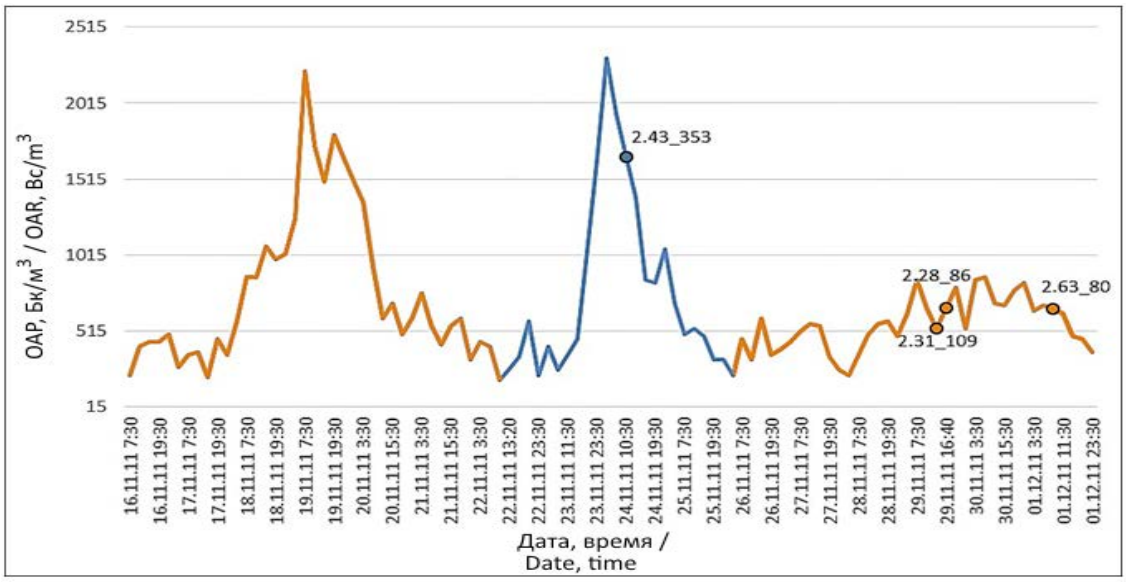


Рис. 3. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга [Бирюлин и др., 2021] /
Fig. 3. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station [Biryulin et al., 2021]

наблюдается в точке мониторинга. Для условий Южных Курил, на основании экспериментально полученных данных, величина K может быть скорректирована до 2,0 (рис. 1).

При сравнении экспериментальных результатов и результатов сопоставления случайных выборок интервалов между аномалиями ОАР и случайных интервалов между событиями, сгенерированных по закону распределения Пуассона, установлено, что между аномалиями ОАР и землетрясениями существует причинно-следственная связь [Бирюлин и др., 2021]. На большом фактическом материале (рис. 2) показано, что аномалии ОАР предваряют землетрясения, которые происходят только после экстремума аномалии. Рисунок 2 также показывает, что радоновый предвестник относится к краткосрочным для недалеких событий, а для дальних событий его можно отнести к оперативным.

На рисунке 3 приведён пример поведения ОАР перед тектоническим землетрясением. Разработанная методика сопоставления аномалий ОАР и землетрясений показывает, что не всегда землетрясение, следующее непосредственно за аномалией, ответственно за нее.

Рисунок 3 отображает две ярко выраженные радоновые аномалии и четыре последующих события. Оранжевый участок кривой ОАР в начале графика связан с подготовкой ближних событий (на расстоянии 80, 86 и 109 километров от станции мониторинга). Синий участок кривой относится к подготовке дальнего землетрясения на расстоянии 353 километра.

События, вероятно связанные с зоной сжатия или «ближней зоной» и с зоной растяжения «дальней зоной» отражаются на разных участках кривой ОАР (рис. 4).

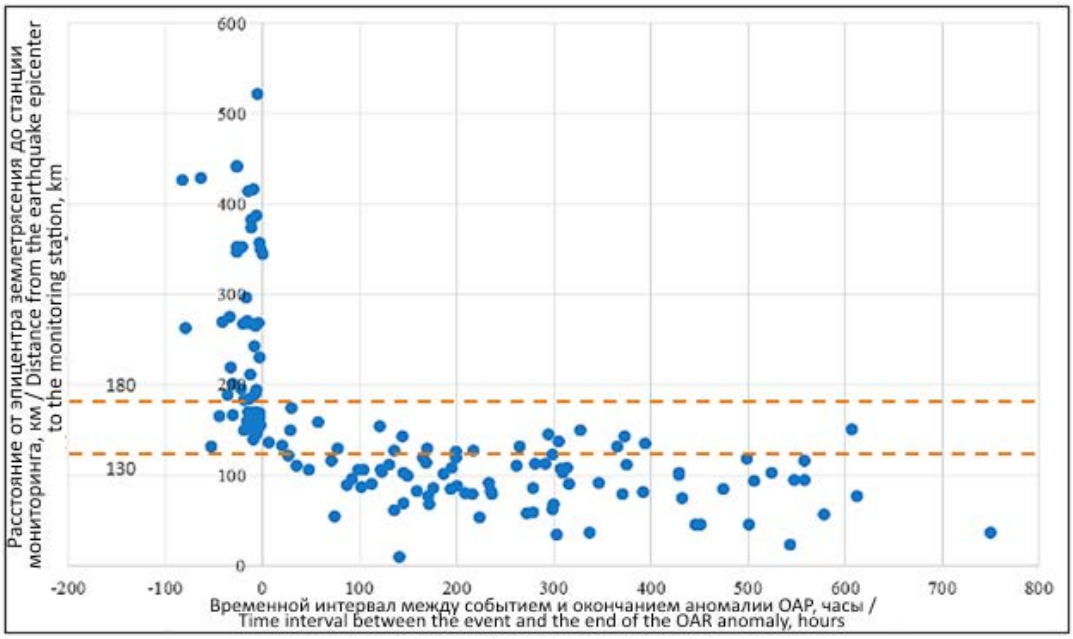


Рис. 4. Зависимость расстояния между станцией мониторинга и эпицентром события от интервала между окончанием аномалии радона и землетрясением для K≥2 [Бирюлин и др., 2021] / Fig. 4. The dependence of distance between monitoring station and eventepicenter on the interval between radon anomaly end and earthquake for K≥2 [Biryulin et al., 2021]

Землетрясения дальней зоны на кривой ОАР отмечаются на нисходящей ветви аномалии ОАР. События ближней зоны отмечаются после выхода аномалии ОАР на фоновые значения. Временной интервал проявления событий дальней зоны находится в пределах 7 суток после экстремума аномалии. Время задержки событий ближней зоны составляет до 24 дней после выхода аномалии на фоновый уровень. Для условий Южных Курил размеры ближней зоны не превышают 130 километров; дальняя зона начинается с расстояния 180 километров. Между ними, по аналогии с горными ударами, находится промежуточная зона.

Исходя из орографии строения Кавказской горной системы, можно предположить ее аналогию с тектоническим положением Северного Тянь-Шаня, хребты которого надвигаются на Туранскую плиту и испытывают деформации изгиба [Уткин, 2006]. Для Северного Кавказа можно предположить наличие надвига системы хребтов на Скифскую плиту, что может приводить к возникновению изгибных деформаций. Имеющиеся геологические и геофизические данные подтверждают поддвиг Скифской плиты под кристаллический массив горного сооружения [Шемпелев и др., 2015; Январев, 2020; Чотчаев и др., 2021]. Наибольшую опасность в силу своей близости к территории г. Владикавказ представляет Владикавказский разлом, сейсмический потенциал которого оценивается M=7,1 [Рогожин и др., 2001]. Владикавказский глубинный разлом, как единая структура 1-го порядка, выделяется по геофизическим данным [Письменный и др., 2006]. Приведенная краткая геологическая характеристика района расположения станций радонового мониторинга на Северном Кавказе не исключает наличия деформаций изгиба, что дает основание применить при интерпретации ранее установленные закономерности между аномалиями ОАР и землетрясениями, полученные для зоны субдукции.

Результаты работы и их обсуждение

Мониторинговые наблюдения в районе Северного Кавказа были организованы на станции Владикавказ на территории геофизического Института с 2017 года и на станции Кармадон с 2018 года. В процессе выполнения мониторинга установлены следующие отклонения условий измерений от идеальных. В частности, на станции Владикавказ, расположенной практически в центре города, существует высокий радоновый фон, вызываемый техногенными помехами. Высокий фон затрудняет выделение аномалий ОАР, что затрудняет интерпретацию. На станции Кармадон условия измерений позволяют получать качественные данные, но, в силу высокогорных условий только в летне-осеннее время. Поэтому анализ результатов радонового мониторинга основан на данных станции Кармадон. Для получения количественных величин по дальнодействию, времени задержки по отношению к экстремуму аномалии, данных, в силу короткого времени мониторинга и количества землетрясений, недостаточно. Рассмотрим конкретные примеры. На рисунке 5 приведен фрагмент кривой радонового мониторинга 2018 года на станции Кармадон.

На рисунке 5 чётко выделяется аномалия ОАР с экстремумом 25.10.18 и показано землетрясение на расстоянии 82 километров от станции мониторинга. K в данном случае равно 2,61. Событие отразилось после окончания аномалии, что характерно для событий ближней зоны и расстояние до эпицентра это подтверждает.

На рисунке 6 показано землетрясение с K=2,55, которое произошло на расстоянии 53 км от точки мониторинга (что соответствует ближней зоне). Землетрясению

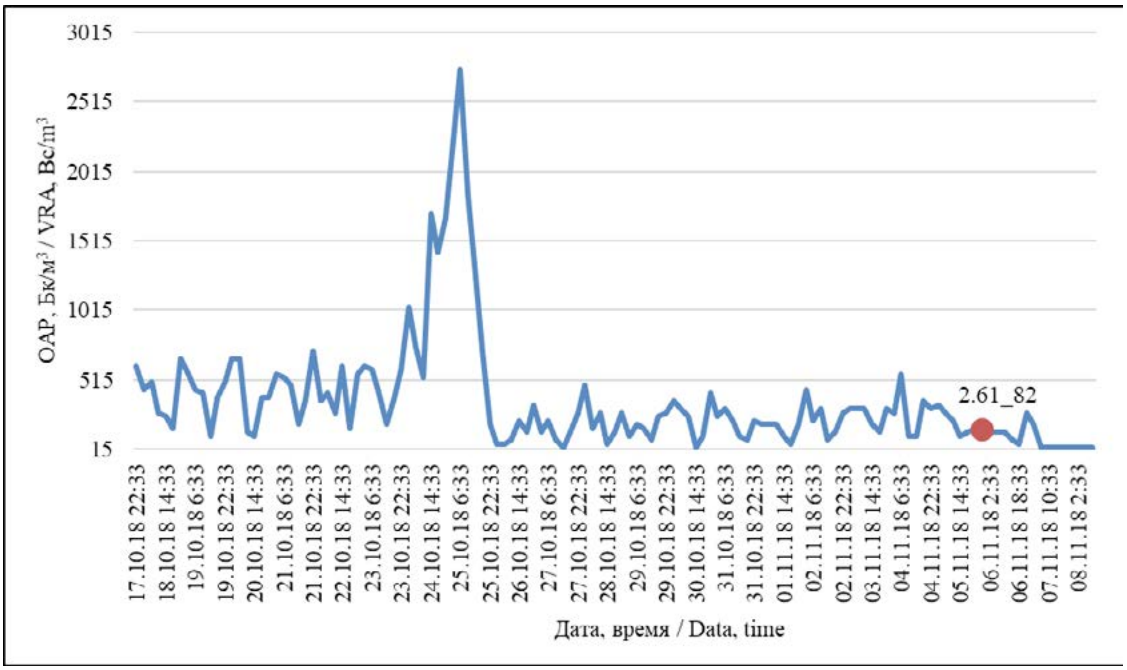


Рис. 5. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга /

Fig. 5. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station

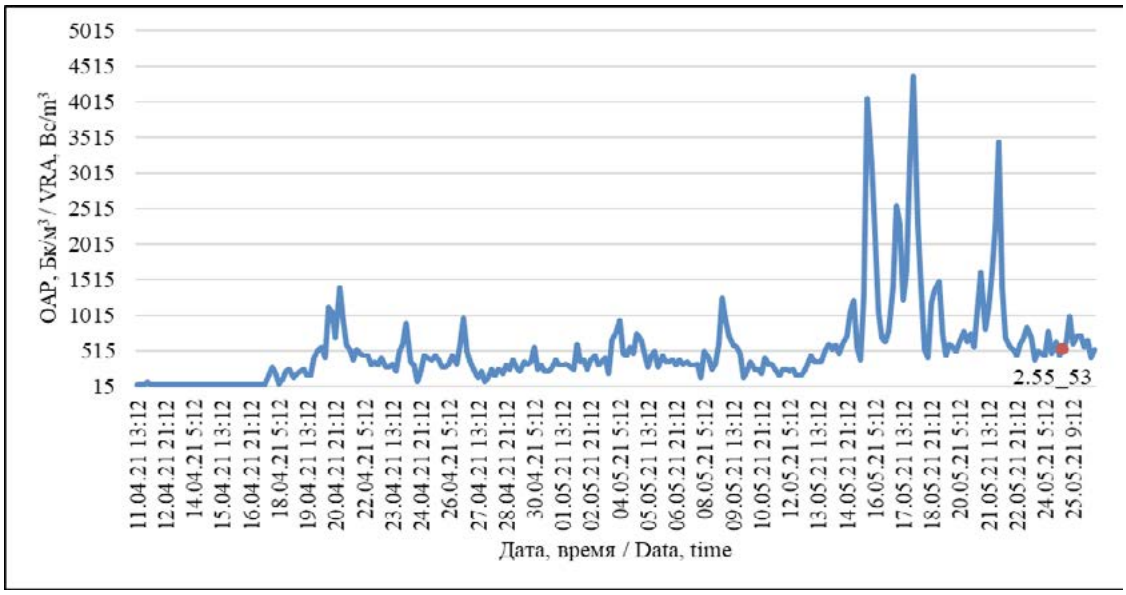


Рис. 6. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга /

Fig. 6. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station.

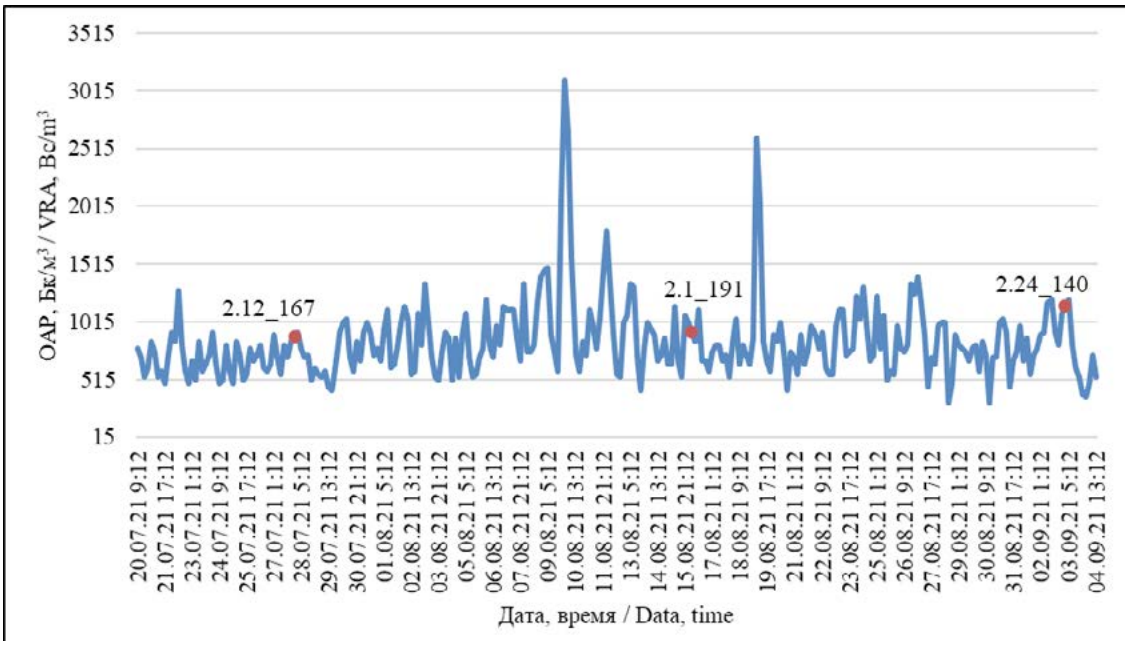


Рис. 7. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга /

Fig. 7. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station

предшествовала продолжительная аномалия радона, характерной особенностью которой является наличие трёх пиковых значений, что является особенностью проявления аномалии ОАР для станции Кармадон.

На рисунке 7 две аномалии и три землетрясения. Первому землетрясению с K=2,12 радоновая аномалия не предшествовала. Это может быть связано с неидеальными условиями измерений, так как амплитуда аномалии не соответствует методике выделения. Процесс подготовки землетрясения с K=2,1 сопровождала аномалия, экстремум которой проявился 10.08.21. Данное событие появилось ближе к концу аномалии, и его можно отнести к пограничной зоне между «промежуточной» и «дальней». Землетрясению с K=2,24 соответствует аномалия, которая достигла максимальных значений 19.08.21. Это событие проявилось на фоновых значениях после окончания аномалии, и может относиться к пограничной зоне, между «ближней» и «промежуточной».

Каждый из рассмотренных примеров сопоставления аномалий ОАР и последующих землетрясений в условиях Северного Кавказа, показывает, что разработанная ранее методика, нашедшая успешное применение в условиях Южных Курил, может быть полезна и при иных геолого-тектонических условиях.

Выводы

Результаты радонового мониторинга на станции Кармадон показывают, что поведение кривой ОАР перед землетрясениями ближней зоны не противоречит закономерностям, установленным для Южно-Курильского региона.

За время радонового мониторинга на станции Кармадон не наблюдалось событий, чётко относимых к дальней зоне. Все отмеченные события фактически можно отнести к ближней и промежуточной зонам.

Подтверждение ранее выявленных закономерностей для событий ближней зоны может свидетельствовать о достоверности полученных характеристик поведения ОАР при подготовке землетрясений и о применимости их для интерпретации данных радонового мониторинга в регионах с геолого-тектоническими условиями отличными от Южных Курил. Отмечается меньшая продолжительность аномалий ОАР для условий Кармадона по сравнению с Южными Курилами.

Для получения количественных характеристик времени проявления землетрясений после экстремума аномалии ОАР и размеров ближней и дальней зон необходимо дальнейшее проведение мониторинга.

Литература

1. Бирюлин С. В., Козлова И. А., Юрков А. К. Связь между аномалиями объемной активности радона и процессом подготовки землетрясений (на примере Южных Курил). // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – № 4 (64). – С. 62-70. DOI:10.21440/2307-2091-2021-4-62-70

2. Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К., Николаев В. Н. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах. // Доклады РАН. – 1996. – Т. 345. № 2. – С. 245-248.

3. Добровольский И. П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ОИФЗ АН СССР, 1991. – 217 с.

4. Козлова И. А., Бирюлин С. В., Юрков А. К. Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений. // Литосфера. – 2021. – № 5. – С. 724-733. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733

5. Любушин А. А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам. // Геофизические процессы и биосфера. – 2011. – Т. 10. № 1. – С. 9-35.

6. Письменный А. Н., Горбачев С. А., Вертий С. Н. и др. ГДП-200 в пределах восточного сегмента зоны Главного хребта Центрального Кавказа (листы К-38-IX, XV). – Ессентуки: ФГУГП «Кавказгеолсъемка», 2006.

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

8. Уткин В. И., Мамыров Э., Кан М. В., Кривашеев С. В., Юрков А. К., Косякин И. И., Шишканов А. Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане. //Физика Земли. – 2006. –№ 9. – С. 61-70.

9. Уткин В. И., Юрков А. К. Прогноз землетрясений. Есть ли выход из тупика? // Пятые научные чтения Ю. П. Булашевича. Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. – 2009. – С. 492-499.

10. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.

11. Шемпелев А. Г., Кухмазов С. У., Чотчаев Х. О., Невский Л. Н. Структура Большого Кавказа – результат пологого надвига земной коры Скифской плиты на консолидированную корумикроплит Южного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – Т. 5 (4). – С. 129-146. DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55308

12. Юрков А. К., Демежко Д. Ю., Уткин В. И. Об информативности температурного мониторинга в скважинах при изучении тектонического режима. // Уральский геофизический вестник. – 2011. – № 1 (18). – С. 45-52.

13. Январёв Г. С. Новейшая структура и геодинамика Западного Предкавказья (на основе дешифрирования космоснимков). // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (4). – С. 30-40. DOI: 10.46698/VNC.2020.55.16.002

14. Ambrosino F., De Cesare W., Roca V., Sabbarese C., & Iop. Mathematical and geophysical methods for searching anomalies of the Radon signal related to earthquakes. // Journal of Physics Conference Series [9th young researcher meeting]. 9th Young Researcher Meeting, (2018, Jul 10-13), Univ Salerno, Salerno, Italy. – 2018.

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

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

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

18. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. // Journal of Engineering Science and Technology. – 2020. – Vol. 15 (3). – pp. 1787-1798.

19. Fu S., Tatsuoka F. Soil lique faction during Haicheng and Tangshan earthquakes in China: a review. // Soils and Foundations. – 1984. – pp. 11-29.

20. Fu C.C., Lee L.C. Continuous Monitoring of Fluid and Gas Geochemistry for Seismic Study in Taiwan. // Pre-Earthquake Processes: a Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies. – 2018. – Vol. 234. – pp. 199-218.

21. Fu C. C., Lai C. W., Yang T. F., Hilton D. R., Chen C. H., Walia V., Lee L. C. An Automatic System for Continuous Monitoring and Sampling of Groundwater Geochemistry in Earthquake-Prone Regions of SW Taiwan. // Frontiers in Earth Science. – 2021. – No. 9. – Article 635913. DOI: 10.3389/feart. 2021.635913.

22. Ghosh D., Deb A., Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. // J. Appl. Geophys. – 2009. – Vol. 69 (2). – pp. 67-81. DOI:10.1016/j. jappgeo. 2009.06.001

23. Giuliani G. G., Totani G., Eusani G., Totani F., Giuliani R. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin. // Abstr. AGU Fall Meeting, December 14-18, 2009. – San-Francisco. – 2009. – Vol. 1. – pp. 3.

24. Haider T., Barkat A., Hayat U., Ali A., Awais M., Alam A., Shah M.A. Identification of radon anomalies induced by earthquake activity using intelligent systems. // Journal of Geochemical Exploration. – 2021. – Vol. 222. – Article 106709.

25. Rafique M., Tareen A.D. K., Mir A.A., Nadeem M.S. A., Asim K.M., & Kearfott K. J. Delegated Regressor, A Robust Approach for Automated Anomaly Detection in the Soil Radon Time Series Data. // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10 (1). – Article 3004. DOI: 10.1038/s41598-020-59881-9

26. Kawabata K., Sato T., Takahashi H.A., Tsunomori F., Hosono T., Takahashi M., Kitamura Y. Changes in groundwater radon concentrations caused by the 2016 Kumamoto earthquake. // Journal of Hydrology. – 2020. – Vol. 584. – Article 124712. DOI: 10.1016/j. jhydrol. 2020.124712

27. Kim J.W., Joo H.Y., Kim R., Moon J.H. Investigation of the relationship between earthquakes and indoor radon concentrations at a building in Gyeongju, Korea. // Nucl. Eng. Technol. – 2018. – Vol. 50 (3). – pp. 512-518. DOI: 10.1016/j. net. 2017.12.010

28. Kumar A., Walia V., Lin S. J., & Fu C. C. Real-time database for geochemical earthquake precursory research. // Natural Hazards. – 2020. – Vol. 104 (2). – pp. 1359-1369. DOI: 10.1007/s11069-020-04220-4

29. Kuo T., Chen W., Ho C. Anomalous decrease in groundwater radon before 2016 Mw 6.4 Meinong earthquake and its application in Taiwan. // Appl. Radiat. Isot. – 2018. – Vol. 136. – pp. 68-72 DOI: 10.1016/j. apradiso. 2018.02.015.

30. Mir A. A., Celebi F. V., Rafique M., Hussain L., Almasoud A. S., Alajmi M., Hilal A. M. An Improved Imputation Method for Accurate Prediction of Imputed Dataset Based Radon Time Series. // Ieee Access. – 2022. – Vol. 10. – pp. 20590-20601. DOI: 10.1109/access. 2022.3151892

31. Przylibski T.A., Kaczorowski M., Fijalkowska-Lichwa L., Kasza D., Zdunek R., & Wronowski R. Testing of Rn-222 application for recognizing tectonic events observed on water-tube tiltmeters in underground Geodynamic Laboratory of Space Research Centre at Ksiaz (the Sudetes, SW Poland). // Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – Vol. 163. – Article 108967. DOI: 10.1016/j. apradiso. 2019.108967.

32. Sabbarese C., Ambrosino F., Chiodini G., Giudicepietro F., Macedonio G., Caliro S., Roca V. Continuous radon monitoring during seven years of volcanic unrest at Campi Flegrei caldera (Italy). // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10 (1). – Article 9551. DOI: 10.1038/s41598-020-66590-w

33. Sahoo S.K., Katlamudi M., Barman C., & Lakshmi G.U. Identification of earthquake precursors in soil radon-222 data of Kutch, Gujarat, India using empirical mode decomposition based Hilbert Huang Transform. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol. 222. – Article 106353. DOI: 10.1016/j. jenvrad. 2020.106353

34. Singh S., Jaishi H.P., Tiwari R.P., & Tiwari R.C. Time Series Analysis of Soil Radon Data Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network in Seismic Precursory Studies. // Pure and Applied Geophysics. – 2017. – Vol. 174 (7). – pp. 2793-2802. DOI: 10.1007/s00024-017-1556-4

35. Tareen A.D. K., Asim K.M., Kearfott K.J., Rafique M., Nadeem M.S. A., Iqbal T., Rahman S.U. Automated anomalous behaviour detection in soil radon gas prior to earthquakes using computational intelligence techniques. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 203. – pp. 48-54. DOI:10.1016/j. jenvrad. 2019.03.003

36. Toader V.E., Moldovan I.A., Marmureanu A., & Ionescu C. Detection of events in a multidisciplinary network monitoring vrancea area. // Romanian Journal of Physics. – 2016. – Vol. 61 (7-8). – pp. 1437-1449.

37. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review. // European Physical Journal-Special Topics. – 2015. – Vol. 224 (4). – pp. 611-627. DOI: 10.1140/epjst/e2015-02395-9

38. Yakut H., Tabar E., Yildirim E., Zenginerler Z., Ertugral F., & Demirci N. Soil gas radon measurement around fault lines on the western section of the North Anatolian fault zone in Turkey. // Radiation Protection Dosimetry. – 2017. – Vol. 173 (4). – pp. 405-413. DOI: 10.1093/rpd/ncw009.

39. Ye Q., Singh R.P., He A., Ji S., Liu C. Characteristic behavior of water radon associated with Wenchuan and Lushan earthquakes along Longmenshan fault. // Radiat. Meas. – 2015. – Vol. 76. – pp. 44-53. DOI: 10.1016/j. radmeas. 2015.04.001.

40. Zhao Y.X., Liu Z.F., Li Y., Hu L., Chen Z., Sun F.X., & Lu C. A case study of 10 years groundwater radon monitoring along the eastern margin of the Tibetan Plateau and in its adjacent regions: Implications for earthquake surveillance. // Applied Geochemistry. – 2021. – Vol. 131. – Article 105014. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2021.105014

41. Zmazek B., Zivcic M., Todorovski L., Dzeroski S., Vaupotic J., Kobal I. Radon in soil gas: How to identify anomalies caused by earthquakes. // Applied Geochemistry. – 2005. – Vol. 20 (6). – pp. 1106-1119. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2005.01.014

References

1. Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. relationship between anomalies of radon volume activity and the process of earthquake preparation (through the example of theSouthern Kuril Islands). News of the Ural State Mining University. 2021. Vol. 4 (64). pp. 62-70. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-4-62-70 (In Russ.)

2. Bulashevich Y.P., Utkin V.I., Yurkov A.K., Nikolaev V.N. Changes in radon concentration due to mining impacts in deep mines. RAS Reports. 1996. Vol. 345. No. 2. pp. 245-248. (In Russ.)

3. Dobrovolsky I.P. Theory of preparation of a tectonic earthquake. Moscow: OIFZ of the USSR Academy of Sciences. 1991. 217 p. (In Russ.)

4. Kozlova I.A., Biryulin S.V., Yurkov A.K. Occurrence of anomalies in soil radon volume activity before tectonic earthquakes. Lithosphere (Russia). 2021. Vol. 21 (5). pp. 724-733. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733 (In Russ.)

5. Lyubushin A.A. Seismic disaster in Japan on March 11, 2011. Long-term forecast for low-frequency microseisms. Geophysical processes and biosphere. 2011. Vol. 10. No. 1. pp. 9-35. (In Russ.)

6. Pismennyj A.N., Gorbachev S.A., Vertij S.N. et al. GDP200 within the eastern segment of the zone of the Main Ridge of the Central Caucasus (sheets K-38-IX, XV). Essentuki: FGUGP “Kavkazgeolsemka”, 2006. (In Russ.)

7. Rogozhin E.A., Rejsner G.I., Ioganson L.I. Assessment of the seismic potential of the Greater Caucasus and the Apennines by independent methods. Geophysics and Mathematics XXI. Modern mathematical and geological models in the problems of applied geophysics. Moscow: OIFZ RAS, 2001. pp. 279-299. (In Russ.)

8. Utkin V.I., Mamyrov E., Kan M.V., Krivasheev S.V., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N. Radon monitoring during the study of the preparation process of a tectonic earthquake in the Northern Tien Shan. Earth Physics. 2006. No. 9. pp. 61-70. (In Russ.)

9. Utkin V.I., Yurkov A.K. Earthquake forecast. Is there a way out of the impasse? The fifth scientific readings of Y.P. Bulashevich. Geodynamics. Deep structure. The thermal field of the Earth. Interpretation of geophysical fields. 2009. pp. 492-499. (In Russ.)

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

11. Shempelev A.G., S.U. Khuhmazov, H.O. Chotchaev, L.N. Nevski Structure of the

Large Caucasus – the result of the gently sloping thrust of the Scythian plate Earth's crust on the consolidated crust of the Transcaucasian micro-plates. Geology and Geophysics of Russian South. 2015. Vol. 5. No. 4. pp. 129-146. DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55308 (in Russ.)

12. Yurkov A.K., Demezhko D. YU., Utkin V.I. On the informativeness of temperature monitoring in wells in the study of the tectonic regime. Ural geophysical bulletin. 2011. Vol. 1 (18). pp. 45-52. (In Russ.)

13. Yanvarev G.S. Latest structure and geodynamics of Western Caucasus (based on decoding of satellite images). Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 30-40. DOI: 10.46698/VNC.2020.55.16.002. (in Russ.)

14. Ambrosino F., De Cesare W., Roca V., Sabbarese C., & Iop. Mathematical and geophysical methods for searching anomalies of the Radon signal related to earthquakes. Journal of Physics Conference Series [9th young researcher meeting]. 9th Young Researcher Meeting, (2018, Jul 10-13), Univ Salerno, Salerno, Italy. 2018.

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

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

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

18. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. Journal of Engineering Science and Technology. 2020. Vol. 15 (3). pp. 1787-1798.

19. Fu S., Tatsuoka F. Soil lique faction during Haicheng and Tangshan earthquakes in China: a review. Soils and Foundations. 1984. pp. 11-29.

20. Fu C.C., Lee L.C. Continuous Monitoring of Fluid and Gas Geochemistry for Seismic Study in Taiwan. Pre-Earthquake Processes: a Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies. 2018. Vol. 234. – pp. 199-218.

21. Fu C.C., Lai C.W., Yang T.F., Hilton D.R., Chen C.H., Walia V., Lee L.C. An Automatic System for Continuous Monitoring and Sampling of Groundwater Geochemistry in Earthquake-Prone Regions of SW Taiwan. Frontiers in Earth Science. 2021. No. 9. Article 635913. DOI: 10.3389/feart. 2021.635913.

22. Ghosh D., Deb A., Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. J. Appl. Geophys. 2009. Vol. 69 (2). pp. 67-81. DOI:10.1016/j. jappgeo. 2009.06.001

23. Giuliani G.G., Totani G., Eusani G., Totani F., Giuliani R. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin. Abstr. AGU Fall Meeting, December 14-18, 2009. San-Francisco. 2009. Vol. 1. pp. 3.

24. Haider T., Barkat A., Hayat U., Ali A., Awais M., Alam A., Shah M.A. Identification of radon anomalies induced by earthquake activity using intelligent systems. Journal of Geochemical Exploration. 2021. Vol. 222. Article 106709.

25. Rafique M., Tareen A.D. K., Mir A.A., Nadeem M.S. A., Asim K.M., & Kearfott K.J. Delegated Regressor, A Robust Approach for Automated Anomaly Detection in the Soil Radon Time Series Data. Scientific Reports. 2020. Vol. 10 (1). Article 3004. DOI: 10.1038/ s41598-020-59881-9

26. Kawabata K., Sato T., Takahashi H.A., Tsunomori F., Hosono T., Takahashi M., Kitamura Y. Changes in groundwater radon concentrations caused by the 2016 Kumamoto earthquake. Journal of Hydrology. 2020. Vol. 584. Article 124712. DOI: 10.1016/j. jhydrol. 2020.124712

27. Kim J.W., Joo H.Y., Kim R., Moon J.H. Investigation of the relationship between

earthquakes and indoor radon concentrations at a building in Gyeongju, Korea. Nucl. Eng. Technol. 2018. Vol. 50 (3). pp. 512-518. DOI: 10.1016/j. net. 2017.12.010

28. Kumar A., Walia V., Lin S. J., & Fu C. C. Real-time database for geochemical earthquake precursory research. Natural Hazards. 2020. Vol. 104 (2). pp. 1359-1369. DOI: 10.1007/s11069-020-04220-4

29. Kuo T., Chen W., Ho C. Anomalous decrease in groundwater radon before 2016 Mw 6.4 Meinong earthquake and its application in Taiwan. Appl. Radiat. Isot. 2018. Vol. 136. pp. 68-72 DOI: 10.1016/j. apradiso. 2018.02.015

30. Mir A. A., Celebi F. V., Rafique M., Hussain L., Almasoud A. S., Alajmi M., Hilal A. M. An Improved Imputation Method for Accurate Prediction of Imputed Dataset Based Radon Time Series. Ieee Access. 2022. Vol. 10. pp. 20590-20601. DOI: 10.1109/access. 2022.3151892

31. Przylibski T.A., Kaczorowski M., Fijalkowska-Lichwa L., Kasza D., Zdunek R., & Wronowski R. Testing of Rn-222 application for recognizing tectonic events observed on water-tube tiltmeters in underground Geodynamic Laboratory of Space Research Centre at Ksiaz (the Sudetes, SW Poland). Applied Radiation and Isotopes. 2020. Vol. 163. Article 108967. DOI: 10.1016/j. apradiso. 2019.108967.

32. Sabbarese C., Ambrosino F., Chiodini G., Giudicepietro F., Macedonio G., Caliro S., Roca V. Continuous radon monitoring during seven years of volcanic unrest at Campi Flegrei caldera (Italy). Scientific Reports. 2020. Vol. 10 (1). Article 9551. DOI: 10.1038/s41598-020-66590-w

33. Sahoo S. K., Katlamudi M., Barman C., & Lakshmi G. U. Identification of earthquake precursors in soil radon-222 data of Kutch, Gujarat, India using empirical mode decomposition based Hilbert Huang Transform. Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 222. Article 106353. DOI: 10.1016/j. jenvrad. 2020.106353

34. Singh S., Jaishi H. P., Tiwari R. P., & Tiwari R. C. Time Series Analysis of Soil Radon Data Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network in Seismic Precursory Studies. Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174 (7). pp. 2793-2802. DOI: 10.1007/s00024-017-1556-4

35. Tareen A. D. K., Asim K. M., Kearfott K. J., Rafique M., Nadeem M. S. A., Iqbal T., Rahman S. U. Automated anomalous behaviour detection in soil radon gas prior to earthquakes using computational intelligence techniques. Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 203. pp. 48-54. DOI: 10.1016/j. jenvrad. 2019.03.003

36. Toader V. E., Moldovan I. A., Marmureanu A., & Ionescu C. Detection of events in a multidisciplinary network monitoring vrancea area. Romanian Journal of Physics. 2016. Vol. 61 (7-8). pp. 1437-1449.

37. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review. European Physical Journal-Special Topics. 2015. Vol. 224 (4). pp. 611-627. DOI:10.1140/epjst/e2015-02395-9

38. Yakut H., Tabar E., Yildirim E., Zenginerler Z., Ertugral F., & Demirci N. Soil gas radon measurement around fault lines on the western section of the North Anatolian fault zone in Turkey. Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 173 (4). pp. 405-413. DOI: 10.1093/rpd/ncw009.

39. Ye Q., Singh R. P., He A., Ji S., Liu C. Characteristic behavior of water radon associated with Wenchuan and Lushan earthquakes along Longmenshan fault. Radiat. Meas. 2015. Vol. 76. pp. 44-53. DOI: 10.1016/j. radmeas. 2015.04.001.

40. Zhao Y. X., Liu Z. F., Li Y., Hu L., Chen Z., Sun F. X., & Lu C. A case study of 10 years groundwater radon monitoring along the eastern margin of the Tibetan Plateau and in its adjacent regions: Implications for earthquake surveillance. Applied Geochemistry. 2021. Vol. 131. Article 105014. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2021.105014

41. Zmazek B., Zivcic M., Todorovski L., Dzeroski S., Vaupotic J., Kobal I. Radon in soil gas: How to identify anomalies caused by earthquakes. Applied Geochemistry. 2005. Vol. 20 (6). pp. 1106-1119. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2005.01.014

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК: 551.24
DOI: 10.46698/VNC.2022.70.62.004

Оригинальная статья

Тектоника горы Собер-Баш (Северо-Западный Кавказ)

В. И. Попков[1], В. В. Юдин[2], И. В. Попков[1], З. А. Толоконникова[1]

[1]Кубанский государственный университет, Россия, 350059, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: geoskubsu@mail.ru;

[2]Крымская Академия наук, Россия, Республика Крым, 295011, г. Симферополь, ул. Севастопольская, д. 22/2

Статья поступила: 24.01.2022, после рецензирования: 23.02.2022, принята к публикации: 03.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Для территории складчато-надвиговых сооружений Северо-Западного Кавказа длительное время преобладали представления о его вертикально-разломно-блоковой структуре. В последнее время появляется все больше публикаций, в которых описываются дислокации, образовавшиеся в обстановке тангенциального сжатия. Однако эти построения не всегда опираются на надежную фактологическую базу или же они не палинспастичны, геометрически не достоверны. В нашей работе рассматривается строение г. Собер-Баш, где обнаружены убедительные свидетельства проявления мощных горизонтальных тектонических перемещений в регионе. **Цель исследований.** Детальное изучение дислокаций, обнаженных на юго-западном склоне г. Собер-Баш. Выяснение их генезиса. **Методы исследования.** Сбор материалов по рассматриваемому геологическому объекту в ходе полевых наблюдений. Документирование дислокаций, фотографирование крупных фрагментов обнажения и его отдельных деталей. Отбор образцов горных пород из выше- и нижележащих недеформированных толщ, а также из отдельных складок внутри зоны деформаций и тонкообломочного матрикса, заполняющего пространство между ними. Последующие микропалеонтологические исследования в лабораторных условиях. Для выяснения тектонической природы дислокаций проведен их структурный анализ и сопоставление с ранее изученными нами структурами Крыма и Северо-Западного Кавказа. Использованы материалы космической съемки, позволившие уточнить некоторые принципиальные вопросы тектоники региона и непосредственно изученного объекта. **Результаты работы**. В обнажении на юго-западном склоне г. Собер-Баш обнаружена зона аномально сложных тектонических деформаций. Подстилающие ее отложения представлены горизонтально залегающими мергелями, известняками, песчаниками. Перекрывающие слои залегают субпараллельно подстилающим, состоят из мергелей с тонкими прослоями глины и песчаника. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что зона тектонических деформаций является крупным послойным срывом в одновозрастных породах, расположенным в основании пологого тектонического покрова. Гора Собер-Баш интерпретируется нами как тектонический останец (клипп). Значительная толщина зоны деформаций (5 м) указывает на масштабность горизонтальных тектонических перемещений. Морфология дислокаций говорит о движении аллохтона в северо-западном направлении. Сам разрез можно считать тектонотипическим для складчато-надвиговых дислокаций, образующихся при послойных срывах в обстановке тангенциального сжатия.

Ключевые слова: дислокации бокового сжатия, складки, надвиги, послойный срыв, тектонический останец.

Для цитирования: Попков В. И., Юдин В. В., Попков И. В., Толоконникова З. А. Тектоника горы Собер-Баш (Северо-Западный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России.* 2022. 12 (1): 51–61. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.62.004.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: 10.46698/VNC.2022.70.62.004

Original paper

Tectonics of the Soberbash Mountain (North-Western Caucasus)

V. I. Popkov[1], V. V. Yudin[2], I. V. Popkov[1], Z. A. Tolokonnikova[1]

[1]Kuban State University, 149 Stavropol str., Krasnodar 350059, Russian Federation, e-mail: geoskubsu@mail.ru;

[2]Krim Academy of Sciences, 22/2 Sevastopolskaya str., Simferopol 295011, Russian Federation, Republic of Crimea

Received: 24.01.2022, after reviewing: 23.02.2022, accepted for publication: 03.03.2022

Abstract: Relevance. For a long time, ideas about its vertical-fault-block structure prevailed for the territory of the folded-thrust structures of the North-Western Caucasus. Recently, there have been more and more publications describing dislocations formed in a tangential compression environment. However, these constructions do not always rely on a reliable factual basis, or they are not palinspastic, geometrically not reliable. In our work, the structure of the city of Soberbash is considered, where convincing evidence of the manifestation of powerful horizontal tectonic movements in the region has been found. **Aim.** Detailed study of dislocations exposed on the southwestern slope of Soberbash. Finding out their genesis. M**ethods.** Collection of materials on the geological object under consideration during field observations. Documenting dislocations, photographing large fragments of the outcrop and its individual details. Sampling of rocks from above and below undeformed strata, as well as from individual folds inside the deformation zone and a thin-block matrix filling the space between them. Subsequent micropaleontological studies in the laboratory. To clarify the tectonic nature of dislocations, their structural analysis and comparison with the previously studied structures of the Crimea and the Northwest Caucasus were carried out. The materials of the satellite survey were used, which made it possible to clarify some fundamental issues of the tectonics of the region and the object directly studied. **Results.** A zone of abnormally complex tectonic deformations was found in the outcrop on the southwestern slope of Soberbash. The underlying sediments are represented by horizontally lying marls, limestones, sandstones. The overlapping layers lie sub-parallel to the underlying, consist of marls with thin layers of clay and sandstone. The conducted studies indicate that the zone of tectonic deformations is a large layer-by-layer breakdown in rocks of the same age, located at the base of a gentle tectonic cover. Mount Sober-Bash is interpreted by us as a tectonic outlier (clip). The significant thickness of the deformation zone (5 m) indicates the scale of horizontal tectonic movements. The morphology of dislocations indicates the movement of allochthon in a north-westerly direction. The section itself can be considered tectonotypic for fold-thrust dislocations formed during layer-by-layer disruptions in a tangential compression environment.

Keywords: dislocations of lateral compression, folds, thrusts, layered breakdown, tectonic outlier.

For citation: Popkov V. I., Yudin V. V., Popkov I. V., Tolokonnikova Z. A. Tectonics of the Soberbash Mountain (North-Western Caucasus). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii =Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 51–61. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.62.004.

Введение

Строение складчатых сооружений Северо-Западного Кавказа на протяжении многих лет рассматривалось преимущественно с позиций фиксизма [Геология…, 1968; Летавин, Перерва, 1987; Перерва, 1981а, б и др.]. В соответствии с этим предполагалась вертикально-разломно-блоковая («клавишная») его структура. Подобные построения можно найти и в некоторых современных публикациях [Доценко,

Моллаев, 2014; Мосякин и др., 2015; Popkov, 2006 и др.]. В последние десятилетия появляется все больше работ, в которых приводятся убедительные свидетельства о широком развитии в регионе структур, образовавшихся в результате тангенциального сжатия [Гиоргобиани, 2020; Попков В.И., Попков И.В., 2017, Юдин, 2011 и др.], что является типичным для всех мобильных поясов [Газеев, Гурбанов, 2020; Юдин, 2013; Borderie et al., 2019; Carola et al., 2015; Jourdon et al., 2020; Li et al., 2012; Roeder et al., 2010; Sobornov, 1996, 2020; Yu et al., 2014; Xu et al., 2004].

Надвиги, тектонические покровы нашли отражение и на последних геологических картах Северо-Западного Кавказа [Гавришев и др., 2019; Земченко и др., 1978; Корсаков и др., 2004; Лаврищев и др., 1999; Снежко и др., 2017]. Однако, все они не допускают палинспастическую реконструкцию, а разрезы структурно не сбалансированы и, соответственно, геометрически не верны (рис. 1). Например, трудно объяснить предлагаемое соотношение на приведенных разрезах вертикальных и субгоризонтальных разрывов. Через них невозможно вывести слои в доскладчатое положение. Кроме того, эти модели не учитывают обратную вергентность структур Северного Предкавказья, в результате чего рядом с надвигами общего сжатия нарисованы нереальные синхронные сбросы (рис. 1-В). Не согласуются такие построения и с имеющимися материалами сейсморазведки, свидетельствующими о надвигании северной части складчато-надвигового сооружения Северо-Западного Кавказа на прилегающий к нему с севера Западно-Кубанский тыловой прогиб, предопределяя его резко выраженное асимметричное строение [Popkov, 2006; Попков В.И., Попков И.В., 2017].

Несомненно, что подобные построения и выводы требуют существенной корректировки и привлечения более доказательной фактологической базы. В этом отношении заслуживают внимания дислокации, обнаженные на юго-западном склоне г. Собер-Баш, а сам разрез можно считать тектонотипическим.

Методы исследований

Материалы по рассматриваемому геологическому объекту собраны в ходе полевых наблюдений осенью 2021 г. Произведено фотографирование как крупных фрагментов обнажения, так и его отдельных деталей. Отобраны образцы горных пород из выше- и нижележащих недеформированных толщ, а также из отдельных складок внутри зоны деформаций и тонкообломочного матрикса, заполняющего пространство между ними. Затем в лабораторных условиях были выполнены микропалеонтологические исследования.

Для выяснения тектонической природы дислокаций проведен их структурный анализ и сопоставление с ранее изученными нами структурами Крыма и Северо-Западного Кавказа. Критически проанализированы результаты предшествующих геолого-съемочных работ [Гавришев и др., 2019; Корсаков и др., 2004; Лаврищев и др., 1999; Снежко и др., 2017]. Для понимания общей структуры региона приведенные в этих работах геологические профили переводились в единый горизонтальный и вертикальный масштабы (рис. 1-Б, В), поскольку в оригиналах вертикальный масштаб на них был увеличен относительно горизонтального до десяти раз. Последнее, естественно, очень сильно искажает реальную структуру. При изучении были использованы материалы космической съемки, позволившие уточнить некоторые принципиальные вопросы тектоники региона и непосредственно изученного объекта.

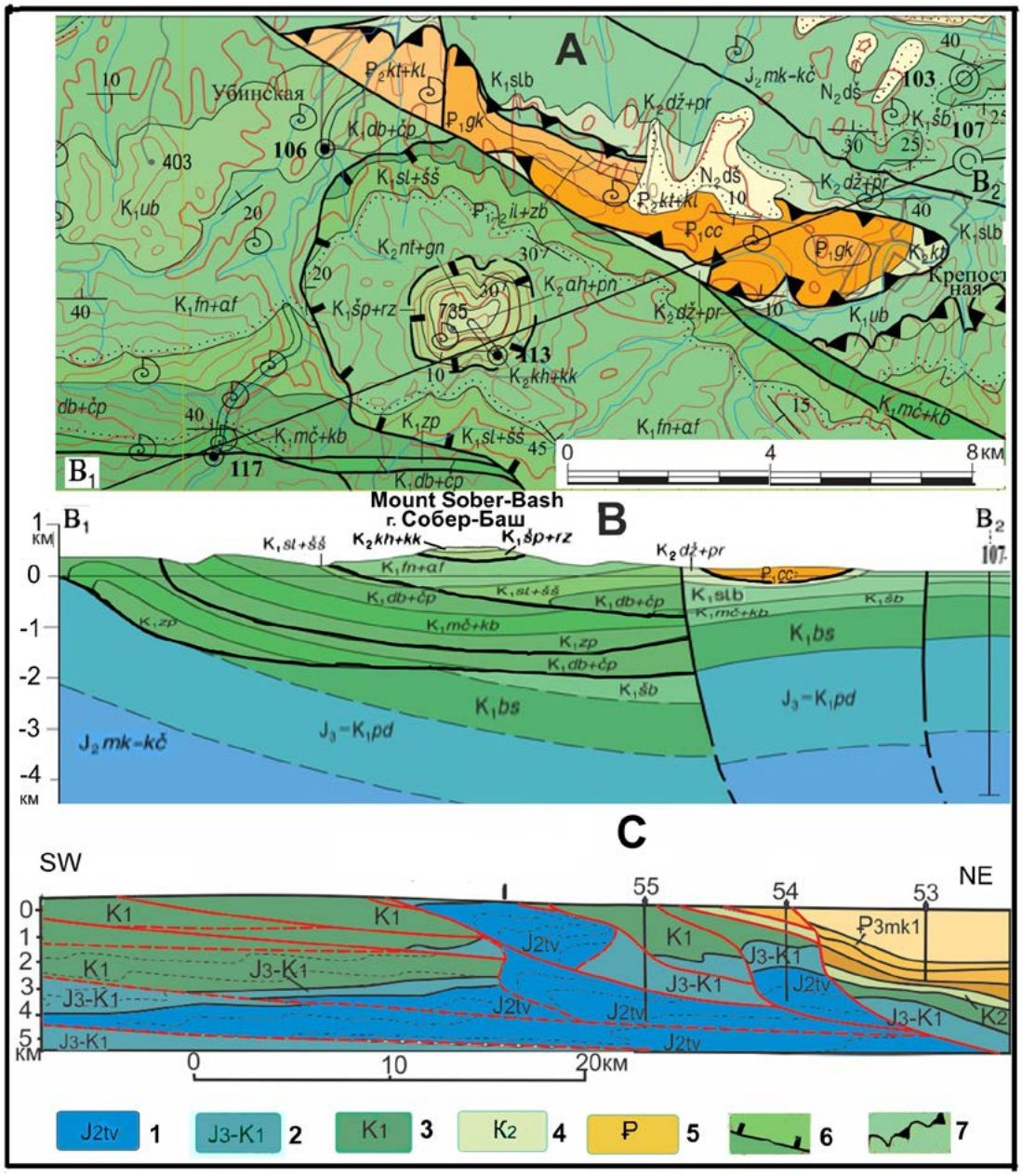


Рис. 1. Предшествующие геологические модели района:
А – фрагмент геологической карты, А и В – разрезы, составленные [Гавришев и др., 2019; Корсаков и др., 2004; Лаврищев и др., 1999; Снежко и др., 2017]; С – разрез, в интерпретации В. А. Лаврищева и А. А. Шейкова, к последней геологической карте 2019 г. [Гавришев и др., 2019]. Расположен в 14 км к востоку от г. Собер-Баш. (Оба разреза приведены В. В. Юдиным к единому вертикальному и горизонтальному масштабам). Условные обозначения: 1 – среднеюрские свиты (алевролиты, песчаники, туфы, конгломераты); 2 – свиты средней-верхней юры (пестроцветные аргиллиты, известняки, мергели); 3 – свиты нижнего мела (глины, песчаники, алевролиты); 4 – свиты верхнего мела (флиш из песчаников, глин и известняков); 5 – свиты палеогеновых флишоидных толщ; 6 – надвиги; 7 – шарьяжи (на геологической карте) /
Fig. 1. Previous geological models of the area:
A, B is a fragment of a geological map and C is a section compiled by S. G. Korsakov et al., 2004; In- section, as interpreted by V. A. Lavrichev and A. A. Sheikov, to the latest geological map of 2019. It is located 14 km east of Soberbash. (Both sections are given by V. V. Yudin to a single vertical and horizontal scale). Symbols: 1 – Middle Jurassic formations (siltstones, sandstones, tuffs, conglomerates); 2 – formations of the Middle-Upper Jurassic (variegated mudstones, limestones, marls); 3 – formations of the Lower Cretaceous (clays, sandstones, siltstones); 4 – formations of the Upper Cretaceous (flysch of sandstones, clays and limestones); 5 – formations of Paleogene flyschoid strata; 6 – thrusts; 7- sharyazhi (on the geological map)

Результаты исследований и их обсуждение

Гора Собер-Баш располагается на водоразделе между долинами рек Убин и Афипс на северном макросклоне Северо-Западного Кавказа. Массив трапециевидной формы, с крутыми склонами и плоской вершиной (рис. 2) размерами 1х0,5 км и высотой до 735,8 м. В тектоническом отношении гора приурочена к одноименной крупной синклинали, входящей в состав Абино-Гунайской структурной подзоны.

Собербашская синклиналь простирается в северо-западном направлении на расстояние 13 км (см. рис. 1). Азимут простирания оси складки северо-западный, погружение шарнира на юго-восток под углом 20°. Структура имеет слабо асимметричную форму с более крутым (до 40°) южным и пологим (15–30°) северным крыльями. Выполнена она отложениями нижнемелового возраста (афипская и убинская свиты) и четко оконтуривается по окаймляющим ее отложениям фанарской свиты. Непосредственно на вершине г. Собер-Баш сохранились от размыва отложения альба, сенон-турона и маастрихта (см. рис. 1-А, В).

Обнажение, предлагаемое как тектонотипическое, расположено на юго-западном склоне г. Собер-Баш. Оно имеет северо-западное простирание и координаты 44º41’23» С, 38º33’47» В. Высота выхода коренных пород – 60 м, длина в основании – 250 м (рис. 3).

Крутой склон обнажения представляет собой стенку срыва крупного оползня, размерами 400х500 м, что хорошо видно на аэрокосмических материалах (см. рис. 3). Смещение продолжается и поныне, о чем свидетельствует пьяный лес на залесенном склоне тела оползня.

В обнажении на абсолютной высоте 545 м обнаружена зона аномально сложных тектонических деформаций шириной около 5 м. Подстилающие отложения представлены горизонтально залегающими мергелями, известняками, песчаниками. Перекрывающие слои залегают субпараллельно подстилающим, состоят из мергелей с тонкими прослоями глины и песчаника.

Рис. 2. Гора Собер-Баш. Вид с севера на юг /
Fig. 2. Mount Sober-Bash. View from north to south

Рис. 3. Общий вид обнажения на юго-западном склоне г. Собер-Баш /
Fig. 3. General view of the outcrop on the south-western slope of Sober-Bash

Дислокации коренных пород в обнажении явно не гравигенные, а эндогенные. Об этом свидетельствует концентрический тип принадвиговых складок, в том числе с крутыми шарнирами. В основном же шарниры лежачих складок субгоризонтальные, что говорит об их принадвиговом генезисе (рис. 4).

Незначительное изменение мощностей пластов отмечается только в некомпетентных глинистых глауконитовых песках. Слои известняков и мергелей почти неизменны даже в пережатых складках (см. рис. 4). В целом здесь присутствуют типичные признаки принадвиговых дислокаций, характерные для флишевых толщ Крыма и Кавказа [Юдин, 2011].

Наблюдаются локальные круто падающие шарниры, характерные для нейтральных присдвиговых складок и для зон сдвиго-надвигов (рис. 5). Такие складки присутствуют в основании обнажения и имеют неясную ассоциацию с чисто надвиговыми. Сдвиговые смещения подтверждаются зеркалами скольжения в ограничениях пластов и отдельных кальцитовых жилах.

Ядра изоклинальных принадвиговых складок сложены некомпетентными породами. Это свидетельствует о послойном срыве по ним с формированием «смя-

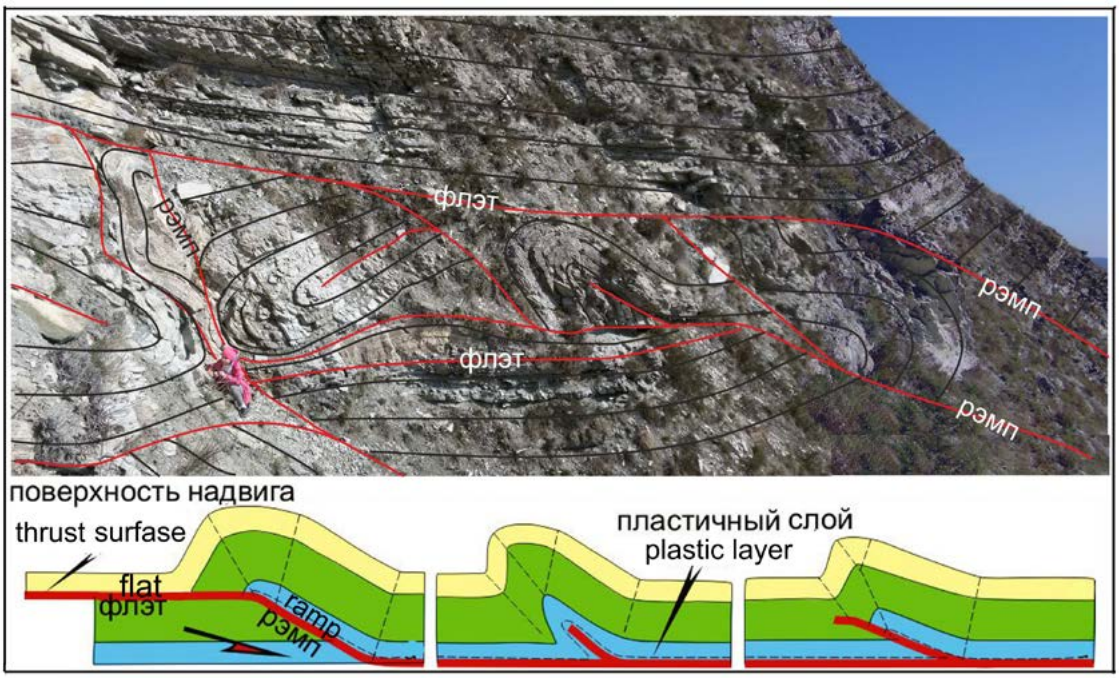


Рис. 4. Складки послойных и секущих надвигов в обнажении и в модели по [Юдин, 2013] /
Fig. 4. General view of the outcrop on the southwestern slope of Sober-Bash

Рис. 5. Присдвиговая складка с крутопадающим шарниром /
Fig. 5. A sliding fold with a steeply falling hinge

тия одного слоя». Поэтому пережатые ядра интерпретируются нами как сложенные сместители надвигов. Пространство между складками заполнено обломочным материалом разной размерности.

Общая структура района обнажения представляет собой усложненную надвигами пологую моноклиналь, падающую на ССВ. На склонах горы Собер-Баш пласты верхнего мела образуют четкий пластовый треугольник, который не прослеживается за ее пределами. Подстилающая толща нижнего мела, также моноклинально падает на ССВ, но с несколько большими углами наклона. Она сложена преимущественно породами глинисто- алевролитового состава и формирует грядовый рельеф с более сложной структурой. Между ними присутствует послойный срыв, характерный для Крымско-Кавказского региона [Юдин, 2011, 2013].

Рис. 6. Жила крупнокристаллического кальцита, секущая в поперечном направлении зону дислокаций /
Fig. 6. A vein of coarse-crystalline calcite, cutting in the transverse direction of the dislocation zone

Важным подтверждением эндогенного происхождения дислокаций являются секущие жилы крупнокристаллического телетермального кальцита (рис. 6). В подводно-оползневых дислокациях таких жил нет.

Как отмечалось выше, для проведения микропалеонтологических исследований из различных участков зоны дислокаций, а также подстилающих и перекрывающих ее толщ были отобраны образцы горных пород. В известняках из зоны дислокаций содержатся ядра фораминифер (здесь и далее определения Т. Н. Пинчук): Globigerinelloides sp. cf., Hedbergella sp. cf., Globotruncana sp. cf., Globotruncana aff. marginata (Reuss), Globotruncana aff. rensi (Gand.). В песчаниках обнаружен такой же комплекс ядер фораминифер Globigerinelloides sp. cf., Hedbergella sp. cf., Globotruncana sp. cf. В слабо известковистом песчанике определены обломки спикул губок, игл морских ежей и ядра фораминифер: Eponides aff. moskvini (Keller), Globigerinelloides sp. cf., Hedbergella sp. cf., Globotruncana sp. cf., Bolivina sp.

В выше- и нижележащих недислоцированных толщах обнаружен аналогичный набор микрофауны. По заключению Т. Н. Пинчук возраст вмещающих ее отложений соответствует кампан-маастрихту.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что на юго-западном склоне г. Собер-Баш присутствует мощная зона тектонических деформаций, соответствующая крупному послойному срыву в одновозрастных породах, расположенному в основании пологого тектонического покрова. Гора Собер-Баш интерпретируется нами как тектонический останец (клипп). Значительная толщина зоны деформаций (5 м) указывает на масштабность горизонтальных тектонических перемещений. Морфология дислокаций говорит о движении аллохтона в северо-западном направлении.

Для определения времени формирования тектонического покрова представляет интерес информация, изложенная в статье [Маринин и др., 2011]. В прилегающих районах г. Собер-Баш в обнажениях долины р. Убинка в палеоцен-эоценовых глинах обнаружены олистолиты, состоящие из интенсивно трещиноватых и брекчированных слоистых известняков маастрихта, смятых в мелкие складки с зеркалами и секущими их жилами, не прослеживающихся во вмещающем матриксе. Это дает основание сделать вывод о формировании складчатых и разрывных структур внутри обломков заведомо до попадания их в олистостромовую толщу. Олистолиты маастрихта могут быть сформированы в результате разрушения перемещающегося к северо-западу аллохтона, хотя не исключено, что это кластолиты в составе эндогенного меланжа.

В заключение отметим, что описанные дислокации очень важны как примеры интерпретаций неантиклинальных флэт-рэмповых ловушек углеводородов более крупных размеров, которые выявляются по данным сейсморазведки [Юдин, 2013].

Литература

1. Гавришев В. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Скифская серия. Лист L-37 (Ростов-на-Дону). – СПб: ВСЕГЕИ, 2019.

2. Газеев В. М., Гурбанов А. Г. Раннепалеозойские габброиды архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ): геодинамическая типизация и минерагения. // Геология и

геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 6-22. DOI: 10.46698/VNC.2020.83.87.001

3. Геология СССР. Т. IX. Северный Кавказ. / Гл. ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1968. – 760 с.

4. Гиоргобиани Т.В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №1. – С. 35-42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063

5. Доценко В.В., Моллаев З.Х. Перспективы нефтегазоносности Северо-Западного Кавказа. // Геология, география и глобальная энергия. – 2014. – №1 (52). – С. 91-104.

6. Земченко А.Ф. и др. Геологическая карта СССР, масштаб 1:200000. Сер. Кавказская. Лист L-37-XXVII. – М. – 1978. – 108 с.

7. Корсаков С.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Изд. второе, сер. Кавказская. Лист L – 37 – XXVII, Краснодар. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. – 233 с.

8. Лаврищев В.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Сер. Кавказская. Лист К-37-IV. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 105 с.

9. Летавин А.И., Перерва В.М. Разрывная тектоника и перспективы нефтегазоносности краевой зоны Северо-Западного Кавказа. – М.: Наука, 1987. – 88 с.

10. Маринин А.В., Копаевич Л.Ф., Ступин С.И. Геологическое строение участка долины р. Убинка (Северо-Западный Кавказ). // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2011. – №5 – С. 33-41.

11. Мосякин Ю.А., Астахов С.М., Мосякин А.Ю. Перспективы нефтегазоносности оксфорд-неокомских рифогенных отложений в пределах южного борта Западно-Кубанского прогиба. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. – Т. 10. – №4. – http://www.ngtp. ru/rub/4/40_2015. pdf. DOI: 10.17353/2070-5379/40_2015.

12. Перерва В.М. Перспективы нефтегазоносности и методы выявления зон разрывных структур Северо-Западного Кавказа. // Геология нефти и газа. – 1981а. – №1. – С. 39-43.

13. Перерва В.М. Соотношение рельефа и блоковой структуры краевой зоны северо-западного погружения Большого Кавказа. // Геоморфология. – 1981б. – №3. – С. 72-77.

14. Попков В.И., Попков И.В. Структурно-тектонические предпосылки нефтегазоносности и возможные типы ловушек нефти и газа в складчато-орогенных зонах на примере Северо-Западного Кавказа. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12. №2. – http: www. ngtp. ru/rub/4/14_2017. pdf. ttps://doi. org/10.17353/2070-5379/14_2017.

15. Снежко В.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Скифская серия – Лист L-37 (Ростов-на-Дону). Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017. – 829 с.

16. Юдин В.В. Геодинамика Крыма. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. – 336 с.

17. Юдин В.В. Надвиговые и хаотические комплексы. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2013. – 252 с.

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

19. Carola E., Muñoz J.A. and Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. // Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.). – 2015. DOI 10.1007/s00531-015-1177-z.

20. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L. and Callot J.-P. Topographic and tectonic evolutionof mountain belts controlled by salt thickness and riftarchitecture. // Tectonics. – 2020. – Vol. 39. DOI: 10.1029/2019TC005903.

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

22. Popkov V. I., Imbricate thrust structure of the Northwestern Caucasus, Dokl. Earth Sci, – 2006. – Vol. 411. – No. 2. – pp. 1222-1224. DOI: 10.1134/S1028334X06080137.

23. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. In Goffey G. P., Craig J., Needham T., Scott R. (eds). Hydrocarbons in contractual belts. Geological Society. – London. – 2010. – Vol. 348. – pp. 7 – 31. DOI: 10.1144/sp348.2

24. Sobornov K. O. Lateral variations in structural styles of tectonic wedging in the Northeastern Caucasus, Russia. // Bull. Can. Petrol. Geol. – 1996. – Vol. 44 (2). – pp. 385-399.

25. Sobornov K. O. Structure and development of wedgeshapedthrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. – 2020. – Search and Discovery Article #30654.

26. Yu Y., Tang L., Yang W., Huang T., Qiu N. and Li W. Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. // AAPG Bulletin. – 2014. – Vol. 98. No. 1. – pp. 135-159.

27. Xu Shilin, Lu Xiuxiang, Sun Zhonghua, Pi Xuejun, Liu Luofu, Li Qiming, Xie Huiwen. Kela-2: a major gas field in the Tarim Basin of west China. – Petroleum Geoscience. – Vol. 10. – 2004. – pp. 95-106. DOI: 10.1144/1354-079303-571.

References

1. Gavrishev V.A. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Scythian series. Sheet L-37 (Rostov-on-Don). Saint Petersburg, VSEGEI. 2019. (In Russ.)

2. 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.)

3. Geology of the USSR. Vol. IX. North Caucasus. Ch. ed. A. V. Sidorenko. Moscow. Nedra. 1968. 760 p. (In Russ.)

4. Giorgobiani T. V. Stages, Mechanism and Geodynamics of Formation of the Folded System of the Greater Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 35-42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063 (In Russ.)

5. Dotsenko V. V., Mollaev Z. Kh. Prospects for oil and gas potential in the North-Western Caucasus. Geology, geography and global energy. 2014. No. 1. Issue 52. pp. 91-104. (In Russ.)

6. Zemchenko A. F. et al. Geological map of the USSR, scale 1:200,000. Ser. Caucasian. Sheet L-37-XXVII. Moscow. 1978. 108 p. (In Russ.)

7. Korsakov S. G. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Ed. second, ser. Caucasian. Sheet L – 37 – XXVII, Krasnodar. Explanatory letter. Saint Petersburg, VSEGEI. 2004. 233 p. (In Russ.)

8. Lavrischev V.A. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Ser. Caucasian. Sheet K-37-IV. Explanatory letter. Saint Petersburg, VSEGEI. 1999. 105 p. (In Russ.)

9. Letavin A. I., Pererva V. M. Fault tectonics and prospects for oil and gas potential in the marginal zone of the Northwestern Caucasus. Moscow. Nauka. 1987. 88 p. (In Russ.)

10. Marinin A. V., Kopaevich L. F., Stupin S. I. The geological structure of the section of the valley of the river. Ubinka (North-Western Caucasus). Bulletin of Moscow University. Series 4, Geology. 2011. No. 5. pp. 33-41. (In Russ.)

11. Mosyakin Yu. A., Astakhov S. M., Mosyakin A. Yu. Prospects for the oil and gas potential of the Oxford-Neocomian reef deposits within the southern flank of the West Kuban trough. Oil and gas geology. Theory and practice. 2015. Vol. 10. No. 4. (In. Russ.) DOI: 10.17353/2070-5379/40_2015.

12. Pererva V. M. Prospects for oil and gas potential and methods for identifying zones of discontinuous structures in the Northwestern Caucasus. Geology of oil and gas. 1981a. No. 1. pp. 39-43. (In Russ.)

13. Pererva V. M. Relation between the relief and the block structure of the marginal zone of the northwestern subsidence of the Greater Caucasus. Geomorphology. 1981b. No. 3. pp. 72-77. (In Russ.)

14. Popkov V. I., Popkov I. V. Structural and tectonic prerequisites for oil and gas potential and possible types of oil and gas traps in folded orogenic zones on the example of the Northwestern Caucasus. Oil and gas geology. Theory and practice. 2017. Vol. 12. No. 2. (In Russ.) DOI: 10.17353/2070-5379/14_2017.

15. Snezhko V. A. etc. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Scythian series, Sheet L-37 (Rostov-on-Don). Explanatory letter. Saint Petersburg, Cartographic factory VSEGEI. 2017. 829 p. (In Russ.)

16. Yudin V. V. Geodynamics of the Crimea. Simferopol, DIAIPI. 2011. 336 p. (In Russ.)

17. Yudin V. V. Thrust and chaotic complexes. Simferopol, IT ARIAL. 2013. 252 p. (In Russ.)

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

19. Carola E., Muñoz J. A. and Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.). 2015. DOI 10.1007/s00531-015-1177-z.

20. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L. and Callot J.-P. Topographic and tectonic evolutionof mountain belts controlled by salt thickness and riftarchitecture. Tectonics. 2020. Vol. 39. DOI: 10.1029/2019TC005903.

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

22. Popkov V. I., Imbricate thrust structure of the Northwestern Caucasus, Dokl. Earth Sci. 2006. Vol. 411. No. 2. pp. 1222-1224. DOI: 10.1134/S1028334X06080137.

23. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. In Goffey G. P., Craig J., Needham T., Scott R. (eds). Hydrocarbons in contractual belts. Geological Society. London. 2010. Vol. 348. pp. 7-31. DOI: 10.1144/sp348.2

24. Sobornov K. O. Lateral variations in structural styles of tectonic wedging in the Northeastern Caucasus, Russia. Bull. Can. Petrol. Geol. 1996. Vol. 44. No. 2. pp. 385-399.

25. Sobornov K. O. Structure and development of wedgeshapedthrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. 2020. Search and Discovery Article #30654.

26. Yu Y., Tang L., Yang W., Huang T., Qiu N. and Li W. Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. AAPG Bulletin. 2014. Vol. 98. No. 1. pp. 135-159.

27. Xu Shilin, Lu Xiuxiang, Sun Zhonghua, Pi Xuejun, Liu Luofu, Li Qiming, Xie Huiwen. Kela-2: a major gas field in the Tarim Basin of west China. Petroleum Geoscience. Vol. 10. 2004. pp. 95-106. DOI: 10.1144/1354-079303-571.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

УДК 550.34+550.341
DOI: 10.46698/VNC.2022.92.93.005

Original paper

Monte Cristo Range earthquake May 15, 2020: calculated intensity and macroseismic field

O. O. Erteleva[1], F. F. Aptikaev[1], K. S. K. Karthik Reddy[2], S. Chanda[2], S. N. Somala[2]

[1]Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10/1 Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation, e-mail: ertel@ifz.ru;

[2]Indian Institute of Technology Hyderabad, 502285, India

Received: 10.02.2022, revised: 22.02.2022, accepted: 04.03.2022

Abstract: Relevance. When studying the seismic effect of the occurred earthquake, the collected macroseismic data are of great importance. To design the most reliable map of the macroseismic field, it's necessary to have the sufficient number of such data, which descript accurately, how and under what circumstances the earthquake was felt. However, in sparsely populated regions, collecting such information is often impossible. In similar situations, the lack of near-field data is particularly sensitive. This is the case of the Monte Cristo Range earthquake, 15.05.2020, M_W = 6.5, which occurred in Western Nevada. The nearest settlement from the epicenter was at a distance of» 59 km. In addition, there were not only strong ground motion instruments, but also regional seismic stations near the epicenter. The nearest seismic station that recorded the event was at a distance of» 39 km. In the absence of information or their extremely small number, the construction of isoseists near the epicenter can be made only by theoretical calculations. Global or regional empirical attenuation curve is used. Usually, the attenuation law is described by single curve. The accuracy of such constructions is low. The separation of several zones in the earthquake wave field with their individual attenuation laws and the correlations between the vibration parameters and the parameters of the earthquake source and ground conditions significantly improves the accuracy of calculations. The article proposes a methodology for calculating accelerations and intensities based on empirical data. **The aim of the work** is study of the macroseismic field of the Monte Cristo Range earthquake, 15.05.2020, M_W = 6.5: assessment of peak accelerations and intensity in the near-field of this earthquake. **Research methods** – analysis of available data on the earthquake, and development of attenuation curves for this seismic event, calculation of peak ground accelerations, duration of oscillations and assessing intensity. **Results of the work** – for Monte Cristo Range earthquake, 15.05.2020, PGA attenuation equations were proposed and the seismic effect in the near-field was estimated.

Keywords: seismic effect, epicenter, magnitude, peak ground acceleration, peak ground velocity, duration, intensity, macroseismic field.

Acknowledgements: *This work is partially funded by the Department of Science and Technology, India, INT/RUS/RFBR/P-335 and Ministry of Earth Sciences MoES/P. O (Seismo)/1 (304)/2016, and also was carried out under the state task of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, and was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 18-55-45010 IND_a). The Nevada regional seismic network (NN) monitors earthquake activity throughout Nevada and many areas of Eastern California. The complete network includes about 450 channels of real-time waveform data collected from a variety of instrumentation. NN network data was accessed through IRISDMC. The Southern California Earthquake Data Center (SCEDC), funded by the Southern California Earthquake Center (SCEC) and other sources, holds the complete data archives for SCSN/CISN from 1932 to present. Southern California Seismic Network operated by Caltech and USGS were accessed through SCEDC. Waveform data, metadata, or data products for this study were accessed through the Northern California Earthquake Data Center. UC Berkeley contributed this data to the NCEDC.*

For citation: Erteleva O. O., Aptikaev F. F., Reddy Karthik K. S. K., Chanda S., Somala S. N. Monte Cristo Range earthquake May 15, 2020: calculated intensity and macroseismic field. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. 12 (1): 62-74. DOI: 10.46698/VNC.2022.92.93.005.

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

DOI: 10.46698/VNC.2022.92.93.005

Оригинальная статья

Землетрясение Монте Кристо Рэйндж, 15 мая 2020 г.: расчетная интенсивность и макросейсмическое поле

О. О. Эртелева[1], Ф. Ф. Аптикаев[1], К. С. К. Картик Редди[2], С. Чанда[2], С. Н. Сомала[2]

[1]ФГБУН Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта, Россия, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: ertel@ifz.ru;

[2]Индийский технологический институт, факультет гражданского строительства, Хайдерабад, 502285, Индия

Статья поступила: 10.02.2022, доработана: 22.02.2022, одобрена в печать: 04.03.2022

Резюме: Актуальность работы. При исследовании сейсмического эффекта происшедшего землетрясения большое значение имеют собранные макросейсмические данные. Их достаточное количество и точность описания того, как и при каких обстоятельствах ощущалось землетрясение, способствуют построению наиболее достоверной карты макросейсмического поля. Однако в малонаселенных регионах сбор такой информации зачастую невозможен. В подобных ситуациях особенно чувствителен недостаток данных в ближней зоне землетрясений. Именно такой случай представляет собой землетрясение Монте Кристо Рэйндж, 15.05.2020 г., M_W = 6,5, произошедшее в Западной Неваде. Ближайший населенный пункт от эпицентра находился на расстоянии» 59 км. К тому же, вблизи эпицентра не оказалось не только приборов сильных движений, но и регулярных сейсмостанций. Ближайшая с/станция, зафиксировавшая событие, находилась на расстоянии» 39 км. При отсутствии сведений или их крайней малочисленности построение изосейст вблизи эпицентра может быть произведено только теоретическими расчетами. Используются среднемировые или региональные эмпирические зависимости затухания параметров колебаний. При этом закон затухания обычно описывается одной кривой. Точность таких построений невысока. Выделение в волновом поле землетрясения нескольких зон со своими законами затухания и зависимостями параметров колебаний от параметров очага и среды значительно повышает точность расчетов. В статье предлагается методика расчетов ускорений и интенсивностей, основанная на эмпирических данных. **Цель работы** – исследование макросейсмического поля землетрясения Монте Кристо Рэйндж, 15.05.2020 г., M_W = 6,5: оценка пиковых ускорений и интенсивности вблизи очага этого землетрясения. **Методы исследования** – анализ имеющихся данных о землетрясении, разработка кривых затухания применительно к этому сейсмическому событию, расчет пиковых ускорений грунта, продолжительности колебаний и оценка интенсивности. **Результаты работы** – для землетрясения Монте Кристо Рэйндж, 15.05.2020 г., предложены уравнения затухания пиковых ускорений, и оценен сейсмический эффект.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, очаг, магнитуда, пиковое ускорение, пиковая скорость, продолжительность колебаний, интенсивность, макросейсмическое поле.

Благодарность: *Данная работа частично финансируется Департаментом науки и технологии правительства Индии, INT/RUS/RFBR/P-335 и Министерством наук о Земле MoES/PO (Seismo)/1 (304)/2016, а также была выполнена по государственному заданию Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН и поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант №18-55-45010). Региональная сейсмическая сеть Невады (NN) ведет наблюдения по всей Неваде и во многих районах Восточной Калифорнии. Она включает в себя около 450 каналов приборов различного типа, регистрирующих сейсмические сигналы в режиме реального времени. Данные сети NN доступны через IRISDMC (IRISData Management Centre). Центр данных о землетрясениях Южной Калифорнии (Southern California Earthquake Data Center, SCEDC), финансируемый Центром землетрясений Южной Калифорнии (Southern*

California Earthquake Center, SCEC) и другими источниками, содержит полные архивы данных сети SCSN/CISN (Southern California Seismic Network/California Integrated Seismic Network) с 1932 года по настоящее время. Доступ к сети SCSN, управляемой Калифорнийским технологическим институтом и Геологической службой США, осуществлялся через SCEDC. Сейсмограммы, метаданные и другие данные для этого исследования были получены через Центр данных о землетрясениях в Северной Калифорнии (NCEDC), куда они были предоставлены Калифорнийским университетом Беркли.

Для цитирования: Эртелева О. О., Аптикаев Ф. Ф., Редди Картик К. С. К., Чанда С., Сомала С. Н. Землетрясение Монте Кристо Рэйндж, 15 мая 2020 г.: расчетная интенсивность и макросейсмическое поле. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 62–74. DOI: 10.46698/VNC.2022.92.93.005.

Introduction

On 15th May 2020 at 19 h 03 min 27 sec (GMT) (11 h 03 min 27 sec UTC) a relatively strong earthquake occurred in Monte Cristo Range, western Nevada. The source was located about 55 km west-north-west of Tonopah city (sometimes this event named Tonopah earthquake). The coordinates of epicentre are 38.163°N, 117.859°W. It was located between Candeleria fault and Eastern Columbus Salt Marsh fault type of faulting is a combination of normal and strike-slip (fig. 1).

Magnitude of the event is $M_w = 6.5$. For this level $M_w = M_S$. Depth by USGS estimation is $h = 11$ km, but Nevada seismological laboratory evaluated $h = 2.7$ km (https://earthquake. usgs. gov/earthquakes/eventpage/nn00725272/executive). Maybe, these estimates are corresponding to lower and upper boundaries of rupture surface. At the same time according to [Wells et al., 1994] width of rupture surface is 10.7 km. Therefore, value of $h = 11$ km is used for the further calculations.

Within 12 hours after the main shock 7 aftershocks of magnitude higher than 4.5 were recorded. The very next day there were two aftershocks with $M_w > 4.5$, followed by one each subsequent couple of days. Four days past the main shock, still aftershocks of magnitude higher than 4 are observed (fig. 2). Aftershocks are concentrated in an ellipti-

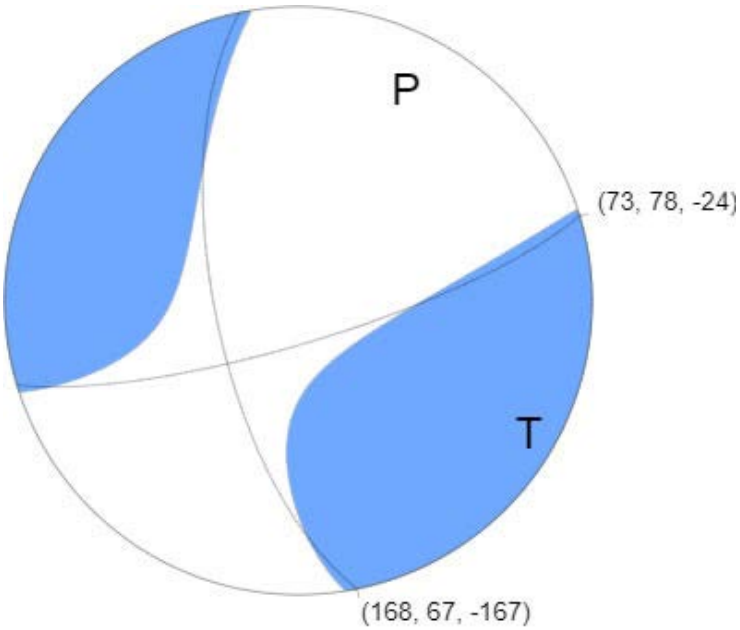


Fig. 1. Moment tensor of Monte Cristo Range earthquake 15.05.2020 (https://earthquake. usgs. gov/earthquakes/eventpage/nn00725272/executive)

Fig. 2. Esmeralda County Sheriff's Office photo of cracks across Highway 95 (http://www. nbmg. unr. edu/Geohazards/Earthquakes/MonteCristoRangeEQ. html)

cal region with major axis roughly oriented NE-SW, except for a few scattered ones SE of the epicentre. There are 2 aftershock zones. One was located at the extending of Candelaria fault; another was at the eastern edge and extended towards Petrified Springs Fault System. The length of mainshock rupture is about 28-35 km long a previously unknown eastward extension of Candelaria fault [Morton et al., 2020; Bormann et al., 2021; Dee et al., 2021; Koehler et al., 2021]. Maximal coseismic slip is 0.8 m [Zheng et al., 2020].

The earthquake occurred in a sparsely populated area, so there were no casualties. But shakings were felt across a large area up to San Francisco, Salt Lake City and Los Angeles. No major damage was reported. This seismic event only damaged U. S. Route 95 between Reno city and Las Vegas: there are cracks (fig. 2).

The purpose of this work

The estimated maximum intensity is VIII (https://earthquake. usgs. gov/earthquakes/eventpage/nn00725272/executive). The nearest seismic station was located at about 39 km. The seismic records and the macroseismic data were absent in the near-field zone. Therefore, it was possible to define the intensity in the far-field only. In proposed research we investigated the seismic effects of the Monte Cristo Range earthquake: we assessed the peak ground accelerations (*PGA*), duration of oscillation (t) and intensity (*I*) in the near-field of this earthquake.

Research methods

In the absence of information or their extremely small number, the construction of isoseists near the epicenter can be made only by theoretical calculations. For this target the global or regional empirical attenuation curves are used. As the rule, the attenuation law is described by single curve. The accuracy of such constructions is low. The separa-

tion of several zones in the earthquake wave field with their individual attenuation laws significantly improves the accuracy of calculations.

For studying the near-field of Monte Cristo Range (Tonopah) earthquake, 15.05.2020, we used the system of *PGA* empirical attenuation curves developed on the basis of the world-wide strong ground motions database [Aptikaev, 2009; Erteleva et al., 2020]. Analyzing the available data on the Monte Cristo Range earthquake, we developed the empirical attenuation curves for this seismic event. Then, for the sites, where the strong ground motions seismic stations were located, *PGA* and t were calculated.

The intensity in the near-field zone were estimated using the *PGA* attenuation equations and correlation relation, which connects *I* at the sites with *PGA*' and t values there.

Table 1

Western Nevada historic significant earthquakes

Year	Date	Time (GMT) h min	Location	Maximal intensity I_{max}	Reference
1868	30.05	0510	Virginia City Area	VII	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 1981; 2000; de Polo et al., 2003; 2006]
1869	27.12	0155	Virginia City Area	VIII	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 1981; 2000; de Polo et al., 2003; 2006]
1869	27.12	1000	Virginia City Area	VII	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 1981; 2000; de Polo et al., 2003; 2006]
1887	03.06	1050	Carson Valley	VIII	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 1981; 2000; de Polo et al., 2003; 2006]
1910	21.11	2323	Tonopah Junction	VIII	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2006]
1914	18.02	1817	Reno region	VII	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2006]
1914	24.04	0834	Reno region	VII	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2006]
1915	03.10	0653	Pleasant Valley	VIII-X	[Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2006]
1932	20.12	1010	Cedar Mountain	VIII-X	[Gianella et al., 1934; Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2003; 2006]
1933	25.06	2045	near Wabuska	VII	[Neumann, 1935; Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2006]
1934	30.01	2016	Excelsior Mountains	VIII	[Callaghan et al., 1935; Neumann, 1936; Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2006]
1948	29.12	1253	near Verdi	VII	[Murphy et al., 1951; Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2006]
1954	06.07	1113	Rainbow Mountain	IX	[Murphy et al., 1956; Doser, 1986; Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2003]
1954	24.08	0551	Stillwater Range	IX	[Murphy et al., 1956; Doser, 1986; Slemmons et al., 1965; Toppozado et al, 2000; de Polo et al., 2003]
1954	16.12	1107	Dixie Valley -Fairview Valley	X	[Murphy et al., 1956; Slemmons, 1957; Doser, 1986; Slemmons et al., 1965; Toppozado et al., 2000; de Polo et al., 2003; Caskey et al., 1996; 1997]
2008	21.02	1442	near Wells	VIII	[Smith et al., 2011; de Polo, 2014]

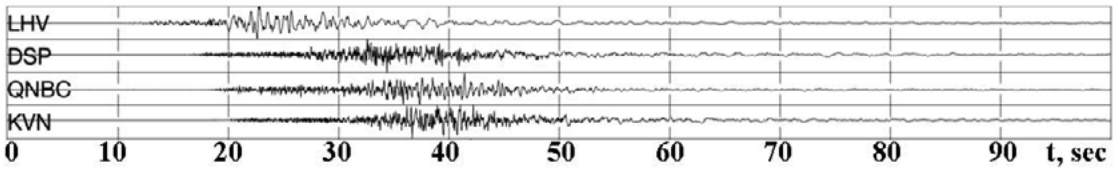


Fig. 3: More intensive accelerograms of Monte Cristo Range (Tonopah) earthquake, E-W horizontal component

The calculated intensities and intensities obtained from strong ground motion records were compared. Using such results, the seismic effect of the Monte Cristo Range earthquake, was estimated.

Tectonics and seismicity of the Monte Cristo Range earthquake region

The region, where source of Monte Cristo Range earthquake, 15.05.2020, is located, is the northeast of the Mina deflection, western Nevada, the central Walker Lane. The Walker Lane is a zone of wide 100-300 km with many active faults [Stewart, 1988; Bennett et al., 2003]. There is complicated tectonics with the thrusts, folds here. A feature of the seismicity of the Walker Lane is the simultaneous existence and interaction of multiple faults with different types of faulting. The strike-slip (left-lateral and right-lateral) and normal faults are characterized for the Mina deflection [Wesnousky, 2012; Lee et al., 2009; Nagorsen-Rinke et al., 2013; Bormann et al., 2016].

Historical seismicity documented in Western Nevada is very reach of the numerous felt and damage seismic events (Table 1). Most earthquakes of this region had a prolonged aftershock process. The same peculiar feature is characteristic of Monte Cristo earthquake.

Strong Motion Data

The Monte Cristo Range (Tonopah) earthquake was recorded by many s/stations. But unfortunately, the epicentral distances were large. We used the accelerograms of 41 stations. The examples of records with maximal *PGA* are shown in fig. 3.

The stations with codes LHV, DSP, QNBC and KVN are within 100 km from epicentre. All these stations are within couple of degrees distance from epicentre with limited coverage in first quadrant. The strong motion data has been corrected for DC shift scaled based on the sensitivity. The closest station to the hypocentre is LHV, which is about 58 km from the epicentre, and the shortest distance from the rupture surface for this station is 35 km. *PGA* value recorded at this station is close to 0.3 m/sec^2 in both the horizontal components, while the THV1 station which is 85 km from the earthquake location recorded *PGA* of 2.18 m/sec^2 along EW direction. This is also the highest *PGA* among all the stations shown in fig. 4, followed by QNBC station recording about 1.5 m/sec^2 on both the horizontal components. All the SCEDC stations had *PGA* within 0.1 to 0.2 m/sec^2. Shaking lasted approximately from 35 sec to 75 sec at the stations considered (fig. 3).

The Fourier amplitude spectra of accelerations for the horizontal and vertical components are also computed. Most of the energy is concentrated around 0.8-2 Hz band. The high frequency decay of these spectra is used to compute kappa factor. Kappa for vertical components hardly has any variation with distance $\kappa = 0.0001R + 0.0320$. The asymptotic

limit as R tends to zero is $\kappa 0 = 0.032$. Kappa for horizontal components is found to follow $\kappa = 0.0059R + 0.0279$ (with $\kappa 0 = 0.0279$).

Empirical attenuation law for Monte Cristo Range earthquake

Because the area near the epicenter of the Monte Cristo Range earthquake is sparsely populated, it is difficult to design shake maps of ground accelerations and isoseists. Therefore, average world empirical dependences of the attenuation of these parameters are used in such cases. There are two intensity maps for this earthquake (https://earthquake. usgs. gov/earthquakes/eventpage/nn00725272/executive): Community Internet Intensity Map (by the USGS DFYI web site) with maximal intensity *MM* VII and Estimated intensity map with maximal intensity *MM* VIII. The accuracy of such constructions is not high. The main reason for the errors is the assumption that the attenuation of seismic effects can be described by a single equation.

It turned out [Aptikaev, 2009; Aptikaev, Erteleva., 2021], that in the engineering range (6-9 points of seismic intensities):

the mean values of accelerations in narrow distance intervals can be approximated by three straight line segments with different attenuations of accelerations and intensities, and different dependencies on earthquake magnitude, focal mechanism, and ground conditions (fig. 4);.

the acceleration attenuation curves for different magnitudes are muted by shifting not along the amplitude axis, but along the distance axis;

in the immediate vicinity of the fault a zone is separated, where the amplitude increase with distance. It was called a fault-field zone in [Aptikaev, Erteleva, 2021];

in the far-field zone the PGA attenuation becomes very dramatically, because the boundary of the near-field and far-field zones is the border of the earthquake source.

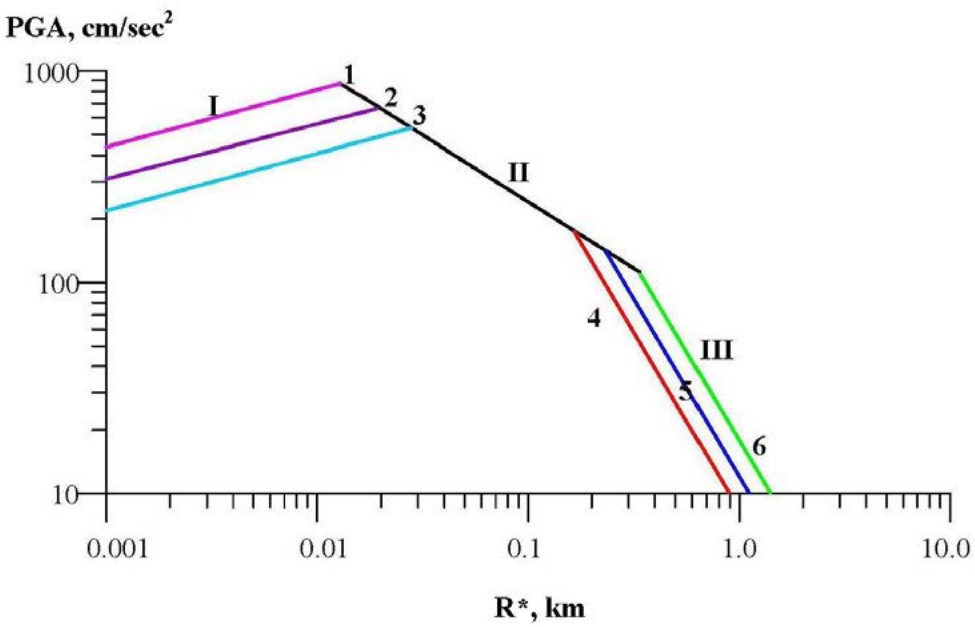


Fig. 4. Attenuation of PGA from empirical data (by Erteleva). Zones: fault-field; II – near-field; III – far-field. Focal mechanism: 1 – thrust; 2 – strike-ship; 3 – normal. Ground category: 4-hard; 5 – intermediate; 6 – soft.

At some distance from the fault, the accelerations depend on magnitude. On the contrary, at the fault surface, many researchers consider acceleration amplitudes to be independent of magnitude [Campbell, 1981; Trifunac, 1976; Bommer et al., 2000; Yamada et al., 2009; Aptikaev, 2009]. Therefore, if we normalize distances according to the law

$$lg\ R^* = lg\ R - 0.33\ M_S, \quad (1)$$

where R is the shortest distance from the fault surface; R^* is the distance normalized by M_S,

then the problem of finding the amplitude attenuation law is greatly simplified, since the magnitude dependence disappears; the accuracy of the estimates is significantly increased: the standard deviation for the worldwide data sample is 0.17 for the fault-field and near – field zones and 0.20 for the far-field zone.

In the fault-field zone, accelerations obey the law:

$$lgPGA\ (R^*) = lgPGA_f + C_f lg\ (1+ R^*) \pm 0.17, \quad (2)$$

where PGA_f is the acceleration at the rupture surface, C_f is a coefficient depending on the focal mechanism (Table 2).

Table 2

Values of PGA_f and coefficient C.

Focal mechanism	PGA_f, cm/sec^2	C_f	PGA_{max}
Thrust	435	52.5	870
Strike-slip	310	38	660
Normal	220	28	535

The maximum values of accelerations are observed at the boundary of the fault-field and near-field zones.

For the Monte Cristo earthquake PGA_f = 260 cm/sec^2. Maximal acceleration PGA_{max} = 590 cm/sec^2 is expected on shortest distance from rupture surface R = 3.2 km. According to model the depth of lower boundary of rupture surface is 11 km, maximal acceleration must be observed on distance about 3 km. For the model of upper boundary of rupture surface is 2.7 km, maximal acceleration must be observed just above rupture surface. For the strong motion stations both models give practically the same results.

For the Monte Cristo earthquake, we have in the fault-field zone

$$lgPGA\ (R^*) = 2.415 + 32.7\ lg\ (1+ R^*) \pm 0.17, \quad (3)$$

In the near-field zone the acceleration amplitudes begin to reduce (see fig. 4), no significant effects of the focal mechanism and ground conditions on the *PGA* amplitude were found. The equation for this zone is:

$$lg\ (PGA,\ cm/sec^2) = 1.75\text{-}0.63\ lg\ R^* \pm 0.15. \quad (4)$$

In the far-field zone, the influence of ground properties on the vibration level is significant: for rock the amplitude level should be reduced and for soft ground to increase. All given estimates refer to the largest amplitude on the horizontal component.

For the far-field zone, an empirical equation is obtained

$$lg\ PGA = C_{gr} - (2.76\text{-}0.17\ M_S)\ lg\ R^* \pm 0.2, \quad (5)$$

where C_{gr} = 0.9 for rock, 1.1 for intermediate ground and 1.3 for soft ground.

For the Monte Cristo earthquake ground conditions are unknown, we are used C_{gr} = 1.1:

$$lg\ PGA = 1.1 - 1.655\ lg\ R^* \pm 0.25, \quad (6)$$

There is a sharp increase in the attenuation in the far-field zone. This can only be explained by the fact that the boundary of the near-field and far-field zones is the border of the earthquake source.

Seismic effect of Monte Cristo Range earthquake in the near-field

Rupture length was 28 km [Morton et al., 2020]. The position of the rupture surface is taken as single plane according to the cloud of aftershocks from [Ruhl et al., 2021]. Therefore, our distance estimations are somewhat different from those, given in the publications. The distances were taken by us from the line of the fault.

The seismic effect can be estimated using vibration level value [Aptikaev, 2009; Aptikaev, Erteleva, 2021; Chernov, 2021]. To assess the seismic effect the empirical formulas that describe the relationship between *I* and *PGA* (or *PGV*) value at the observation point [Aptikaev, 2009; Aptikaev, Erteleva, 2021] are used:

$$I = 2.5\ lgPGA + 1.25\ lg\tau + 1.05, \quad (7)$$

$$I = (lg\ PGV + 0.5\ lg\tau_V + 1.8)/0.47, \quad (8)$$

where τ is the duration of oscillation when the acceleration is considered as the ground motion parameter; τ_V is the duration of oscillation when the velocity is considered as the ground motion parameter.

Duration affects the seismic intensity [Aptikaev, 2009; Zaalishvili et al., 2020]. τ is defined as the time interval during which the level of the oscillation envelope exceeds half the maximum value (it was called the pulse width)-[Aptikaev, 2009].

The empirical dependence of the pulse width in the fault-field and near-field zones on the magnitude has the form [Aptikaev, Erteleva, 2021]:

$$lg\tau = 0.33\ M_S - 1.63. \quad (9)$$

The pulse width in these zones does not depend on distance and ground conditions.

In the far-field zone the empirical equation is:

$$lg\tau = 0.17\ M_S + 0.5\ lgR^* + C, \quad (10)$$

where *C* = 0.1 for rock, 0.25 for intermediate ground and 0.65 for soft ground.

Using the strong ground motion records (the velocities records during the main shock of Monte Cristo Range earthquake) [Crowell, 2021], we estimated the duration of velocity oscillations at the locations of the s/stations. Then the observed intensities in these points were calculated by equation (8).

Using the developed attenuation law for Monte Cristo Range earthquake, (see equations (3), (4) and (6)), we computed the intensities expected at the registration sites by equations (7). The corresponding pulse widths were calculated using equations (9) – (10).

At last, to show applicability of the proposed methodology, we compared the computed values of intensities with the values of intensities obtained from strong ground motion records (Table 3). Both values are in good agreement.

Table 3

The recorded and calculated effects of the Monte Cristo Range earthquake, 15.05.2020, intermediate ground

Stations	*R*, km	$PGV_{observed}$	$\tau_{observed}$	$I_{observed}$	$PGA_{calculated}$	$\tau_{calculated}$	$I_{calculated}$
P627	35	4.72	22	6.7	109	5.0	7.0
LHV	43	4.41	19.2	6.6	88	5.5	6.8
P650	52	7.37	25	7.0	65	6.0	6.5
TONO	48	3.41	16.5	6.4	53	5.8	6.3
P132	60	4.15	8.7	6.4	51	6.5	6.3
P649	67	3.44	14.7	6.5	43	6.9	6.2
P133	74	1.85	11,3	5.8	36	7.2	6.0
TVH1	75	2.06	21	5.9	33	7.3	5.9

On the station LHV were recorded velocity and acceleration. To the recorded *PGA* at station LHV and related τ (fig. 3) *I* is 6.2 points. The accuracy of intensity estimations for velocity and acceleration are equal. The differences between estimations are depended on frequency content. Therefore, for station LHV mean value $I = 6.4$ is used.

The standard deviation is 0.3 points only, although all estimates were made without taking into account ground conditions unknown to us.

Now, estimating the *PGA*, τ and corresponding *I* values, we can describe the macroseismic field of the considering seismic event. The intensity above fault is 7.7 points. Then, with distance the intensity is increasing and on distance 3 km it reaches the maximal value $I = 8.6$. Further, the intensity begins to decay and decreases to values of $I = 8.0$ on distance 10 km, $I = 7.0$ on distance 35 km and $I = 6.0$ on distance 73 km.

Discussion of results

Usually, when the classic methodic for assessing intensity by the instrumental data are used, only *PGA* attenuation equation is applied. As a consequence, the resulting evaluations include the great errors, especially for the isoseists close in distance to epicenter.

For the Monte Cristo Range earthquake we obtained $I_0 = 7.7$. Let's note, such value is close to USGS' estimation (https://earthquake. usgs. gov/earthquakes/eventpage/nn00725272/executive).

We are proposing to consider whole earthquake wave field as 3 zones: fault-, near- and far-field ones. Each zone is characterized by the own *PGA* attenuation equation, and dependence on source mechanism and ground conditions. The influence of τ duration is taken into account also. Such approach allows describing a macroseismic field in detailed.

So, using this method, we have obtained that directly near the fault the Monte Cristo Range earthquake intensity can be estimated as 7.7 points. But up to 3 km the intensity value grows and reaches 8.6 point. Then it decreases to the value of $I = 8.0$ on distance 10 km. Isoseists radiuses of the intensity of 7.0 points and 6.0 points are 35 km and 73 km.

Nevertheless, when intensity is estimated, it must be taken into account, that in the far-field zone seismic intensity on the soft grounds increases due to increase in the amplitude and duration of the oscillations. For rock – intensity reduces.

Conclusions

Analysis of available data on the Monte Cristo Range earthquake, 15.05.2020, allowed developing the attenuation curves for this seismic event. They are:

lgPGA = 2.415 + 32.7 lg (1+ R*) ± 0.17 for the fault-field zone,
lgPGA = 1.75-0.63 lg R* ± 0.17. for the near-field zone,
lgPGA =1.1-1.655 lg R* ± 0.25, for the far-field zone.

The peak ground accelerations, durations and intensities were calculated. The intensity above fault is 7.7 points. The maximal intensity I = 8.6 is expected on distance 3 km. The intensity of I = 8.0, 7.0 and 6.0 points are expected on distances 10 km, 35 km and 73 km correspondingly.

By the classic model the maximal intensity near the fault may be estimated by value 8.0 on average.

As the result, the seismic effect near the Monte Cristo Range earthquake epicenter, 15.05.2020, was estimated in detailed.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Aptikaev F. Review of empirical scaling of strong ground motion for seismic hazard analysis. Selected topics in earthquake engineering – from earthquake source to seismic design and hazard mitigation (ed. Mihailo D. Trifunac). International conference on earthquake engineering (2009; Banja Luka). Banja Luka, Republic of Srpska, B&H: N. I. G. D. Nezavisne novine, d. o. o., 2009. pp. 27-54.

2. Aptikaev F., Erteleva O. System of acceleration attenuation equations. Prospects for development of engineering survey in Russian Federation. Materials of the 16th All-Russian Conference of prospecting organizations (Moscow, December 1-3). Moscow. Geomarketing LLC, 2021. pp. 406-411, DOI: 10.25296/978-5-6040982-3-3-2021-12-1-764 (In Russ.)

3. Bennett R.A., Wernicke B.P., Niemi N.A., Friedrich, A. M., Davis J.L. Contemporary strain rates in the northern Basin and Range province from GPS data. Tectonics, 2003. Vol. 22. No. 2. Art № 1008. – DOI: 10.1029/2001tc001355

4. Bommer J.J., Martinez-Pereira A. Strong-motion parameters: definition, usefulness and predictability. Proc. XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – February 4, 2000). Auckland, New Zealand, 2000. Paper No. 0206.

5. Bormann, J., Hammond, W. C., Kreemer, C., and Blewitt, G. Accommodation of missing shear strain in the central Walker Lane, western North America – constraints from dense GPS measurements. Earth and Planetary Science Letters, 2016. Vol. 440. pp. 169-177.

6. Bormann J.M., Morton E.A., Smith K.D., Kent G.M., Honjas W.S., Plank G.L., Williams M.C. Nevada Seismological Laboratory rapid seismic monitoring deployment and data availability for the 2020 M6.5 Monte Cristo Range, Nevada earthquake sequence. Seism. Research Letters, 2021. Vol. 92. pp. 810-822.

7. Callaghan E., Gianella V.P. The earthquake of January 30, 1934, at Excelsior Mountains, Nevada. Bull. Seism. Soc. Am., 1935. Vol. 25. pp. 161-168.

8. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. Bull. Seism. Soc. Am., 1981. Vol. 71. No. 6. pp. 2039-2070.

9. Caskey S.J., Wesnousky S.G. Static stress changes and earthquake triggering during the 1954 Fairview Peak and Dixie Valley earthquakes, central Nevada. Bull. Seism. Soc. Am., 1997. Vol. 87. No. 3. pp. 521-527.

10. Caskey S.J., Wesnousky S.G., Zhang P., Slemmons D.B. Surface faulting of the 1954 Fairview Peak (MS 7.2) and Dixie Valley (MS 6.8) earthquakes, central Nevada. Bull. Seism. Soc. Am., 1996. Vol. 86. No. 3. pp. 761-787.

11. Chernov Yu. K. The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania. Geology and Geophysics of Russian South, 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 87-102. DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007. (in Russ.).

12. Crowell B. D. Near-Field Strong Ground Motions from GPS-Derived Velocities for 2020 Intermountain Western United States Earthquakes. Seism. Research Letters, 2021. Vol. 92. 2A. pp. 840-848. DOI: 10.1785/0220200325

13. Dee S., Koehler R. D., Elliott A. J., Hatem A. E., Pickering A. J., Pierce I., Seitz G. G., Collett C. M., Dawson T. E., De Masi C., de Polo C. M., Hartshorn E. J., Madugo C. M., Trexler C. C., Verdugo D. M., Wesnousky S. G., Zachariasen J. Surface Rupture Map of the 2020 M 6.5 Monte Cristo Range earthquake, Esmeralda and Mineral counties, Nevada.-Nevada Bureau of Mines and Geology, 2021. Map 190, 2 sheets, scale 1:14000. 26 p.

14. De Polo C. M., Ramelli A. R., Hess R. H., Anderson J. G. Re-evaluation of pre-1900 earthquakes in western Nevada, Nevada Bureau of Mines and Geology, 2003. Open-File Rept. 03-3. 175 p.

15. De Polo C. M., Garside T. M. The November 21, 1910 Tonopah Junction earthquake, and the February 18, 1914 and April 24, 1914 Reno earthquakes in Nevada, Nevada Bureau of Mines and Geology, 2006. Open-File Rept. 06-2. 102 p.

16. De Polo C. M. High Probability of Foreshock Occurrence and Significant Probability of Multiple Events Associated with Magnitude 6 Earthquakes in Nevada, U. S. A. Seism. Research Letters, 2014. Vol. 85. No. 3. pp. 601-608. DOI: 10.1785/0220120071

17. Dixon T. H., Miller M., Farina F., Wang H., Johnson D. Present-day motion of the Sierra Nevada block and some tectonic implications for the Basin and Range province, North America Cordillera. Tectonics, 2000. Vol. 19. No. 1. pp. 1-24.

18. Doser D. I. Earthquake processes in the Rainbow Mountain – Fairview Peak – Dixie Valley, Nevada, region 1954-1959. J. Geophysical Research, 1986. Vol. 91. pp. 12,527-12,586.

19. Gianella V. P., Callaghan E. The Cedar Mountain, Nevada, earthquake of December 20, 1932. Bull. Seism. Soc. Am., 1934. Vol. 24. No. 4. pp. 345-384. DOI: 10.1785/BSSA0240040345

20. Koehler R. D., Dee S., Elliott A., Hatem A., Pickering A., Pierce I., Seitz G. Field Response and Surface Rupture Characteristics of the 2020 MM 6.5 Monte Cristo Range Earthquake, Central Walker Lane, Nevada. Seism. Research Letters. January 27, 2021. Vol. 92. pp. 823-839. DOI: 10.1785/0220200371

21. Lee J., Garwood J., Stockli D. F., Gosse J. Quaternary faulting in Queen Valley, California-Nevada: Implications for kinematics of fault-slip transfer in the eastern California shear zone – Walker Lane belt. Geological Soc. Am. Bull., 2009. Vol. 121. No. 3. pp. 599-614. DOI: 10.1130/B26352.1

22. Morton E., Ruhl C. J., Smith K., Bormann J. M., Hatch R. L., Ichinose G. A. The 2020 M6.5 Monte Cristo Range, NV Earthquake and Aftershock Sequence. Poster Presentation No. 057 at 2020 SCEC Annual Meeting, 2020, August.

23. Murphy L., Cloud W. United States earthquakes. 1954. U. S. Coast and Geodetic Survey. Serial No. 793. Washington: United States Government printing office, 1956. 110 p.

24. Murphy L. M., Ulrich F. P. United States earthquakes. 1948. U. S. Coast and Geodetic Survey. Serial No. 746. Washington: United States Government printing office, 1951. 50 p.

25. Nagorsen-Rinke, S., Lee, J., Calvert, A. Pliocene sinistral slip across the Adobe Hills, eastern California-western Nevada – kinematics of fault slip transfer across the Mina deflection. Geosphere, 2013. Vol. 9. No. 1. pp. 37-53.

26. Neumann R. United States earthquakes. 1933. U. S. Coast and Geodetic Survey. Serial No. 579. Washington: United States Government printing office, 1935. 83 p.

27. Neumann R. United States earthquakes. 1934. U. S. Coast and Geodetic Survey. Serial No. 593. Washington: United States Government printing office, 1935. 101 p.

28. Ruhl C. J., Morton, E. A., Bormann, J. M., Hatch-Ibarra, R., Ichinose, G., Smith, K. Complex fault geometry of the 2020 Mww6.5 Monte Cristo Range, Nevada earthquake sequence. Seism. Research Letters, 2021. Vol. 92. No. 3. pp. 1876-1890. DOI: 10.1785/0220200345

29. Slemmons D.B. Geological effects of the Dixie Valley- Fairview Peak, Nevada, earthquakes of December 16, 1954. Bul- letin of the Seismological Society of America, 1957. Vol. 47. No. 4. pp. 353-375.

30. Slemmons D.B., Jones A.E., Gimlett J.I. Catalog of Nevada earthquakes, 1852-1960. Bull. Seismol. Soc. Am., 1965. Vol. 55. pp. 537-583.

31. Smith K., Johnson C., Davies J., Agbaje T., Knezevic S. Antoniijevic, and G. Kent. The 2011 Hawthorne, Nevada Earthquake Sequence; Shallow Normal Faulting. Abstract S53B-2284 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec.

32. Stewart J.H. Tectonics of the Walker Lane belt, western Great Basin – Mesozoic and Cenozoic deformation in a shear zone in W.G. Ernst, editor, Metamorphism and crustal evolution of the western United States (Rubey Volume VII): Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1988. pp. 681-713.

33. Toppozada T.R., Real C.R., Parke D.L. Preparation of isoseismal maps and summaries of reported effects for pre – 1900 California earthquakes, Cal.Div. Mines Geol., 1981. Open-File Rept. 81-11SAC. 182 p.

34. Toppozada T., Branum D., Petersen M., Hallstrom C., Cramer C., Reichle M. Epicenters of and areas damaged by M ≥ 5 California earthquakes, 1800-1999, Cal.Div. Mines Geol., 2000. Map Sheet 49, Poster.

35. Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependece of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. Bull. Seism. Soc. Am., 1976. Vol. 66. No. 1. pp. 189-219.

36. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seis. Soc. Am., 1994. Vol. 84. No. 4. pp. 974-1002.

37. Wesnousky S.G., Bormann J.M., Kreemer C., Hammond W.C., Brune J.N. Neotectonics, geodesy, and seismic hazard in the northern Walker Lane of the western North America: Thirty kilometers of crustal shear and no strike-slip? Earth Planet. Sci. Lett., 2012. Vol. 329. pp. 133-140. DOI: 10.1016/j. epsl. 2012.02.018.

38. Yamada M., Olsen A., Heaton T. Statistical features of short- and long-period near-source ground motion. Bull. Seism. Soc. Am., 2009. Vol. 99. No. 6. pp. 3264-3274. DOI: 10.1785/0120090067

39. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. Geology and Geophysics of Russian South, 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006 (in Russ.)

40. Zheng A., Chen X., Xu W. Present day deformation mechanism of the northeastern Mina deflection revealed by the 2020 Mw 6.5 Monte Cristo Range earthquake // Geophysical Research Letters, 2020. Vol. 47. e2020GL090142. DOI: 10.1029/2020GL090142

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34.09
DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006

Оригинальная статья

Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности

В. Б. Заалишвили[1], Д. А. Мельков[1], Н. В. Никонова[2], Л. Н. Смирнова[3], А. М. Уздин[2]

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

[2]Петербургский государственный университет путей сообщения, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: uzdin@mail.ru;

[3]АО «НИЦ «Строительство»», Россия, 109428, 2 г. Москва, Институтская ул., д. 6, e-mail: lyubovsmirnova80@gmail.com

Статья поступила: 05.02.2022, доработана: 21.02.2022, одобрена в печать: 07.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Вследствие рассеяния волн, возникающего из-за сложности строения земли, а также эффектов распространения разрывов по протяженным разломам, при сейсмических воздействиях наблюдаются эффекты некогерентности. Эти эффекты особенно значительны для протяженных конструкций, таких как мосты. **Цель работы** состоит в разработке характеристик, позволяющих учитывать эффекты распространения волн и пространственную корреляцию движений грунта при оценке реакции строительных конструкций на колебания грунта при землетрясениях. **Метод исследований**. В статье предлагается детализация оценки пространственного распределения сейсмических ускорений на площадке строительства. Для этого вводятся четыре характеристики неравномерности поля ускорений на дневной поверхности: показатель несинхронности, показатель некогерентности, показатель разномасштабности (разницы амплитуд колебаний) и показатель непохожести. Для указанных показателей приводятся аналитические формулы для их определения, причем введенные показатели являются независимыми. **Результаты работы**. Выполнены простые тестовые расчеты и приведен пример использования реальных записей землетрясений. Записи землетрясений получены при выполнении работ по сейсмическому микрорайонированию площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС. В статье приводится сопоставление трех записей ускорений в разных точках площадки. Карты значений показателей на площадке строительства можно получить простыми замерами колебаний дневной поверхности при взрывах и микросейсмах. Такие карты вскрывают природу неоднородности поля сейсмических ускорений и дают серьезный вспомогательный материал проектировщику. Большие показатели некогерентности и разномасштабности указывают на сложную геологию площадки строительства и необходимость серьезных геологических изысканий. Показатель разномасштабности позволяет скорректировать расчетное ускорение при проектировании сооружений с большим пятном застройки. Показатель несинхронности указывает на необходимую величину деформационных швов для протяженных сооружений. Представляется целесообразным построение предлагаемых карт на стадии обоснования проектных решений. Если введенные показатели сильно различаются по площади предполагаемой застройки, то для проектирования следует разрабатывать специальные технические условия и представлять детальную геологию площадки строительства.

Ключевые слова: сейсмическое возмущение, характеристики воздействия, пространственная неоднородность, корреляция, расчеты, станции, регистрация, показатели, несинхронность, некогерентность.

Благодарности: *Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант ГФЕН_а №21-58-53012 «Теоретические основы и методы проектирования сценариев накопления повреждений при сейсмических воздействиях на примере портовых и шельфовых сооружений».*

Для цитирования: Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Никонова Н. В., Смирнова Л. Н., Уздин А. М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006

Original paper

Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface

V. B. Zaalishvili[1], D. A. Melkov[1], N. V. Nikonova[2], L. N. Smirnova[3], A. M. Uzdin[2]

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

[2]Emperor Alexander I St. Peterberg state transport university, 9 Moskovsky pr., Saint-Petersburg 190031, Russian Federation, e-mail: uzdin@mail.ru;

[3]Research Center of Construction, 62nd Institutskaya Str., Moscow 109428, Russian Federation, e-mail: lyubovsmirnova80@gmail.com

Reseived:05.02.2022, revised: 21.02.2022, accepted: 07.03.2022

Abstract: Relevance. Due to the scattering of waves arising from the complexity of the earth's structure, as well as the effects of the propagation of ruptures along extended faults, spectacular incoherence is observed during seismic impacts. These effects are especially significant for extended structures such as bridges. **Aim** consists in the development of characteristics that allow taking into account the effects of wave propagation and spatial correlation of ground movements when assessing the reaction of building structures to ground vibrations during earthquakes. **Methods**. The article offers a detailed assessment of the spatial distribution of seismic accelerations at the construction site. To do this, four characteristics of the non-uniformity of the acceleration field on the daytime surface are introduced: the indicator of non-synchronicity, the indicator of incoherence, the indicator of different scales (differences in oscillation amplitudes) and the indicator of dissimilarity. Analytical formulas for their determination are given for these indicators, and the entered indicators are independent. **Results**. Simple test calculations and an example of using real earthquake records were performed. Earthquake records were obtained during the performance of seismic micro-zoning of the site of the projected Chiri-Yurt HPP. The article provides a comparison of three records of accelerations at different points of the site. Maps of the values of indicators at the construction site can be obtained by simple measurements of the fluctuations of the daytime surface during explosions and microseisms. Such maps reveal the nature of the heterogeneity of the seismic acceleration field and provide serious auxiliary material to the designer. Large incoherence and multi-scale indicators indicate the complex geology of the construction site and the need for serious geological surveys. The multi-scale indicator allows you to adjust the calculated acceleration when designing structures with a large building spot. The non-synchronicity indicator indicates the required amount of deformation seams for extended structures. It seems appropriate to build the proposed maps at the stage of substantiation of design decisions. If the entered indicators vary greatly in the area of the proposed development, then special technical conditions should be developed for the design and a detailed geology of the construction site should be presented.

Keywords: seismic excitation, excitation characteristics, spatial heterogeneity, correlation, calculations, stations, registration, asynchronous ground motion, incoherence.

Acknowledgments: *The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant GFEN_a No. 21-58-53012 "Theoretical foundations and methods for designing damage accumulation scenarios under seismic effects on the example of port and offshore structures".*

For citation: Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Nikonova N. V., Smirnova L. N., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.

Введение

При расчете многоопорных конструкций встает вопрос различия возмущений под опорами. Вопросам расчета многоопорных конструкций посвящено много отечественных [Гиман, Уздин, 2002, 2006; Назаров, Николаенко, 1988; Петров, Базилевский, 1978] и зарубежных [Bogdanoff et al., 1965; Igusa, Kiureghian, 1985; Dong, Wieland, 1988; Gatti et al., 2017; Lavorato et al., 2017; Falamarz-Sheikhabadi, Zerva, 2018; Jia et al., 2020] исследований. Особенно остро этот вопрос стоит для мостов, когда основания береговых опор могут характеризоваться 7-мибалльной сейсмичностью, а основания русловых – 9-тибалльной. Расчет мостов с учетом несинхронности возмущения опор рассмотрен в работах [Уздин, Кузнецова, 2014; Dong, Wieland, 1988; Ardila et al., 2018; Lavorato et al., 2018; Papadopoulos, Sextos, 2018, 2020; Jia et al., 2020; Petronijević et al., 2002; Savvas et al., 2020; Smirnova et al., 2020; Meibodi, Alexander, 2021; Soyluk, Karaca, 2021]. Основополагающими для расчета сооружений с точечным опиранием на основание в условиях пространственной неоднородности поля ускорений являются исследования А. Тер-Кюрегяна [Kiureghian, 1981, 1996; Kiureghian, Neuenhofer, 1992]. В России этому вопросу уделено много внимания в работах А. А. Петрова [Петров, Базилевский, 1978], Ю. П. Назарова и Е. В. Позняк [Назаров, Николаенко, 1988; Nazarov, Poznyak, 2018]. В настоящее время инженерная задача о колебаниях протяженного сооружения в предположении известного распределения ускорений на свободной поверхности достаточно подробно описана, например, в работах [Назаров, Николаенко, 1988; Igusa, 1985; Shen et al., 2019]. Вопросами корреляции колебаний точек дневной поверхности при землетрясениях занимались известные специалисты [Петров, Базилевский, 1978; Kiureghian, 1981, 1996; Kiureghian, Neuenhofer, 1992]. Однако данных для задания неоднородности поля ускорений на площадке строительства явно недостаточно. Поэтому предпринимались попытки смоделировать такое поле численными методами, например, [Katsuhisa, 2000; Nazarov, Poznyak, 2018; Petronijević et al., 2002]. Возникающие сложности связаны, по нашему мнению, с тем, что нет четких критериев неоднородности поля ускорений на площадке строительства.

Методы работы

Показатель некогерентности характеризует относительный сдвиг по времени для возмущений разных точек площадки по отношению к некоторой базовой точке. Показатель некогерентности характеризует изменение спектрального состава воздействия в пределах рассматриваемой площадки. Показатель разномасштабности характеризует изменение амплитуд воздействия по отношению к базовому значению. Показатель непохожести представляет собой относительную величину нормы разности воздействий в рассматриваемой и базовой точках. Он может быть выражен через показатели несинхронности, некогерентности и разномасштабности.

В сейсмологии различие в колебаниях удаленных друг от друга точек дневной поверхности характеризуют корреляционной функцией K (t) и коэффициентом корреляции ρ:

$$K(\tau) = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\varphi(t-\tau)dt\,, \qquad (1)$$

где f(t) и φ(t) – колебания рассматриваемых точек дневной поверхности, T – продолжительность землетрясения

$$\rho = \frac{K(0)}{\|f\|\cdot\|\varphi\|}\,, \qquad (2)$$

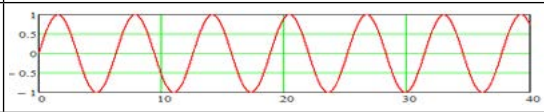
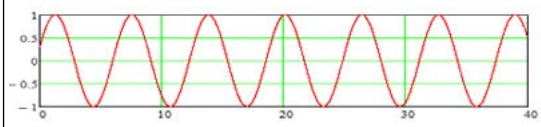
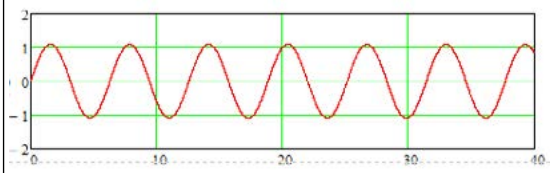
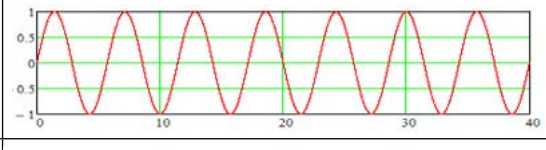
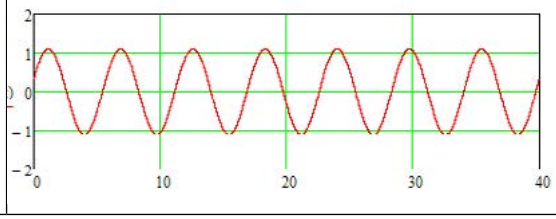
где

$$\|f\| = \sqrt{\int_0^T f(t)^2 dt}\,. \qquad (3)$$

Этот показатель не характеризует в полной мере различие возмущений в разных точках поверхности на площадке строительства. Рассмотрим в качестве примера 4 возмущения, приведенные в таблице 1. Каждый тип зависимости определяет особенности несовпадения базовой и рассматриваемых функций. Очевидно, что

Таблица 1 / Table 1

Данные, иллюстрирующие различия возмущений на площадке строительства / Data illustrating the differences of disturbances at the construction site

Функция / Function	Параметры / Parameters	График функции / Function graph	Тип отличий от базовой функции / Type of differences from the basic function	ρ
$\sin\omega t$	ω=1		-	1
$\sin(\omega t+\delta)$	ω=1; δ=0,3		Несинхронность / Outofsync	0,955
$A\sin\omega t$	A=1,1		Разномасштабность / Multi-scale	1
$\sin\omega_1 t$	ω_1=1,1		Некогерентность / Incoherence	0,937
$A\sin(\omega_1 t+\delta)$	ω_1=1,1; δ=0,3; A=1,1; ω_1=1,1		Несинхронность, разномасштабность и некогерентность / Out-of-sync, multi-scale, andincoheren	0,733

коэффициент корреляции не видит разномасштабности функций и не позволяет выделить, чем вызвана малая корреляция – несинхронностью или некогерентностью возмущений.

Попытаемся уточнить показатели различия возмущений.

Если разложить функцию $\varphi(t-\tau)$ в выражении (1) в ряд по степеням t и удержать первые два члена, то получим

$$K(\tau) \approx \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\left[\varphi(t) - \dot{\varphi}(t)\tau + \frac{1}{2}\ddot{\varphi}\tau^2)\right]dt \qquad (4)$$

Отсюда получим

$$K(\tau) \approx \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\varphi(t)dt - \frac{\tau}{T}\int_0^T f(t)\dot{\varphi}(t)dt + \frac{\tau^2}{2T}\int_0^T f(t)\ddot{\varphi}dt \qquad (5)$$

Экстремальное значение K(τ) достигается при условии

$$\frac{dK}{d\tau} = 0 \qquad (6)$$

Из (5, 6) получаем показатель несинхронности воздействий τ_1

$$\tau_1 = \frac{\int_0^T f(t)\dot{\varphi}(t)dt}{\int_0^T f(t)\ddot{\varphi}(t)dt} \qquad (7)$$

При этом в качестве показателя когерентности сигналов можно принять

$$\rho_1 = \frac{K(\tau_1)}{\|f\|\cdot\|\varphi\|} \qquad (8)$$

Заметим, что показатель когерентности реагирует только на различие в частотах процессов f и φ и сдвиг фаз τ. Амплитуды процессов могут различаться. Они линейно входят в числитель и знаменатель и не влияют на величину ρ.

Для учета различий в амплитудах авторы предлагают использовать функцию и коэффициент идентичности процессов:

$$I(\tau) = \int_0^T \left(f(t) - \varphi(t-\tau)\right)^2 dt \qquad (9)$$

$$\chi(\tau) = \frac{I(\tau)}{2\|f\|\cdot\|\varphi\|}. \qquad (10)$$

Если раскрыть скобки в представлении (9), то получим

$$\chi(\tau) = \frac{1}{2}\left(\frac{\|f\|}{\|\varphi\|} - 2\rho(\tau) + \frac{\|\varphi\|}{\|f\|}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\|f\|}{\|\varphi\|} + \frac{\|\varphi\|}{\|f\|}\right) + \rho(\tau) \qquad (11)$$

Раскладывая $\varphi(t-\tau)$ в ряд, аналогично тому, как это было сделано ранее, получим

$$I(\tau) = \int_0^T \left(f(t) - \varphi(t) - \dot{\varphi}(t)\tau - \ddot{\varphi}(t)\frac{\tau^2}{2}\right)^2 dt \qquad (12)$$

или

$$I(\tau)=\int_0^T\left(f(t)-\varphi(t)\right)^2dt-2\tau\int_0^T\left(f(t)-\varphi(t)\right)\dot{\varphi}(t)dt+$$
$$+\tau^2\int_0^T\left[\left(f(t)-\varphi(t)\right)\ddot{\varphi}(t)+\dot{\varphi}(t)^2\right]dt-\tau^3\int_0^T\dot{\varphi}(t)\ddot{\varphi}(t)dt+\frac{\tau^4}{4}\int_0^T\ddot{\varphi}(t)^2dt \qquad (13)$$

Условие $\frac{dI}{d\tau}=0$ приводит к следующему кубическому уравнению для нахождения показателя несинхронности t_2

$$-2\int_0^T\left(f(t)-\varphi(t)\right)\dot{\varphi}(t)dt+2\tau\int_0^T\left[\left(f(t)-\varphi(t)\right)\ddot{\varphi}(t)+\dot{\varphi}(t)^2\right]dt-3\tau^2\int_0^T\dot{\varphi}(t)\ddot{\varphi}(t)dt+\tau^3\int_0^T\ddot{\varphi}(t)^2dt=0 \qquad (14)$$

Первый корень этого уравнения t_2 определяет показатель несинхронности сигналов и должен совпадать с аналогичным показателем, полученным по формуле (7). Для показателя идентичности сигналов получаем формулу

$$\chi=\frac{I(\tau_2)}{\|f\|\cdot\|\varphi\|} \qquad (15)$$

Таким образом, мы получили три характеристики для оценки различия процессов колебаний точек на дневной поверхности.

Первая характеристика, τ_1 – несинхронность колебаний, которая оценивается по формуле (7) или на основе решения уравнения (14).

Вторая характеристика, r – некогерентность колебаний, определяемая различием их частот. Показатель когерентности оценивается по формуле (8).

Третья характеристика показывает расхождение амплитуд сопоставляемых сигналов и представляет собой первое слагаемое в выражении (11). Обозначим эту величину через z. Тогда

$$\zeta=\frac{1}{2}\left(\frac{\|f\|}{\|\varphi\|}+\frac{\|\varphi\|}{\|f\|}\right) \qquad (16)$$

На основе второго и третьего показателей строится показатель идентичности сигналов по формуле (11).

Набор показателей для рассмотренных выше сигналов приведен в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Примеры значений вводимых показателей для некоторых функций / Examples of values of the entered indicators for some functions

Функция / Function	Показатель несинхронности / Indicator of out-of-sync		Показатель когерентности / Coherence indicator			Показатель масштабности / Scale indicator	Показатель непохожести / Indicator of dissimilarity
	τ_1	τ_2	ρ	ρ_1	ρ_2		
$\sin\omega t$	0	0	1	1	1	1	0
$\sin(\omega t+\delta)$	0,309	0,273	0,955	1	0,84	1	0,16
$A\sin\omega t$	0	0	1	1	1	1,017	0,017
$\sin\omega_1 t$	0,463	0,358	0,837	0,939	0,609	1	0,421
$A\sin(\omega_1 t+\delta)$	0,884	0,201	0,733	–0,906	0,19	1,052	0,703

Предложенные параметры в полной мере характеризуют задание неоднородности поля ускорений на площадке строительства. При этом они по-разному влияют на отклик системы. Небольшие отклонения показателя амплитуд возмущений z под опорами слабо уменьшают реакцию сооружения. Что касается некогерентности возмущений, то этот эффект может приближать или удалять систему от резонанса. В этом случае влияние некогерентности может быть существенным и резко меняться при приближении к резонансу, особенно у слабо демпфированных систем. Более сложная картина возникает при несинхронности возмущения. Малые значения изменения показателя t_0 не приводят к большому искажению колебаний, однако в случае, когда t_0 соизмеримо с периодом возмущения, искажения могут быть весьма существенными.

Результаты работы и их обсуждение

Предлагаемые параметры для оценки неоднородности поля ускорений на площадке строительства могут иметь значение для проектирования сооружений с большим пятном застройки и протяженных сооружений. Учет неоднородности поля ускорений для оценки сейсмостойкости такого рода сооружений рассматривается в литературе, прежде всего, в работах профессора Ю. П. Назарова и Е. В. Позняк [Назаров, Николаенко, 1988; Nazarov, Poznyak, 2018]. В них выделяется интегральная (для сооружений с большими по площади опирания фундаментами) и дифференциальная (для сооружений с точечным опиранием на грунт) неоднородность для учета поля ускорений в расчетах на сейсмостойкость. Оценка неоднородности поля ускорений производится на основе решения задачи распространения упругой волны по дневной поверхности. На практике все может быть намного сложнее. Инженерные сейсмометрические сети и локальные группы станций являются инструментальной основой оценки пространственной неоднородности сейсмического поля [Карапетян и др., 2019, 2021; Мамаев и др., 2019; Harichandran, 1991; Sextos et al., 2015; Zaalishvili et al., 2020; Huang et al., 2020]. Для ответственных сооружений в задачу микросейсморайонирования следует включать оценку неоднородности поля ускорений на площадке строительства. В качестве примера авторы провели оценку предлагаемых параметров для трех точек площадки вблизи с. Чири-Юрт в Чеченской республике.

В 2012 г. Геофизическим институтом велись сейсмологические наблюдения в связи с выполнением работ по сейсмическому микрорайонированию площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС. Галечниковые грунты поймы и надпойменной террасы реки Аргун, распространенные в пределах площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС, характеризуются наличием песчано-глинистого заполнителя содержанием менее 30%, которые согласно СНиП-7-II-81* по сейсмическим свойствам относятся к грунтам I категории. Были организованы стационарные пункты наблюдений за сейсмическими событиями, представляющие собой хорошо обустроенные подвальные помещения на правой террасе реки в селениях Дуба-Юрт (код станции DBU) и Чири-Юрт (код станции CHU) и на левой террасе в селении Старые Атаги (код станции SAT). В состав каждого пункта сейсмологических наблюдений входил регистратор сейсмических сигналов (РСС) «Дельта-Геон-2М», 3-х компонентный сейсмоприемник СПВ-3К. Запись велась в режиме непрерывной регистрации с частотой дискретизации 125 Гц. Продолжительность непрерывных наблюдений составила более 4-х месяцев. За этот период было зарегистрировано

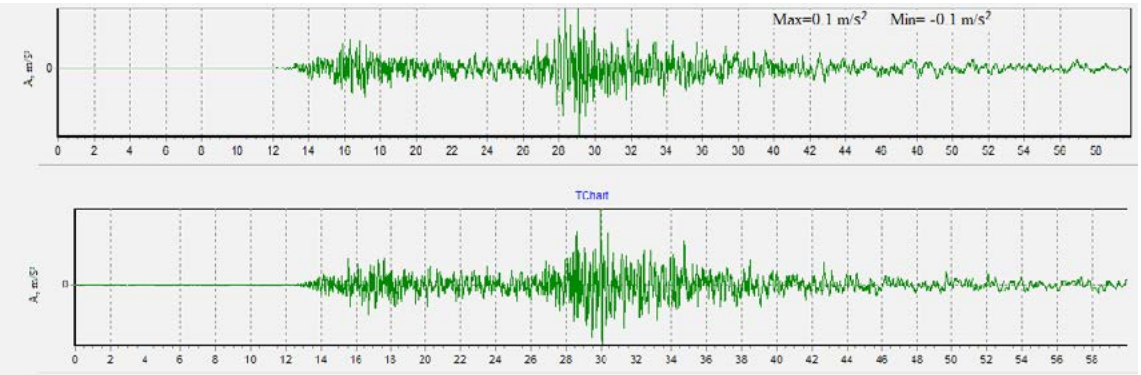


Рис. 1. Записи ускорений для двух близко расположенных точек поверхности / Fig. 1. Acceleration records for two closely spaceds urface points

около сотни сейсмических событий различной природы. Для группирования отобранных событий по признаку магнитуд и эпицентральных расстояний на основе использования данных имеющихся каталогов и бюллетеней сейсмических событий для данной территории были определены параметры соответствующих землетрясений. Для отсутствующих событий в бюллетенях эпицентры были оценены по параметрам поляризации первых вступлений p-волн.

Пункты наблюдений «Старые Атаги» и «Чири-Юрт» были расположены на расстоянии 2 км на разных, противоположных берегах р. Аргун. Записи, зарегистрированные указанными станциями, позволяют проанализировать неоднородность поля ускорений на площадке строительства в зависимости от направления прихода сейсмических волн и других параметров событий.

Обратимся, прежде всего, к анализу близко расположенных точек. В литературе [Петров, Базилевский, 1978; Сейсмический риск …, 1981; Kiureghian, 1996] отмечается, что при удалении точек друг от друга более чем на 60 м, корреляцией колебаний можно пренебречь. Авторы рассмотрели два воздействия для пунктов наблюдений, расположенных примерно в 200 м друг от друга. Акселерограммы колебаний дневной поверхности представлены на рис. 1, а результаты расчетов в таблице 3.

Внешне записи довольно похожи. Пиковые значения амплитуд близки. Преобладающие периоды колебаний составляют 0,15 с. Однако корреляция записей незначительна.

Представленные данные дают значительно больше информации о воздействии, чем просто коэффициент корреляции. Мы видим, что они довольно близки по показателю z и показателю когерентности. Вместе с тем показатель несинхронности весьма мал, что указывает на то, что фронт волны был почти параллелен линии, соединяющей точки.

Таблица 3 / Table 3

Характеристики «похожести» воздействий, представленных на рисунке 1 / Characteristics of the “similarity” of the impacts presented in Figure 1

Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	Показатель несинхронности / Indicator of out-of-sync	Коэффициент когерентности / Coherence indicator	Показатель разномасштабности / Indicator of multi-scale	Показатель непохожести / Indicator of dissimilarity
0,143	0,003	0,315	1,011	0,303

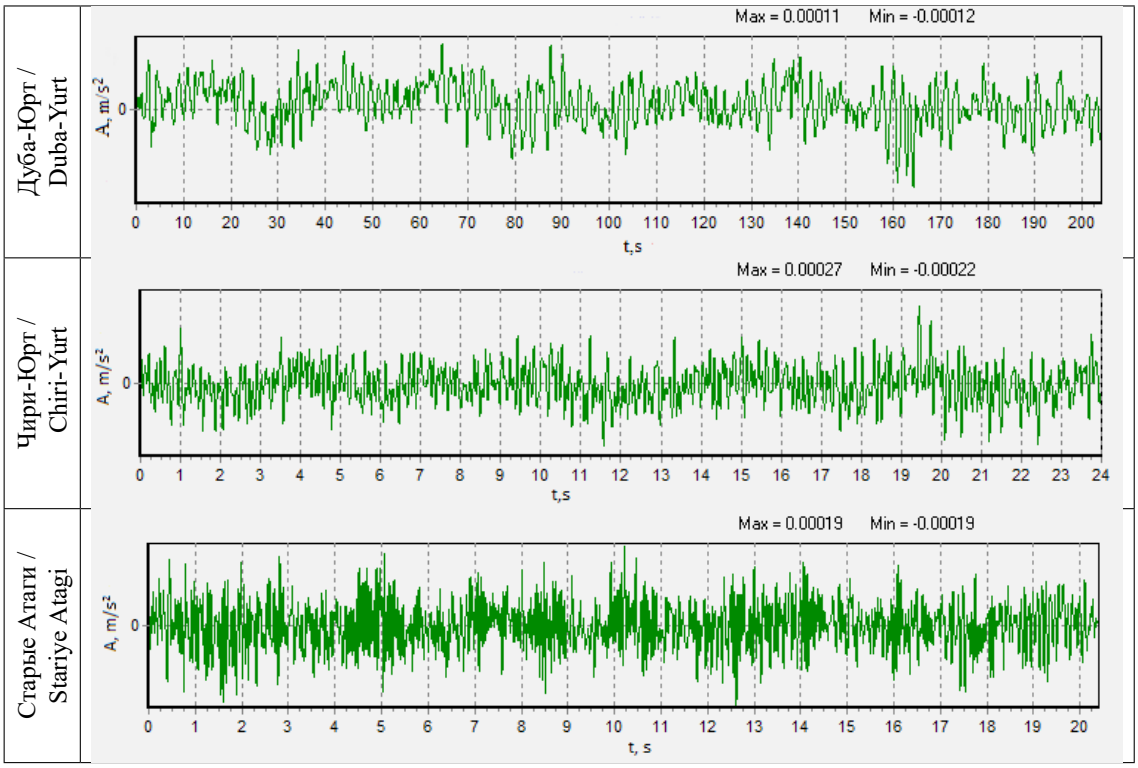


Рис. 2. Записи ускорений в поселках Дуба-Юрт, Чири-Юрт и Старые Атаги /
Fig. 2. Records of accelerations in the settlements of Duba-Yurt, Chiri-Yurt and Starye Atagi

Обратимся теперь к точкам, расположенным в селениях Дуба-Юрт, Чири-Юрт и Старые Атаги. Пример записей при одном воздействии приведен на рисунке 2. Чисто внешне видно, что записи отличаются. Запись в селе Старые Атаги более высокочастотная. За базу (в качестве функции f) нами принята запись в Дуба-Юрте. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Как видно из таблицы, точки удалены значительно и коэффициент корреляции практически равен 0. Зато появился показатель несинхронности возмущения, сопоставимый с периодом колебаний грунта. Когерентность практически отсутствует, а вот показатель разномасштабности близок к 1, т.е. амплитуда и энергия воздействия во всех точках соизмеримы. В целом, воздействие в Чири-Юрт более похоже на воздействие в Дуба-Юрт, чем на воздействие в Старых Атагах.

Таблица 4 / Table 4

Характеристики «похожести» воздействий, в поселках Дуба-Юрт, Чири-Юрт и Старые Атаги / Characteristics of the “similarity” of impacts, in the villages of Duba-Yurt, Chiri-Yurt and Starye Atagi

Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	Показатель несинхронности / Indicator of out-of-sync	Коэффициент когерентности / Coherence indicator	Показатель разномасштабности / Indicator of multi -scale	Показатель непохожести / Indicator of dissimilarity
0,062	0,015	0,055	1,23	0,284
0,044	0,027	0,038	1,13	0,165

Предлагаемый подход позволяет на предварительных этапах проектирования, не имея полной геологии площадки, получить показатели неоднородности поля ускорений, измеряя только микросейсмы на дневной поверхности. При этом можно зафиксировать несинхронность, некогерентность и разномасштабность поля ускорений. Каждый из этих факторов обуславливается характерными особенностями грунтовой толщи на площадке и указывает на то, какие и в каких местах геологические данные следует дополнительно получить для проектирования.

Выводы

1. В статье предложена детализация оценки пространственного распределения сейсмических ускорений на площадке строительства. Для этого введено четыре характеристики неравномерности поля ускорений на дневной поверхности: показатель несинхронности, показатель некогерентности, показатель разномасштабности (разницы амплитуд колебаний) и показатель непохожести.

2. Выполнены простые тестовые расчеты и приведен пример использования реальных записей землетрясений, полученных при выполнении работ по сейсмическому микрорайонированию площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС.

3. Показатель разномасштабности позволяет скорректировать расчетное ускорение при проектировании сооружений с большим пятном застройки. Показатель несинхронности указывает на необходимую величину деформационных швов для протяженных сооружений. Представляется целесообразным построение предлагаемых карт на стадии обоснования проектных решений. Если введенные показатели сильно различаются по площади предполагаемой застройки, то для проектирования следует разрабатывать специальные технические условия и представлять детальную геологию площадки строительства.

Литература

1. Гиман Л. Н., Уздин А. М. К вопросу расчета на сейсмические воздействия протяженных сооружений с дискретными опорами. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. – № 2. – С. 18-23.

2. Гиман Л. Н., Уздин А. М. Об одной форме представления сейсмического воздействия для оценки корреляции колебаний точек дневной поверхности при расчете многоопорных конструкций. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. – № 2. – С. 22-25.

3. Карапетян Дж. К., Айрапетян О. Ю., Мхитарян Д. А. Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 1. – С. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792.

4. Карапетян Дж. К., Айрапетян О. Ю., Матевосян Г. М., Карапетян Р. К. Сравнительный анализ динамических характеристик зданий различных типов при микросейсмических колебаниях. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 103-114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009.

5. Мамаев С. А., Дорофеев В. М., Мамаев А. С. Определение динамических параметров моделей зданий и сооружений на основе инженерно-сейсмометрической информации. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 4. – С. 111-125. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44493.

6. Назаров Ю. П., Николаенко Н. А. Динамика и сейсмостойкость сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.

7. Петров А. А., Базилевский С. В. Учет взаимной корреляции между обобщенными координатами при определении сейсмических нагрузок. // Реф. инф. «Сейсмостойкое стро-

ительство (отечественный и зарубежный опыт)», серия XIV, ЦИНИС – 1978. – Вып. 5. – С. 23-28.

8. Сейсмический риск и инженерные решения. // Пер. с англ. / Под ред. Ц. Ломнитца и Э. Розенблюта. – М.: Недра, 1981. – 375 с.

9. Уздин А. М., Кузнецова И. О. Сейсмостойкость мостов. – Саарбрюкен: Palmarium, 2014. – 450 с.

10. Ardila J., Chio G., Benjumea J. Asynchronous seismic excitation in bridges: asynchronous patterns, analysis methods and structural types studied. // Revista Ingenieria De Construccion. – 2018. – Vol. 33 (1). – pp. 93-110.

11. Bogdanoff J. L., Goldberg J. E., Schiff A. J. The effect of ground transmission time on the response of long structures. // Bull. Seism. Soc. Am. – 1965. – Vol. 55. – pp. 627-640.

12. Dong K. K., Wieland M. Application of response spectrum method to a bridge subjected to multiple support excitation. // The proceedings of the 9-th World conference on earthquake engineering (9-th WCEE), Tokyo, Japan/ – 1988. – Vol. VI. – pp. 531-536.

13. Falamarz-Sheikhabadi M. R., Zerva A. Two uncertainties in simulating spatially varying seismic ground motions: incoherency coefficient and apparent propagation velocity. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2018. – Vol. 16 (10). – pp. 4427-4441. DOI: 10.1007/s10518-018-0385-x

14. Gatti F., De Carvalho Paludo L., Clouteau D. Investigation of the earthquake ground motion coherence in heterogeneous non-linear soil deposits. // Procedia Engineering, 12 September 2017. – 2017. – Vol. 199. – pp. 2354-2359.

15. Harichandran R. S. Estimating the spatial variation of earthquake ground motion from dense array recordings. // Structural Safety. – 1991. – Vol. 10. – pp. 219-233. DOI: 10.1016/0167-4730 (91) 90016-3

16. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2020. – Vol. 10. No. 2. – pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.

17. Jia Hongyu, Yue Weiqin, Zheng Shixiong, Gou Hongye. Time-dependent pounding probability analysis between adjacent decks of bridges under non-stationary stochastic seismic excitations. // December 2020, Structures. – Vol. 28 (2020). – pp. 2355-2366. DOI:10.1016/j. istruc. 2020.10.028

18. Igusa T., Der Kiureghian A. Dynamic response of multiply supported secondary systems. // Journal of Engineering Mechanics. (ASCE). – 1985. – Vol. 111 (1). – pp. 20-41

19. Shen Jiyang, Li Rui, Shi Jun, Zhou Guangchun. Modified Multi-Support Response Spectrum Analysis of Structures with Multiple Supports under Incoherent Ground Excitation. // Applied Sciences, April. – 2019. – Vol. 9 (9). – p. 1744 DOI:10.3390/app9091744

20. Katsuhisa Kanda Seismic responses of structures subjected to incident incoherent waves considering a layered media with irregular interfaces. // The proceedings of the 12-th World conference on earthquake engineering (12-th WCEE), 30 January – 4 February 2000, Auckland, New Zealand; Paper reference 0649.

21. Kiureghian A. A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems. // Earthquake engineering and structural dynamics. – 1981. – Vol. 9. – pp. 419-435.

22. Kiureghian A. A coherency model for spatially varying ground motions. // Earthquake engineering and structural dynamics. – 1996. – Vol. 25. – pp. 99-111.

23. Kiureghian A., Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic excitations. // Earthquake engineering and structural dynamics. – 1992. – Vol. 21. – pp. 713-740.

24. Lavorato D., Vanzi I., Nuti C., Monti G. Generation of Non-synchronous Earthquake Signals. // Risk and Reliability Analysis: Theory and Applications: in Honor of Prof. Armen Der Kiureghian. – 2017. – pp. 169-198. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2_8

25. Lavorato D., Fiorentino G., Bergami A. V., Briseghella B., Nuti C., Santini S., Vanzi I. Asynchronous earthquake strong motion and RC bridges response. // Journal of Traffic and

Transportation Engineering-English Edition. – 2018. – Vol. 5 (6). – pp. 454-466. DOI:10.1016/j. jtte. 2018.06.001

26. Meibodi A.A., Alexander N.A. Spatiotemporal seismic excitation of bridges with an anti-symmetrical first mode. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2021. – Vol. 19 (4). – pp. 1957-1977. DOI: 10.1007/s10518-020-01025-5

27. Nazarov Y.P. Poznyak E.V. Response Spectrum Method for integrated and differential spatial seismic ground motions. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2018. – Vol. 108. – pp. 69-78. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.02.014

28. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Anti-symmetric mode excitation and seismic response of base-isolated bridges under asynchronous input motion. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2018. – Vol. 113. – pp. 148-161. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.06.004

29. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 131. – Article 106013. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013

30. Petronijević M., Nefovska M., Brčić S. Multiple-support seismic analysis of bridges including soil-structure interaction. // Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering 9-13th September 2002. Paper Reference 180.

31. Savvas P., Papadopoulos S.P., Anastasios G. Sextos A.G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27 January 2020. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013

32. Sextos A., Karakostas C., Lekidis V., Papadopoulos S. Multiple support seismic excitation of the Evripos bridge based on free-field and on-structure recordings. // Structure and Infrastructure Engineering. – 2015. – Vol. 11 (11). – pp. 1510-1523. DOI: 10.1080/15732479.2014.977302.

33. Smirnova L., Uzdin A., Polorotova N., Freze M. Important feature of calculating bridges under seismic action. // E3S Web of Conferences 157, 06020. – 2020. DOI: 10.1051/e^{3}sconf/202015706020

34. Soyluk K., Karaca H. Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions. // Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. – 2021. – Vol. 36 (2). – pp. 727-742. https://doi. org/10.17341/gazimmfd. 594282

35. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2020. – Vol. 10 (3). – pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

References

1. Giman L.N., Uzdin A.M. On the issue of calculating the seismic loadings of extended structures with discrete supports. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2002. No. 2. pp. 18-23. (In Russ.)

2. Giman L.N., Uzdin A.M. On one form of seismic impact representation for assessing the correlation of fluctuations of day surface points in the calculation of multi-support structures. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2006. No. 2. pp. 22-25. (In Russ.)

3. Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Mkhitaryan D.A. Analysis of the dynamic characteristics of the mixed structure building. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792 (In Russ.)

4. Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Matevosyan G.M., Karapetyan R.K. Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations. Geology and geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 103-114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009 (In Russ.)

5. Mamaev S.A., Dorofeev V.M., Mamaev A.S. Determination of dynamic parameters of models of buildings and structures based on engineering seismometric information. Geology of the South of Russia. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 111-125. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44493 (In Russ.)

6. Nazarov Yu. P., Nikolaenko N. A. Dynamics and seismic resistance of structures. Moscow. Stroyizdat, 1988. 312 p. (In Russ.)

7. Petrov A. A., Bazilevsky S. V. Accounting for cross-correlation between generalized coordinates when determining seismic loads. Ref. inf. "Earthquake Engineering (national and foreign experience), series XIV, CINIS. 1978. Issue. 5. pp. 23-28. (In Russ.)

8. LomnitzC., Rosenbluth E. (ed.) Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra, 1981. 375 p. (In Russ.)

9. Uzdin A. M., Kuznetsova I. O. Seismic resistance of bridges. Saarbrucken. Palmarium, 2014. 450 p. (In Russ.)

10. Ardila J., Chio G., Benjumea J. Asynchronous seismic excitation in bridges: asynchronous patterns, analysis methods and structural types studied. Revista Ingenieria De Construccion. 2018. Vol. 33. No. 1. pp. 93-110.

11. Bogdanoff J. L., Goldberg J. E., Schiff A. J. The effect of ground transmission time on the response of long structures. Bull. Seism. Soc. Am. 1965. Vol. 55. pp. 627-640.

12. Dong K. K., Wieland M. Application of response spectrum method to a bridge subjected to multiple support excitation. In: The proceedings of the 9-th World conference on earthquake engineering (9-th WCEE), Tokyo, Japan. 1988. Vol. VI. pp. 531-536.

13. Falamarz-Sheikhabadi M. R., Zerva A. Two uncertainties in simulating spatially varying seismic ground motions: incoherency coefficient and apparent propagation velocity. Bulletin of Earthquake Engineering. 2018. Vol. 16. Issue 10. pp. 4427-4441. DOI: 10.1007/s10518-018-0385-x.

14. Gatti F., De Carvalho PaludoL., ClouteauD. Investigation of the earthquake ground motion coherence in heterogeneous non-linear soil deposits. Procedia Engineering, 12 September 2017. 2017. Vol. 199. pp. 2354-2359.

15. Harichandran R. S. Estimating the spatial variation of earthquake ground motion from dense array recordings. Structural Safety. 1991. Vol. 10. pp. 219-233. DOI: 10.1016/0167-4730 (91) 90016-3

16. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007

17. Jia Hongyu, Yue Weiqin, Zheng Shixiong, Gou Hongye. Time-dependent pounding probability analysis between adjacent decks of bridges under non-stationary stochastic seismic excitations. December 2020, Structures. Vol. 28. 2020. pp. 2355-2366. DOI:10.1016/j. istruc. 2020.10.028

18. Igusa T., Der Kiureghian A. Dynamic response of multiply supported secondary systems. Journal o f Engineering Mechanics. (ASCE). 1985. Vol. 111. No. 1. pp. 20-41

19. Shen Jiyang, Li Rui, Shi Jun, Zhou Guangchun. Modified Multi-Support Response Spectrum Analysis of Structures with Multiple Supports under Incoherent Ground Excitation. Applied Sciences, April. 2019. Vol. 9. Issue 9. p. 1744. DOI: 10.3390/app9091744.

20. Katsuhisa Kanda Seismic responses of structures subjected to incident incoherent waves considering a layered media with irregular interfaces. In: The proceedings of the 12-th World conference on earthquake engineering (12-th WCEE), 30 January – 4 February 2000, Auckland, New Zealand; Paper reference 0649.

21. Kiureghian A. A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems. Earthquake engineering and structural dynamics. 1981. Vol. 9. pp. 419-435.

22. Kiureghian A. A coherency model for spatially varying ground motions. Earthquake engineering and structural dynamics. 1996. Vol. 25. pp. 99-111.

23. Kiureghian A., Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic excitations. Earthquake engineering and structural dynamics. 1992. Vol. 21. pp. 713-740.

24. Lavorato D., Vanzi I., Nuti C., Monti G. Generation of Non-synchronous Earthquake Signals. Risk and Reliability Analysis: Theory and Applications: in Honor of Prof. Armen Der Kiureghian. 2017. pp. 169-198. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2_8

25. Lavorato D., Fiorentino G., Bergami A.V., Briseghella B., Nuti C., Santini S., Vanzi I. Asynchronous earthquake strong motion and RC bridges response. Journal of Traffic and Transportation Engineering-English Edition. 2018. Vol. 5 No. 6. pp. 454-466. DOI:10.1016/j. jtte. 2018.06.001.

26. Meibodi A.A., Alexander N.A. Spatiotemporal seismic excitation of bridges with an anti-symmetrical first mode. Bulletin of Earthquake Engineering. 2021. Vol. 19. Issue 4. pp. 1957-1977. DOI: 10.1007/s10518-020-01025-5.

27. Nazarov Y.P. Poznyak E.V. Response Spectrum Method for integrated and differential spatial seismic ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2018. Vol. 108. pp. 69-78. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.02.014.

28. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Anti-symmetric mode excitation and seismic response of base-isolated bridges under asynchronous input motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2018. Vol. 113. pp. 148-161. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.06.004

29. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020. Vol. 131. Article 106013. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013.

30. Petronijević M., Nefovska M., Brčić S. Multiple-support seismic analysis of bridges including soil-structure interaction. In: Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering 9-13th September 2002. Paper Reference 180.

31. Savvas P., Papadopoulos S.P., Anastasios G. Sextos A.G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27 January 2020. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013.

32. Sextos A., Karakostas C., Lekidis V., Papadopoulos S. Multiple support seismic excitation of the Evripos bridge based on free-field and on-structure recordings. Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Vol. 11. Issue 11. pp. 1510-1523. DOI: 10.1080/15732479.2014.977302.

33. Smirnova L., Uzdin A., Polorotova N., Freze M. Important feature of calculating bridges under seismic action. E3S Web of Conferences 157, 06020. 2020. DOI: 10.1051/ e^3sconf/202015706020.

34. Soyluk K., Karaca H. Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 2021. Vol. 36 No. 2. pp. 727-742. DOI: 10.17341/gazimmfd. 594282.

35. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3
DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007

Оригинальная статья

Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Гоубанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г.

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

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

Статья поступила: 06.02.2022, доработана: 04.03.2022, одобрена в печать: 11.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Сейсмическое воздействие традиционно оценивают на основе данных инженерного макросейсмического обследования последствий сильных и разрушительных землетрясений. Являясь объективной характеристикой выделенной сейсмической энергии величина макросейсмической интесивности должна иметь связь с инструментальными параметрами сейсмических колебаний. Для оценки воздействий в ближней зоне землетрясений требуются инструментальные записи. И, хотя в мире в силу развития сетей сильных движений накоплено много записей, на Кавказе имеются только отдельные записи сильных движений, тем более подкрепленные результатами детального макросейсмичекого обследования. В этой связи записи землетрясений, полученные в 2000, 2002 гг. на территории г. Тбилиси являются уникальными. **Целью** работы является установление энергетических показателей сейсмического воздействия на основе инструментальных записей землетрясений различной интенсивности и энергоемкости различных видов конструкций, проявляющихся в итоговом макросейсмическом проявлении. **Методы работы.** Параметры записей рассчитывались по общепринятым методикам, предложенным различными авторами: интенсивность Ариаса, кумулятивная абсолютная скорость, интенсивность Анга, интенсивность Хаузнера, мера Fajfar, мера полной энергии, площадь реального спектра, а также средневзвешенные частота, период колебаний и продолжительность. Сопоставление результатов выполнялось методами регрессионного анализа. **Результаты работы.** В результате установлено наилучшее соответствие реального проявления землетрясений параметрам, описывающим энергетические характеристики сигнала. При этом рассмотрены различные частотные диапазоны. Все используемые оценки инструментальной интенсивности основаны на горизонтальной компоненте, однако в ближней зоне, как показал анализ записей Тбилисских землетрясений, велико проявление вертикальной составляющей. Вероятно, разрабатываемая мера инструментальной интенсивности дожна содержать комбинацию обоих компонент.

Ключевые слова: Гоубанское землетрясение, макросейсмическая интенсивность, интенсивность Анга, интенсивность Хаузнера, мера Fajfar, площадь реального спектра.

Для цитирования: Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Фидарова М. И. Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Гоубанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. *Геология и геофизика Юга России.* 2022. 12 (1): 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007

Original paper

Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002

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

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

Reseived: 06.02.2022, revised: 04.03.2022, accepted: 11.03.2022

Abstract: Relevance. Seismic effect is traditionally assessed based on the data from an engineering macroseismic survey of the consequences of strong and destructive earthquakes. Being an objective characteristic of the released seismic energy, the value of macroseismic intensity should be related to the instrumental parameters of seismic vibrations. Instrumental records are necessary for the assessment of effect in the near zone of earthquakes. Although many records in the world have been accumulated due to the development of strong motion networks, there are only separate records of strong movements in the Caucasus, which are confirmed by the results of a detailed macroseismic survey. In this regard, the records of earthquakes obtained in 2000 and 2002 on the territory of Tbilisi are unique. **Aim.** The aim of the paper is to determine the energy indicators of seismic impact based on the instrumental records of earthquakes of various intensity and power capacity of different types of structures manifested in the final macroseismic effect. **Methods.** Parameters of records were calculated according to generally accepted methods proposed by various authors: Arias intensity, cumulative absolute velocity, Ang intensity, Housner intensity, Fajfar measure, total energy measure, real spectrum area, as well as weighted average frequency, vibration period and duration. Comparison of the results was carried out by the methods of regression analysis. **Results.** As a result, the best correspondence between the real earthquake effects and the parameters describing the energy characteristics of the signal was established. In this case, various frequency ranges are considered. All of the used assessments of instrumental intensity are based on the horizontal component, however, as the analysis of the records of the Tbilisi earthquakes showed, the manifestation of the vertical component is large in the near zone. Probably, the developed measure of instrumental intensity should contain a combination of both components.

Keywords: Gouban earthquake, macroseismic intensity, Ang intensity, Housner intensity, Fajfar measure, area of the real spectrum.

For citation: Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Fidarova M. I. Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007.

Введение

При расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия в качестве показателя сейсмического воздействия используется величина ускорения. Исследования инструментальных записей последних лет показывают, что часто разрушительный потенциал сейсмического воздействия не зависит от значений пиковых ускорений грунта. Разрушительный потенциал ускорений не особенно надежен на

самых различных уровнях воздействий. При ускорениях 0,4g (Япония) наблюдались весьма незначительные повреждения и даже при ускорениях 1,8g (Нортридж, США) повреждения были неадекватно малы. С другой стороны при ускорениях 0,1-0,2g разрушения были весьма интенсивными (Япония, 1964; Мексика, 1985 и т. д.).

Целью работы является установление энергетических показателей сейсмического воздействия на основе инструментальных записей землетрясений различной интенсивности и энергоемкости различных видов конструкций, проявляющихся в итоговом макросейсмическом проявлении.

В последние годы делаются попытки при расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия использовать величины скоростей колебаний грунтов, что, по мнению инженеров, позволяет непосредственно учитывать приходящую кинетическую энергию и ее поглощение исследуемым объектом.

Для оценки воздействий в ближней зоне землетрясений требуются инструментальные записи. И, хотя в мире в силу развития сетей сильных движений накоплено много записей, на Кавказе имеются только отдельные записи сильных движений. В этой связи представляет интерес рассмотреть записи землетрясений, полученные в 2000, 2002 гг. на территории г. Тбилиси. Проявление землетрясений было детально изучено, и записи подкрепляются макросейсмическими данными, которые позволяют выполнить надежное сопоставление макросейсмической интенсивности проявления землетрясений с соответствующими инструментальными данными.

Макросейсмические и инструментальные данные проявления землетрясений различной интенсивности на территории г. Тбилиси

В апреле 2002 г. на территории г. Тбилиси весьма неожиданно произошли т. н. Тбилисские апрельские землетрясения. Как и при предыдущем Гоубанском землетрясении, которое произошло 14 декабря 2000 г., при указанных землетрясениях ощущались сильные вертикальные толчки. Население кавказского региона, характеризующегося умеренной сейсмической активностью и, в частности, Тбилиси, как правило, наиболее часто ощущает проявления относительно удаленных землетрясений, которые характеризуются преобладающим горизонтальным движением (Боржоми, 1970; Дагестан, 1970; Дманиси, 1978; Гавази, 1981; Спитак, 1988; Рача, 1991; Барисахо, 1992 и т. д.) В частности, землетрясение 14 декабря 2000 г. имело эпицентр в окрестностях с. Гоубани и характеризовалось в эпицентре интенсивностью превышающей 6 баллов (рис. 1). В обследованных селах распространены типичные для сельской местности двухэтажные жилые дома. Это позволило надежно сопоставлять проявленный эффект землетрясения. Сейсмический эффект на большей части территории города Тбилиси не превышал 4 балла. В южной части города, т. е. ближе к эпицентру, проявление землетрясения было выше (рис. 2). Несколько домов старой застройки полностью обрушилось (рис. 2с) [Заалишвили и др., 2001; Заалишвили и др., 2014].

Как и при Гоубанском землетрясении ученые-сейсмологи Армении первыми сообщили приблизительное расположение эпицентра к югу от Тбилиси. Землетрясение 11 апреля 2002 г. по имеющимся данным не сопровождалось повреждением или разрушениями. Тем не менее, сотрудниками отдела инженерной сейсмологии Института Строительной Механики и Сейсмостойкости АН Грузии (ИСМИС) по инициативе его руководителя было проведено детальное макросейсмическое обследование последствий землетрясения. В связи с малостью прошедших колебаний, и отсюда сложностью выявления и дифференциации возможных повреждений, использовался опросный метод. Были, опрошены почти 1000 респондентов с

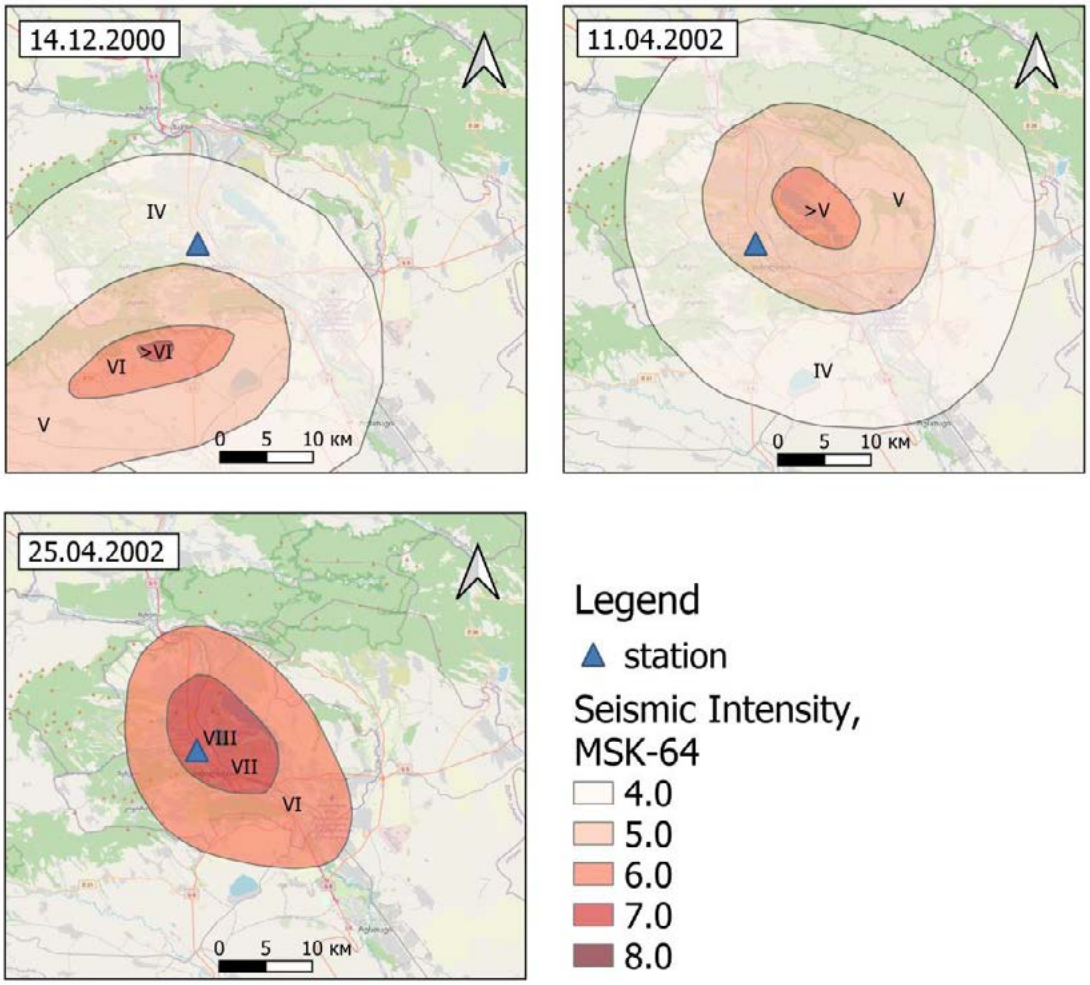


Рис. 1. Результаты макросейсмического обследования эпицентральной зоны Гоубанского (14 декабря 2000 г.) и Тбилисских землетрясений (11 апреля 2002 г. и 25 апреля 2002 г.). На основе данных [Заалишвили и др., 2001, 2014; Javahishvili et al., 2004; Материалы…, 2005] /
Fig. 1. The results of a macroseismic survey of the epicentral zone of the Gouban (December 14, 2000) and Tbilisi (April 11, 2002 and April 25, 2002) earthquakes. Based on the data [Zaalishvili et al., 2001, 2014; Javahishvili et al.; 2004; Materials…, 2005]

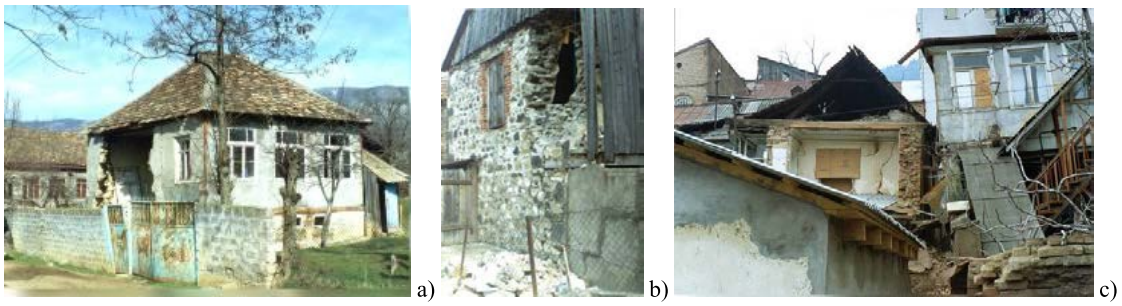


Рис. 2. Типовая застройка и повреждения зданий при Гоубанском землетрясении: a) село Гоубани, повреждения 4 степени; b) село Джорджиашвили. Дом В. Окуашвили; c) Тбилиси, дом на ул. М. Зичи, повреждение 5 степени [Заалишвили и др., 2014] /
Fig. 2. Typical development and structural damage during the Gouban earthquake: a) Goubani village, 4th degree damage; b) Dzhordzhiashvili village. House of V. Okuashvili; c) Tbilisi, house on the M. Zichy street, 5th degree damage [Zaalishvili et al., 2014]

целью оценки их ощущений. И самым главным был вопрос: ощутили или не ощутили респонденты землетрясение и как. Именно эти факторы позволили в относительно короткие сроки, практически, нескольким участникам (среди которых был один из авторов статьи) не только провести рутинное обследование, но и выявить эпицентральную зону такого достаточно слабого землетрясения (обусловившего отсутствие интереса со стороны большинства ученых-инженеров). Направления маршрутов предполагали изучение проявления, как в самом городе, так и за его пределами. Совершенно непонятно, удаление от фактического центра исследуемой площади города в южном и других направлениях, давало устойчивое уменьшение интенсивности. Дальнейшее изучение землетрясения неожиданно привело к пониманию того простого факта, что эпицентр находится непосредственно на территории г. Тбилиси. И, наконец, была установлена эпицентральная зона, где наблюдался массовый бой посуды, сдвиг тяжелой мебели, поломка оконных стекол и т. п. И об этом вообще отсутствовала информация. По результатам макросейсмического обследования были построены изосейсты землетрясения 11 апреля 2002 года (рис. 1). Анализ изосейст показывает, что эпицентральная зона землетрясения охватывает северо-западную часть города и приурочена к районам Глдани, Наздаладеви, Чугурети и т. д.

Выявление гипоцентра непосредственно под городом напомнило о т. н. «Тбилисских» землетрясениях позапрошлого века, когда в первой половине 19 столетия в Тбилиси произошел целый ряд заметных землетрясений. После указанного землетрясения, совершенно закономерно, в городе были зарегистрированы афтершоки. При этом имело место совершенно непонятное возрастание активности. Дело доходило до того, что за день происходил ряд весьма ощутимых толчков. Все это дало основание руководителю отдела инженерной сейсмологии В. Б. Заалишвили во вторник 13 апреля 2002 г. на первом же заседании Ученого Совета ИСМИС АН Грузии выступить от имени исследовательской группы с заявлением о прогнозе сильного землетрясения на территории г. Тбилиси. Конечно, при этом не давался точный прогноз времени, но эпицентр предполагался в Тбилиси где – то в пределах эпицентральной зоны землетрясения 11 апреля 2002 г., а время проявления что-то около месяца. Понятно, ни у кого и в мыслях не было привлекать сюда средства массовой информации, и заявление носило научный или только служебный характер [Заалишвили и др., 2001].

После первого землетрясения прошло две недели и вечером 25 апреля произошло разрушительное землетрясение с преобладающим вертикальным толчком с магнитудой порядка M=4,5. В результате землетрясения 25 апреля 2002 г. в Тбилиси погибло 9 человек. В городе землетрясение привело к значительным разрушениям и серьезным повреждениям (рис. 3). Сотни людей осталось без крова. Эпицентр землетрясения был вновь, как и предполагалось, в восточной части города, естественно перекрыв эпицентральную зону землетрясения от 11 апреля 2002 г. (рис. 1). Таким образом, землетрясение от 11 апреля 2002 г. можно рассматривать в качестве форшока.

Макросейсмические данные приведены на рисунке 1с. При этом использовались все данные, включая результаты оперативного обследования, которые впоследствии уточнялись [Javahishvili et al., 2004]. В данной работе использованы общие данные проявления землетрясения, обусловленные расположением очага. Влияние грунтовых условий в данной работе не рассматривалось. В то же время проявление интенсивности происходило путем наложения различных факторов, обусловленных сложным переплетением влияния близко расположенного очага и грунтовыми условиями территории [Заалишвили и др., 2014].

В результате землетрясения 25 апреля 2002 года было серъезно повреждено более 2500 зданий и сооружений. Под руководством В. Б. Заалишвили, по поруче-

Рис. 3. Повреждения зданий при Тбилисском землетрясении 25 апреля 2002 года: a) повреждение колонн здания Института математики; b) Колонна первого этажа ЖБ крупноблочного дома в Надзаладевском районе; c) кирпичное здание больницы по ул. А. Казбеги; d) поврежденная колона здания Государственного исторического музея [Gabrichidze et al., 2004] /
Fig. 3. Damage to buildings during the Tbilisi earthquake on April 25, 2002: a) damage to the columns of the building of the Mathematical Institute; b) column of the first floor of a reinforced concrete block house in the Nadzaladevsky district c) a brick building of the hospital on the A. Kazbegi street; d) a damaged column of the building of the State Historical Museum [Gabrichidze et al., 2004]

нию Министерства строительства Грузии и руководства ИСМиС АН Грузии, было выполнено обследование зданий и сооружений в центральной части территории г. Тбилиси. В первую очередь, решались неотложные социальные задачи оценки их состояния и необходимости выведения населения в безопасные здания и районы. И уже по результатам обследования строились соответствующие изосейсты. Оперативное обследование зданий также было проведено СБР НССЗ Республики Армения. Было установлено, что наибольшие повреждения получили большей частью малоэтажные здания, более всего в районах Авлабара и Сололаки [Материалы…, 2005].

С наибольшей интенсивностью землетрясение проявилось в выделенной эпицентральной зоне землетрясения, т. е. в восточной части города: улицы Пиросмани, Зиари, Рача, Магаро, Либани, Кетеван Тсамебули, Э. Бежанишвили, Б. Бенделиани, Диди – Джихаиши и другие. Относительно малая глубина очага (около 5 км) предопределила сильное затухание выделяющейся сейсмической энергии за пределами сферического в идеале, а у нас – протяженного вдоль городской застройки очага. Анализ грунтовых условий города, проведенный выше, позволяет приурочить увеличение интенсивности к району старого города, где большая часть поверхностных слоев грунтовой толщи представляет собой насыпные грунты. Неравномерные осадки таких грунтов также сформировали высокий сейсмический эффект и в других районах города (район, заключенный между площадью Свободы, мостом Бараташвили и ул. Л. Асатиани и т. д.). С другой стороны, высокий сейсмический эффект проявился в районе распространения сложного подземного и поверхностного рельефов, что соответствует современным концепциям формирования интенсивности землетрясения [Zaalishvili et al., 2000].

Наиболее тяжелое положение создалось в центральной части города. Здесь расположено много амортизированных зданий постройки конца и даже середины 19 столетия. В основном пострадали двух- и трехэтажные здания, с большими проемами и расположенные на слабых насыпных грунтах (ул. А. Дюма, К. Леселидзе, пл. Хлебная и т. д.). Расположенная здесь же купольная церковь X века также пострадала значительно. Некоторые здания были частично разрушены.

Вертикально преобладающий толчок обусловил нестандартные проявления повреждений. Некоторые уже поврежденные перед землетрясением здания, например, с почти 5 см раскрытием стены первого этажа («отголосок» деревянных конструкций!), в период землетрясения не пострадали вообще. Это было обуслов-

лено тем, что высокочастотные составляющие вертикальных колебаний здесь сильно поглощались. В то же время с многих крыш упали кирпичи дымовых труб, но разрушение происходило не в горизонтальном, а вертикальном направлении. Действительно во многих зданиях дымовые трубы, сложенные кирпичами, характеризовались повреждением верхней кладки без проявления каких-либо повреждений в нижней кладке и т. д.

Основные особенности методологии инженерной сейсмологии сформировались в эпоху, когда большая часть застройки городов представляла собой разношерстную, часто весьма некачественно построенную, однородную совокупность зданий и сооружений. Поэтому проявление сейсмического эффекта логически вполне обуславливалось сейсмологической идеологией, а анализ изосейст позволял вполне уверенно выделять влияние грунтовых условий.

В настоящее время, стремительное развитие урбанизированных территорий приводит к формированию сложной застройки, где старые амортизированные дома непосредственно соседствуют с более поздними постройками и – с современными зданиями. При этом проявление землетрясения может совершенно разниться в пределах нескольких метров.

Для надежного выделения влияния грунтовых условий необходимо учитывать и сроки эксплуатации, техническое состояние, и качество строительства, особенно, для новых зданий и сооружений. Не секрет, что, нередко, новые здания построены с такими отклонениями от проекта и, соответственно, от положений действующих Строительных Норм, что они при первом же относительно сильном землетрясении обречены на значительные повреждения. При этом весьма часто в последние годы и сами проекты могут характеризоваться такими нарушениями. Такие обстоятельства всегда формировали интегральный сейсмический эффект землетрясения. Поэтому анализ данных проявления всегда соседствует с отсеиванием проявлений, обусловленных указанными обстоятельствами. В то же время сейсмические шкалы основаны на использовании в качестве объектов анализа именно амортизированных застроек в большинстве своем без антисейсмических мероприятий.

Таким образом, при анализе проявления землетрясений на урбанизированной территории необходимо весьма внимательное изучение застройки с целью выделения различных аномалий. Апрельские землетрясения произошли в городе, насыщенном не просто амортизированной застройкой, но и нередко уже, практически, саморазрушающейся. При этом, весьма распространено характерное для большинства современных городов мира, явление «подтопления» грунтов, отягощаемое, в свою очередь, характерной для старых городов изначальной их высокой водонасыщенностью. Указанные грунты с сейсмической точки зрения очень часто, особенно в старой исторической части города относятся в лучшем случае к грунтам третьей категории, а нередко и еще худшим грунтам (насыпные, торфяные, илистые и т. д.). Это обстоятельство при наличии здесь же прочных грунтов, обуславливало во все времена в Тбилиси отчетливую дифференциацию проявления землетрясения по грунтовым условиям.

С другой стороны, близость источника или очага землетрясения создает совершенно необычные условия для проявления землетрясения. Так здесь не столь явно выражена дифференциация разрушений. Кроме того, сама особенность очага создала совершенно необычную картину, вытянутую, очевидно, вдоль разрывного нарушения, которое, кстати, не четко выделено. И, наконец, свою роль, сыграла малая глубина очага, обусловившая формирование весьма локального проявления апрельских землетрясений.

Апрельские землетрясения 2002 года были зарегистрированы сейсмической станцией, расположенной на скальных грунтах в здании Института геофизики АН Грузии (рис. 4). Расположение станции обозначено на рисунке 1, соответствующие

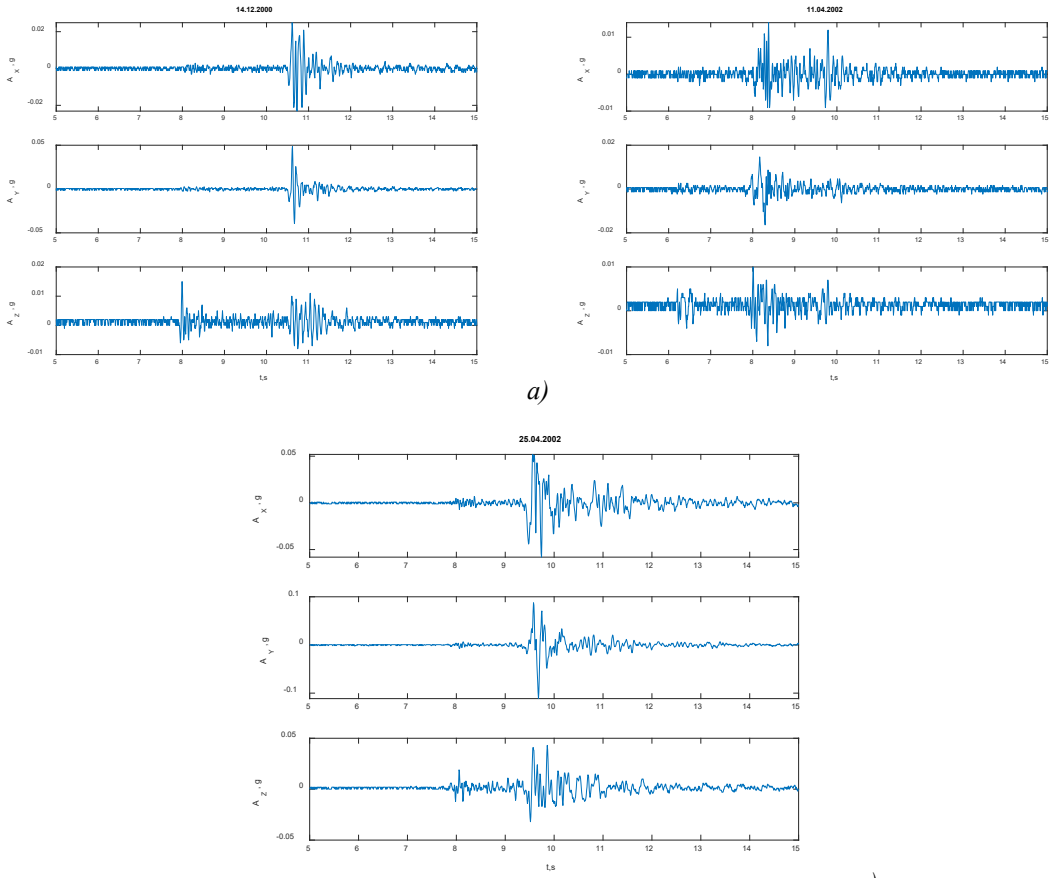


Рис. 4. Акселерограммы Гоубанского 14 декабря 2000 г. (a) и Тбилисских землетрясений: 11 апреля 2002 г. (b) и 25 апреля 2002 г. (c) /
Fig. 4. Accelerograms of the Gouban earthquake on December 14, 2000 (a) and the Tbilisi earthquakes: April 11, 2002 (b) and April 25, 2002 (c)

эпицентральные расстояния, оцененные по расстояниям от макросейсмического центра до станции приведены в таблице 1, содержащей также параметры землетрясений по данным различных источников.

Параметры сейсмических записей

Оценим параметры, используемые для описания эффекта сейсмических воздействий. Традиционно в качестве такого параметра используется ускорение [Karimzadeh, Askan, 2021]. Инструментальные значения сейсмической интенсивности для ускорения определены из регрессионных моделей для многих регионов и, в, первую очередь, с целью быстрой оценки интенсивности сейсмических воздействий после разрушительных землетрясений (например, система ShakeMap в Калифорнии). Много моделей построено также для пиковой скорости. В зависимости от категории объектов в специальных нормах используются скорости и смещения. В американской shake-map инструментальной оценке используются статистические данные для ускорений, скоростей и смещений в зависимости от интенсивности [Wei et al., 2014]. Очевидно, что в разных дипазонах «работает» каждый из этих показателей в силу разного частотного состава. Следующим типом показателя являются спектральные параметры. В работе [Campbell, Bozorgnia, 1994], рассмотрены интенсивность Ариаса и кумулятивная абсолютная скорость. То, что одному и тому же значению сейсмической интенсивности соответствует большой раз-

Таблица 1 / Table 1

Параметры землетрясений / Parameters of earthquakes

Дата и время события по местному времени [Материалы…, 2005] / Event local datetime (UNDP Report) [Materials…, 2005]	Магнитуда, приведенная в (UNDP Report) [Материалы…, 2005] / Magnitude given in (UNDP Report) [Materials…, 2005]	Глубина очага по оперативным данным НССЗ РА / Focus depth according to operational data of NSPS RA	Магнитуда Md по оперативным данным НССЗ РА / Magnitude Md according to operational data of NSPS RA	Дата и время события UTC / UTC DateTime (IRIS)	Mb (IRIS)	Глубина очага (IRIS) / Depth focus (IRIS)	Расстояние до макросейсмического эпицентра, км / Distance to the macroseismic epicenter, km
14.12.2000 19:45	3,6	-	-	2000-12-14 15:45:38.1	3,3	48,7	12,2
11.04.2002 21:38	3,5	2,5	3,4	2002-04-11 16:38:24.1	3,7	10	7,4
25.04.2002 22:41	4,5	2,5	4,3	2002-04-25 17:41:22.44	4,8	10	2,9

брос значений максимальных ускорений известно давно [Шебалин, 1975]. [Karim, Yamazaki, 2002] исследовали связь макросейсмической интенсивности шкалы JMA с пиковыми ускорениями, скоростями и спектральной интенсивностью (SI). В работе [Constantin et al., 2021] приводятся корреляционные соотношения между макросейсмической интенсивностью и пиковыми ускорением и скоростью для землетрясений зоны Вранча. В работе [Androutselis et al., 2020] были исследованы различные параметры для оценки повреждения мостовых сооружений.

В результате анализа можно выделить следующие параметры для оценки инструментальной интенсивности:

1. Кумулятивный квадрат ускорений (модифицированная интенсивность Ариаса, отличается отсутствием множителя π/2g [Arias, 1970]):

$$I_A = \int_0^{t_d} a(t)^2 dt, \qquad (1)$$

$a(t)$ – акселерограмма;
t_d – эффективная продолжительность землетрясения.

2. Кумулятивная абсолютная скорость (Kennedy, Reed, 1988):

$$I_V = \int_0^{t_d} a(t)dt \qquad (2)$$

3. Индекс интенсивности Анга [Ang, 1990]:

$$I_C = (a_{rms})^{3/2} t_d^{\ 1/2}, \qquad (3)$$

a_{rms} – среднеквадратическое ускорение:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d}\int_0^{t_d} a(t)^2 dt}\ .$$

4. Мера Fajfar [Fajfar, 1990]:

$$I_F = PGVt_d^{\ 1/4} \qquad (4)$$

PGV – пиковая скорость

5. Интенсивность Хаузнера [Housner, 1959]:

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T)dT \qquad (5)$$

$S_v(T)$ – спектр псевдоскорости (демпфирование $\xi = 5\%$),
T – период.

6. Индекс полной входной энергии:

$$E_j = \int_0^{t_d} a(t)v(t)dt, \qquad (6)$$

$a(t)$ – ускорение,
$v(t)$ – скорость.

7. Площадь реального спектра [Заалишвили, 1986]:

$$S_r = \int A(f)df \qquad (7)$$

8. Средневзвешенная частота колебаний [Заалишвили, 1986]:

$$f_{aw} = \frac{\int A(f)\cdot fdf}{\int A(f)df} \qquad (8)$$

Таблица 2 / Table 2

Инструментальные параметры сейсмических записей / Instrumental parameters of seismic records

Параметр / Parameter		Горизонтальная компонента / Horizontal component			Вертикальная компонента / Vertical component		
		14.12.2000	11.04.2002	25.04.2002	14.12.2000	11.04.2002	25.04.2002
Пиковое ускорение / Peak acceleration	PHA	0.054	0.017	0.114	0.015	0.010	0.043
Пиковая скорость / Peak velocity	PHV	1.544	0.548	3.453	55.863	52.537	58.500
Пиковое смещение / Peak displacement	PHD	19.293	8.199	12.170	1169.474	1056.662	1285.618
Продолжительность колебаний / Period of vibration	D_5_95	17.117	31.344	2.070	36.398	35.383	26.805
Преобладающий период колебаний / Dominant vibration period	Tm	0.121	0.177	0.209	0.168	0.206	0.202
Средневзвешенная частота/ Weighted average frequency	fw	21.128	26.407	15.074	26.457	27.495	18.041
Период, соответствующий средневзвешенной частоте / Period corresponding to the weighted average frequency	Tw	0.047	0.038	0.066	0.038	0.036	0.055
Кумулятивный квадрат ускорений (модифицированная интенсивность Ариаса) / Cumulative square of accelerations (modified Arias intensity)	IA	0.000033	0.000000	0.000164	0.000003	0.000003	0.000027
Кумулятивная абсолютная скорость (Kennedy, Reed, 1988) / Cumulative absolute velocity (Kennedy and Reed, 1988)	IV	0.000508	0.000044	0.001132	0.000153	0.000153	0.000460
Индекс интенсивности Анга (характеристическая интесивность) (Ang, 1990) / Ang intensity index (characteristic intensity) (Ang, 1990)	IC	0.051517	0.011170	0.061798	0.026277	0.026153	0.051941
Мера Fajfar (1990) / Fajfar measure (1990)	IF	3.140	1.297	4.142	137.21	128.13	133.11
Интенсивность Хаузнера (Housner, 1959) / Housner intensity (Housner, 1959)	IH	1.841	1.454	5.663	0.87	0.86	2.70
Индекс полной входной энергии / Total input energy index	Ej	0.007	0.002	0.043	15.61	13.81	17.13
Площадь реального спектра (Заалишвили, 1998) / Real spectrum area (Zaalishvili, 1998)	Sr	0.054	0.038	0.113	0.037	0.034	0.070

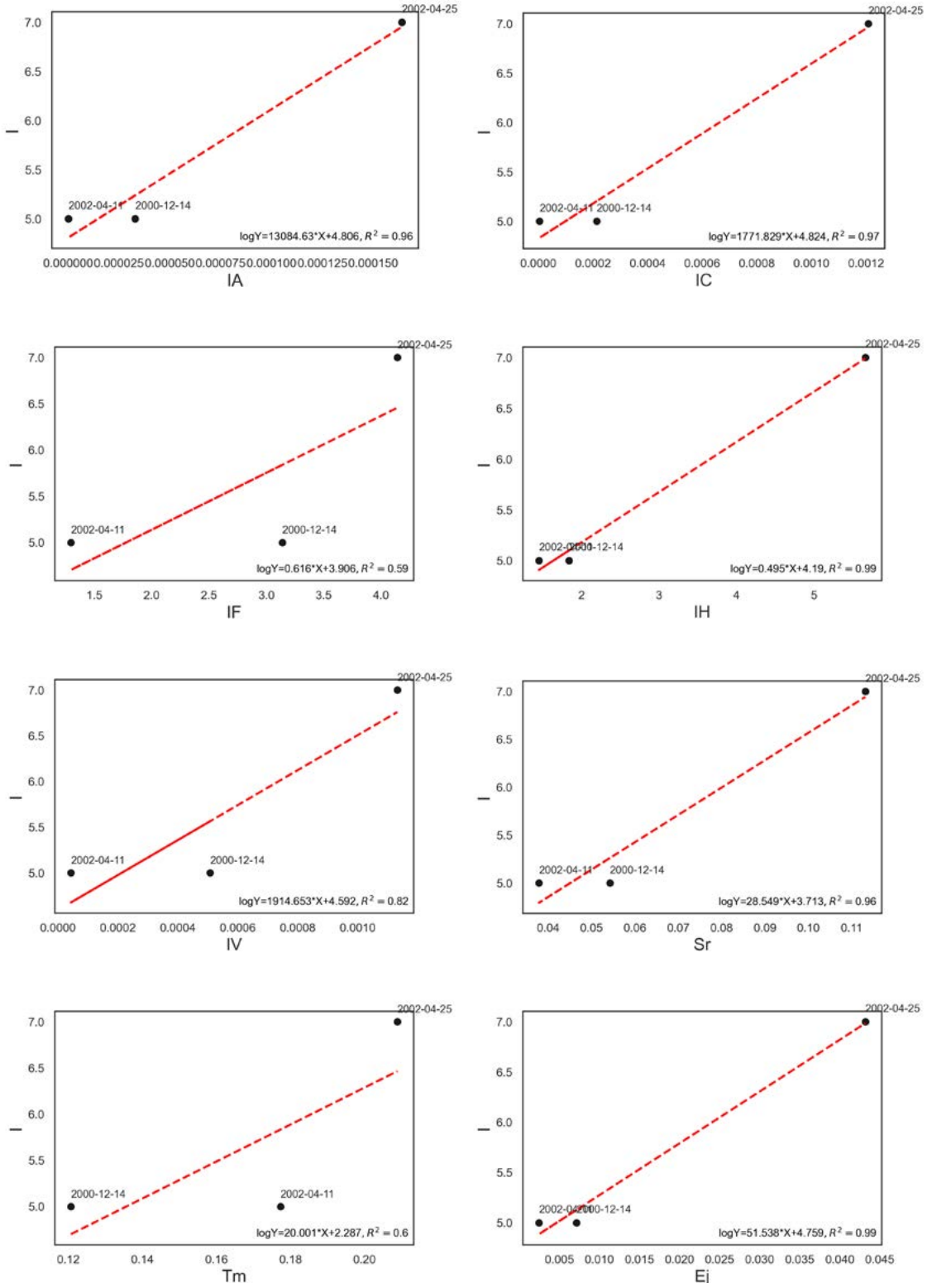


Рис. 5. Соотношение инструметальных парметров оценки интенсивности с макросейсмической интенсивностью (полученные зависимости не являются статистически значимыми и приведены только для иллюстрации общих трендов) /

Fig. 5. Correlation of instrumental parameters for intensity assessment with macroseismic intensity (the obtained dependences are not statistically significant and are given only to illustrate general trends)

9. Преобладающий период колебаний [Rathje et al., 1998]:

$$T_m = \frac{\int A(f)^2 \cdot TdT}{\int A(T)dT}$$

Соответствующие соотношения между рассчитанными параметрами и макросейсмической интенсивностью представлены на рисунке 5. Полученные зависимости не являются статистически значимыми и приведены только для иллюстрации общих трендов. Наилучшее соответствие получено для преобладающего периода колебаний.

Инструментальные параметры можно разделить на амплитудные и спектральные. Макросейсмическая интенсивность оценивается на различные объекты. В связи с этим существенную роль при оценке интенсивности оказывает тип объекта-индикатора, каждый из которых характеризуется собственными частотами и прочностными характеристиками. Для территории Италии исследована связь Интенсивности Хаузнера с макросейсмической интенсивностью в работе [Masi et al., 2019].

Для оценки сейсмических воздействий на устойчивость склонов, при изучении исторических землетрясений использовался преобладающий период [Silva et al., 2017], на основе соответствующих эмпирических данных можно восстановить зоны различной интенсивности. В работе [Wang et al., 2013] предложено корректировать спектральную интенсивность на основе преобладающего периода спектрального ускорения.

Связь интенсивности со спектром акселерограмм исследована в работах Чернова и Соколова [Chernov, Sokolov, 1999]. Для каждой интенсивности шкалы MMI спектральная амплитуда рассматривается в определенном диапазоне репрезентативных частот, которые приведены на рисунке 6 в сравнении с преобладающими частотами. Спектральные особенности отклика на сейсмическое воздействие хорошо описываются спектрами реакции – рис. 7. Хорошо видно, что максимум воздействия с увеличением интенсивности на горизонтальной компоненте ускорений смещается в длиннопериодную область (обозначено пунктиром, соответствующие

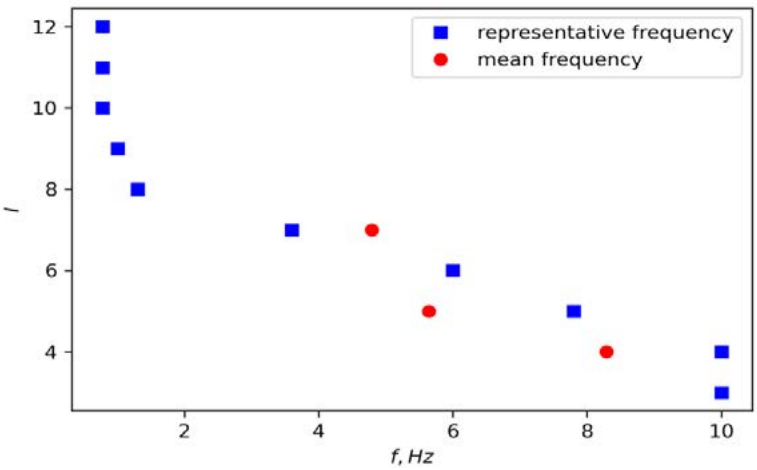
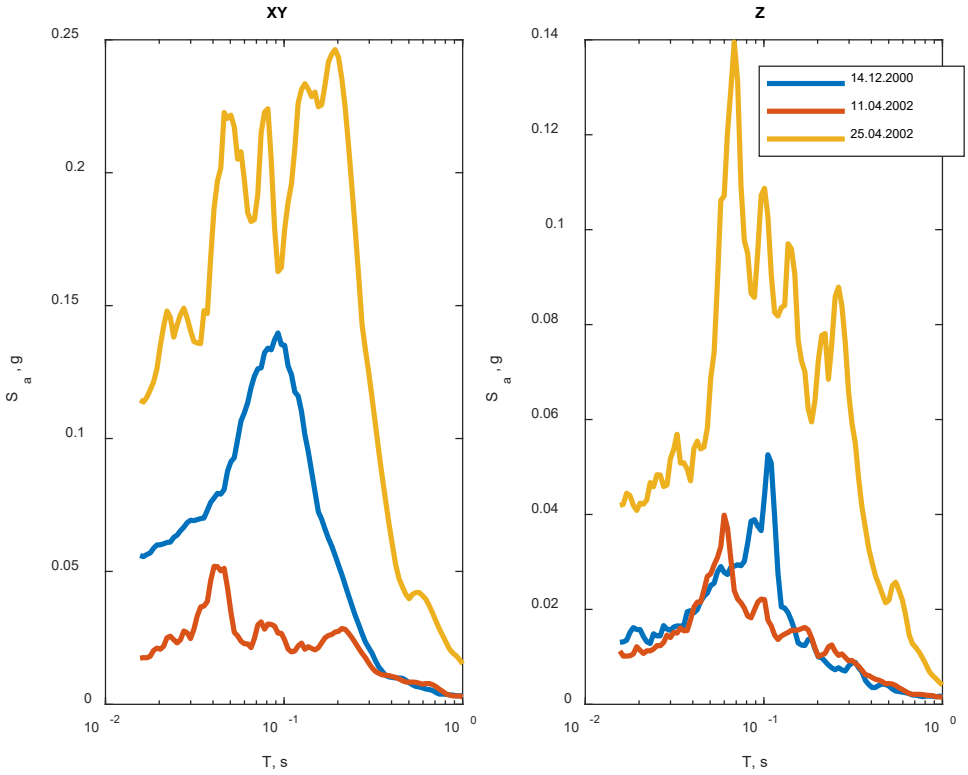
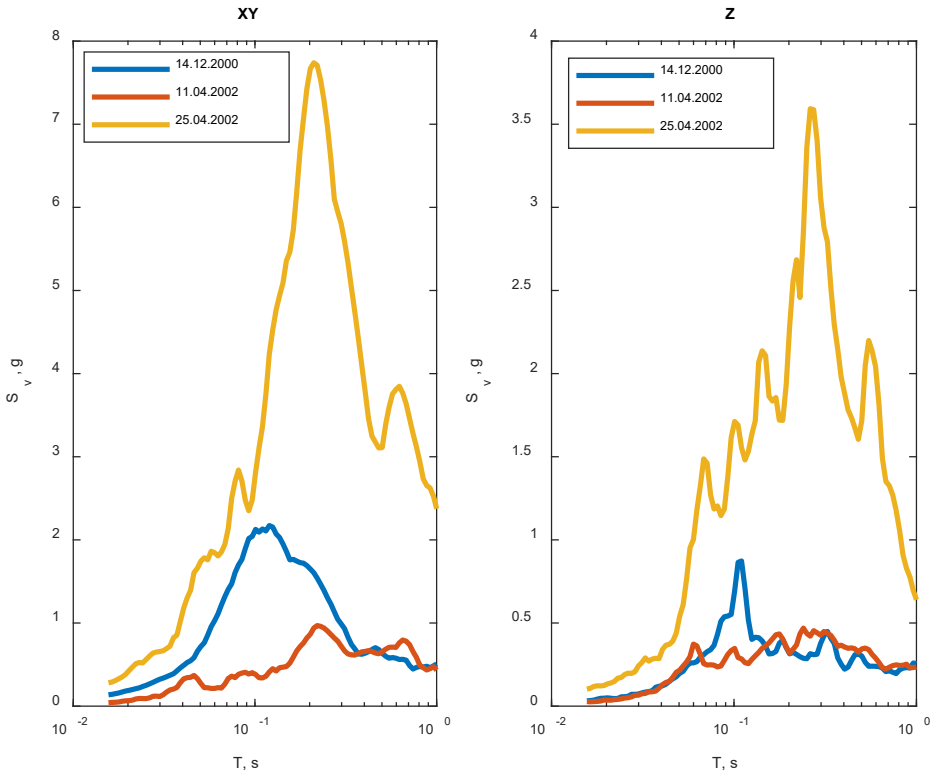


Рис. 6. Репрезентативные частоты, используемые при определении инструментальной интенсивности согласно работе [Chernov, Sokolov, 1999], и средние частоты /
Fig. 6. Representative frequencies used in the determination of instrumental intensity according to [Chernov, Sokolov, 1999], and average frequencies



a)



b)

Рис. 7. Спектры реакции: ускорения (a), скорости (b) для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент /
Fig. 7. Response spectra: acceleration (a), velocity (b) for the horizontal (on the left) and vertical (on the right) components

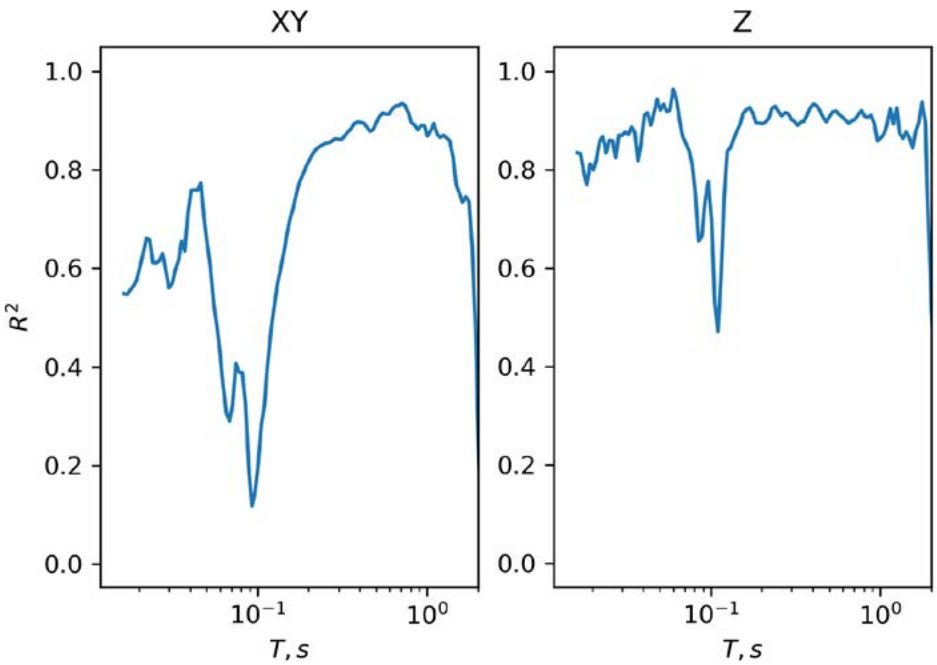


Рис. 8. Величина достоверности аппроксимации спектров реакции и проявленной интенсивности / Fig. 8. The value of the reliability of the approximation of the response spectra and the manifested intensity

периоды: 0,04 с, 0,14 с, 0,21 с). На вертикальной же компоненте наблюдается обратный эффект (периоды: 0,06 с, 0,11 с, 0,07 с). Кроме того здесь же можно выделить интервалы периодов, в которых амплитуды воздействия при Тбилисском землетрясении 11 апреля 2002 г. превышают амплитуды Гоубанского землетрясения 2000 г. (отмечены стрелками), а при условии совпадения данных частот с собственной частотой застройки получим соответствие с проявленной интенсивностью.

В методах машинного обучения выбор лучшей модели осуществляется на основе минимизации выбранной метрики (accuracy, precision, recall и др.). Аналогично может быть сформулирована задача поиска частотных диапазонов рассматриваемых спектральных параметров, наилучшим образом коррелирующих с макросейсмической интенсивностью. В качестве простого примера рассмотрим величину достоверности аппроксимации и сопоставим ее значения на различных периодах (рис. 8). Максимумы соответствуют для горизонтальной компоненты 0,04 с и для вертикальной компоненты 0,06 с.

Результаты работы и их обсуждение

Оценка сейсмической интенсивности является мерой эффекта воздействия сейсмических колебаний на различные объекты, и, в первую очередь, здания и сооружения, последствия которых приводят к разрушениям и соответствующим ущербам. В связи с чем макросейсмическая интенсивность есть параметр, напрямую оценивающий сейсмические риски (как статистические распределения степени и количества повреждений зданий различного типа) [Zaalishvili et al., 2020].

Макросейсмическая интенсивность оценивается на различные объекты. В связи с этим существенную роль при оценке интенсивности оказывает тип объекта-индикатора. Естественно что важнейшими такими объектами являются здания и сооружения, каждый из которых характеризуется собственными частотами и прочностными характеристиками. С появлением новых конструктивных решений тре-

буется актуализация макросейсмических шкал, и в этой связи следует отметить, что подобная работа в РФ выполнена в форме нового поколения сейсмической шкалы (ГОСТ) [Аптикаев, 2021; Aptikaev, Erteleva, 2017; Aptikaev et al., 2021]. В работе [Yazgan, 2015], например, предложена методика оценки моделей уязвимости зданий, в которой для классов RC12, RC34 и RC56 рассматривается спектральное ускорение для периодов: 0,15 с, 0,35 с и 0,55 с.

Актуальной остается задача нахождения инструментального параметра (набора параметров), наилучшим образом описывающего макросейсмическую интенсивность. Вероятно, по аналогии с новой шкалой, для каждого типа зданий может быть введена своя мера воздействия, как, например, это сделано в работе [Yazgan, 2015], где используются значения спектра реакции в единицах ускорений для различных периодов.

В работе рассмотрены различные инструментальные показатели сейсмического воздействия по данным землетрясений на территории Тбилиси. Установлено, что наилучшим образом сейсмический эффект описывается энергетическими показателями, такими как кумулятивная скорость (интенсивность Ариаса), площадь реального спектра, площадь спектральной псевдоскорости (интенсивность Хаузнера). С данными показателями тесно связаны такие параметры как преобладающий период и продолжительность колебаний.

Рассмотрено уточнение спектральных параметров – площадей спектров и спектров реакции (для ускорений и скоростей) в различных интервалах периодов. В результате исследований наилучшее соответствие с макросейсмической интенсивностью получено для периодов 0,04-0,05 с и 0,16-1,5 с. Предполагается совпадение воздействия в данных интервалах с собственными периодами застройки. Также следует отметить, что в силу близкого расстояния достаточно большие значения наблюдаются на вертикальной компоненте, что также обусловило заметное отличие реакции застройки от среднестатистических данных, в которых рассматривается максимальное горизонтальное ускорение.

Рассмотренные записи показывают сложность формирования сейсмического поля в ближней зоне землетрясений, любые выводы, в том числе параметры инструментальной оценки макросейсмической интенсивности. В то же время, необходимо отметить, что полученные в данной работе результаты, требуют статистического обоснования. В этой связи совершенно необходимым является развитие сетей сильных движений на Северном Кавказе, в особенности в связи с возрастающими темпами строительства и повышением этажности застройки, сопровождающимися новыми конструктивными решениями.

Для непосредственной оценки разрушительного потенциала различных показателей грунтового движения необходимо рассмотреть их корреляционную взаимосвязь с интенсивностью проявления сейсмического воздействия, т. е. для установления весового вклада различных показателей грунта в формирование чувствительности к сейсмическому воздействию землетрясения, необходимо установить связь сейсмического эффекта землетрясений с соответствующими или сопутствующими показателями инструментальных записей колебаний грунтов. Такой подход к решению основной задачи исследования представляет основную концепцию формирования связи интегрального сейсмического эффекта землетрясения с тем или иным показателем движения грунтов, характеризуемую логической целесообразностью причинно-следственной связи.

Апрельские землетрясения 2002 года в Тбилиси отличались тем, что впервые на постсоветской территории без наличия весьма сильного землетрясения (Спитак, 1988; Рача, 1991) целенаправленно был получен целый набор инструментальных записей ускорений землетрясений в цифровом виде. В то же время, в отличие от Гоубанского землетрясения 14 декабря 2000 года апрельские землетрясения были

записаны на территории, где прямо под толщей грунтов, слагающих ее, находился очаг достаточно сильного, скорее умеренного землетрясения. Поэтому обработка записей землетрясения представляла, несомненно, большой практический и научный интерес.

В то же время, необходимо отметить, что точность определения важнейших характеристик такого неглубокого землетрясения, а именно, магнитуды, глубины очага и т. д., связана с большими погрешностями и может достигать значительных величин.

С другой стороны, хорошо известно, что эмпирические уравнения макросейсмического поля (Шебалин Н. В., Варазанашвили О. Ш., Папалашвили В. Г. и т. д.), устанавливались, как правило, именно по сильным и, при этом, удаленным землетрясениям. Поэтому для подобных землетрясений, охватывающих большие пространства, точность определения магнитуды или глубины очага, как самостоятельных параметров, вполне удовлетворительна. При этом вполне удовлетворительна и точность определения интенсивности землетрясения.

Для неглубоких землетрясений получаемые результаты, учитывая большой разброс основных исходных параметров, с точки зрения задачи сейсмологии, до некоторой степени также достаточно удовлетворительны. В то же время, никому из сейсмологов не придет в голову определять по ним абсолютное значение интенсивности. Другими словами, связывать количественно весьма неточные исходные сейсмологические данные, обусловленные особенностями неглубокого землетрясения, с проявленной или ожидаемой интенсивностью совершенно неприемлемо.

Также совершенно неприемлемым является анализ абсолютной величины ускорения, полученного инструментальным путем, связывать, а точнее определять или подтверждать по нему количественную величину проявленной интенсивности. Специалистам, работающим в области инженерной сейсмологии, хорошо известно, что корреляция между вышеприведенными и другими параметрами может иметь лишь статистический смысл. Другими словами, большинство эмпирических уравнений справедливо лишь для достаточно большого числа рассматриваемых событий. Таким образом, получение той или иной величины в уравнениях макросейсмического поля имеет явно вероятностный смысл. В то же время, большинство параметров таких событий были получены в скудно инструментальный период (во всяком случае, для Кавказа) и именно для удаленных землетрясений. Отсутствие статистического числа значащих событий происшедших под городом для вертикально распространяющихся волн не позволяет делать тех или иных количественных выводов.

Выводы

1. Апрельские землетрясения 2002 года в Тбилиси характеризуются тем, что впервые на постсоветской территории без наличия весьма сильного землетрясения (Спитак, 1988; Рача, 1991) целенаправленно был получен целый набор инструментальных записей ускорений землетрясений в цифровом виде и проведено макросейсмическое обследование территории с плотной застройкой.

2. В ближней зоне разрушительного землетрясения в спектральном составе сейсмического воздействия проявилась предварительная вертикальная высокочастотная (ВЧ) составляющая, значительно превышающая по амплитуде т. н. «основной» сигнал на всех трех составляющих.

3. Появление большой амплитуды ВЧ составляющей сигнала сопутствует неупругим явлениям в среде и выявляется на ближних расстояниях от источника. На это указывают результаты исследований записей в ближней зоне сильных землетрясений и также специальных экспериментов.

4. Рассмотрены различные инструментальные показатели сейсмического воздействия по данным землетрясений на территории Тбилиси. Установлено, что наилучшим образом сейсмический эффект описывается энергетическими показателями, такими как: кумуля-

тивная скорость (интенсивность Ариаса), площадь реального спектра, площадь спектральной псевдоскорости (интенсивность Хаузнера). С данными показателями тесно связаны такие параметры как преобладающий период и продолжительность колебаний.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (3). – С. 55-62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005

2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи. // Автореф. канд. дисс. – Тб., 1986. – 21 с.

3. Заалишвили В.Б., Одишария А.В., Тимченко И.Э., Отинашвили М.Г., Гогмачадзе С.А., Заалишвили З.В. Инженерное макросейсмическое обследование эпицентральной зоны землетрясения 14 декабря 2000 г. // Теория сооружений и сейсмостойкость. ИСМИС им. К.С. Завриева АН Грузии, №2. – Тб., 2001. – С. 51-59.

4. Заалишвили В.Б., Одишария А.В., Тимченко И.Э., Отинашвили М.Г., Гогмачадзе С.А., Заалишвили З.В. Инженерное макросейсмическое обследование эпицентральной зоны землетрясения 14 декабря 2000 г. // Геология и Геофизика Юга России. – 2014. – Т. 4. №1. – С. 30-38.

5. Материалы Тбилисского землетрясения 25 апреля 2002 года. Академия наук Грузии. Институт строительной механики и сейсмостойкости им. К.С. Завриева. – Тб., 2005. – 268 с.

6. Шебалин Н.В. Об оценке сейсмической интенсивности. // Сейсмическая шкала и методы оценки сейсмической интенсивности. – М.: Наука, 1975.

7. Androutselis T., Sarwar M.T., Eker U., Anastasopoulos P.C., Sakellariadis L., Agalianos A., & Anastasopoulos I. Real-Time Seismic Damage Assessment of Various Bridge Types Using a Nonlinear Three-Stage Least Squares Approach. // Journal of Infrastructure Systems. – 2020. – Vol. 26 (3). – Article 04020019. DOI: 10.1061/ (asce) is. 1943-555x. 0000551

8. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. Proc. 4th U. S. // National Conf. Earth Amg., EERI, Palm Spring. – 1990. – Vol. 1. – pp. 29-45.

9. Aptikaev F.F., & Erteleva O.O. A New Generation Russian Seismic Scale. // Seismic Instruments. – 2017. – Vol. 53 (2). – pp. 146-154. DOI: 10.3103/s0747923917020025

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

11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in Seismic Design for Nuclear Power Plants. // R.J. Hansen (Editor). MIT Press, Cambridge, Massachusetts. – 1970. – pp. 438-483.

12. Campbell K.W., Bozorgnia Y. Empirical analysis of strong ground motion from the 1992 Landers, California, earthquake. – Bull. Seismol. Soc. Am. – 1994. – Vol. 84. No. 3. – pp. 573-588.

13. Chernov Yu.K., and Sokolov V.Yu. Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra. // Phys. Chem. Earth. – 1999. – Vol. 24 (6). – pp. 523-528.

14. Constantin A.P., Moldovan I.A., Partheniu R., Grecu B., & Ionescu C. Correlations between macroseismic intensity values and ground motion measures of Vrancea (Romania) subcrustal earthquakes. // Romanian Journal of Physics. – 2021. – Vol. 66 (5-6). – Article 808.

15. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. // Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, vol. 2. – 1995. – pp. 1169-1178

16. Gabrichidze G., Lomidze G., Mukhadze T., Odisharia A., Timchenko I. April 2002 epicentral earthquake in Tbilisi, Georgia. // 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada August 1-6, 2004. Paper No. 1063.

17. Housner G.W. Behavior of structures during earthquakes. // J. Eng. Mech. Div. ASCEI. – 1959. – Vol. 85. – pp. 109-129.

18. Javahishvili et al. the Tbilisi earthquake of April 25, 2002 in the context of the seismic hazard of the Tbilisi urban area Article in Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata September. // Boll. Geof. Teor. Appl. – 2004. – Vol. 45. – pp. 169-185

19. Karim K.R., & Yamazaki F. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters. // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2002. – Vol. 31 (5). – pp. 1191-1212. DOI: 10.1002/eqe. 158

20. Karimzadeh S., & Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Vol. 14 (5). – Article 396. https://doi. org/10.1007/s12517-021-06812-1

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

22. Rathje E. M., Abrahamson N. A., and Bray J. D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 1998. – Vol. 124. – pp. 150-159.

23. Silva P. G., Elez J., Giner-Robles J. L., Rodriguez-Pascua M. A., Perez-Lopez R., Roquero E., Martinez-Grana A. ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. // Quaternary International. – 2017. – Vol. 451. – pp. 185-208. DOI: 10.1016/j. quaint. 2016.10.020

24. Wang Y. S., Li X. J., & Zhou Z. H. A new instrumental measure of epicentral shaking intensity in Western China. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2013. – Vol. 11 (4). – pp. 913-924. DOI: 10.1007/s10518-013-9428-5

25. Wei Li, Shanyou Li, Liang Li, and Jinglong Han Computational Research on Seismic Intensity Based on Ground Motion Parameters. // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 838-841. – pp. 1595-1599.

26. Yazgan U. Empirical seismic fragility assessment with explicit modeling of spatial ground motion variability. // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 100. – pp. 479-489. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2015.06.027

27. Zaalishvili V. B., Gogmachadze S. A. Geomorfological aspects of earthquake intensity effect in highlands. Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Kluwer academic Publishers. – Dordrecht/Boston/ London, 2000. – pp. 137-144.

28. Zaalishvili V. B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D. A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2020. – Vol. 10. No. 3. – pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

References

1. Aptikaev F. F. An exceedance probability of the influence in the Building Code. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 55-62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005 (In Russ.)

2. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation according to the data of artificial excitation of vibrations of the soil stratum. Thesis of Cand. diss. Tbilisi, 1986, 21 p. (In Russ.)

3. Zaalishvili V. B., Odisharia A. V., Timchenko I. E., Otinashvili M. G., Gogmachadze S. A., Zaalishvili Z. V. Engineering macroseismic survey of the epicentral zone of the earthquake occurred on December 14, 2000. Theory of structures and seismic resistance. ISMEE named after K. S. Zavriev of the Academy of Sciences of Georgia, No. 2. Tbilisi, 2001, pp. 51-59. (In Russ.)

4. Zaalishvili V. B., Odisharia A. V., Timchenko I. E., Otinashvili M. G., Gogmachadze S. A., Zaalishvili Z. V. Engineering macroseismic survey of epicentral area of the earthquake on 14 December 2000. Geology and Geophysics of Russian South. 2014. Vol. 4. No. 1. pp. 30-38. (In Russ.)

5. Materials of the Tbilisi earthquake on April 25, 2002. Academy of Sciences of Georgia. Institute of Structural Mechanics and Earthquake Engineering named after K. S. Zavriev. Tbilisi, 2005. 268 p. (In Russ.)

6. Shebalin N. V. On the assessment of seismic intensity. Seismic scale and methods for assessing seismic intensity. Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.)

7. Androutselis T., Sarwar M. T., Eker U., Anastasopoulos P. C., Sakellariadis L., Agalianos A., & Anastasopoulos I. Real-Time Seismic Damage Assessment of Various Bridge Types Using a Nonlinear Three-Stage Least Squares Approach. Journal of Infrastructure Systems. 2020. Vol. 26 (3). Article 04020019. DOI: 10.1061/ (asce) is. 1943-555x. 0000551

8. Ang A. H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. Proc. 4th U. S. National Conf. Earth Amg., EERI, Palm Spring. 1990. Vol. 1. pp. 29-45.

9. Aptikaev F.F., & Erteleva O.O. A New Generation Russian Seismic Scale. Seismic Instruments. 2017. Vol. 53 (2). pp. 146-154. DOI: 10.3103/s0747923917020025

10. Aptikaev F.F., Erteleva O.O., & Tokmulina G.M. Correlation between the Points of Different Seismic Intensity Scales. Seismic Instruments. 2021. Vol. 57 (1). pp. 75-87. DOI: 10.3103/s0747923921010035

11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in Seismic Design for Nuclear Power Plants. R.J. Hansen (Editor). MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 1970. pp. 438-483.

12. Campbell K.W., and Bozorgnia Y. Empirical analysis of strong ground motion from the 1992 Landers, California, earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am. 1994. Vol. 84. No. 3. pp. 573-588.

13. Chernov Yu.K., and Sokolov V.Yu. Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra. Phys. Chem. Earth. 1999. Vol. 24 (6). pp. 523-528.

14. Constantin A.P., Moldovan I.A., Partheniu R., Grecu B., & Ionescu C. Correlations between macroseismic intensity values and ground motion measures of Vrancea (Romania) subcrustal earthquakes. Romanian Journal of Physics. 2021. Vol. 66 (5-6). Article 808.

15. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, vol. 2. 1995. pp. 1169-1178

16. Gabrichidze G., Lomidze G., Mukhadze T., Odisharia A., Timchenko I. April 2002 epicentral earthquake in Tbilisi, Georgia. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada August 1-6, 2004. Paper No. 1063.

17. Housner G.W. Behavior of structures during earthquakes. J.Eng. Mech. Div. ASCEI. 1959. Vol. 85. pp. 109-129.

18. Javahishvili et al. the Tbilisi earthquake of April 25, 2002 in the context of the seismic hazard of the Tbilisi urban area Article in Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata September. Boll. Geof. Teor. Appl. 2004. Vol. 45. pp. 169-185

19. Karim K.R., & Yamazaki F. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2002. Vol. 31 (5). pp. 1191-1212. DOI: 10.1002/eqe. 158

20. Karimzadeh S., & Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. Arabian Journal of Geosciences. 2021. Vol. 14 (5). Article 396. https://doi. org/10.1007/s12517-021-06812-1

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

22. Rathje E.M., Abrahamson N.A., and Bray J.D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1998. Vol. 124. pp. 150-159.

23. Silva P.G., Elez J., Giner-Robles J.L., Rodriguez-Pascua M.A., Perez-Lopez R., Roquero E., Martinez-Grana A. ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. Quaternary International. 2017. Vol. 451. pp. 185-208. DOI: 10.1016/j. quaint. 2016.10.020

24. Wang Y.S., Li X.J., & Zhou Z.H. A new instrumental measure of epicentral shaking intensity in Western China. Bulletin of Earthquake Engineering. 2013. Vol. 11 (4). pp. 913-924. DOI: 10.1007/s10518-013-9428-5

25. Wei Li, Shanyou Li, Liang Li, and Jinglong Han Computational Research on Seismic Intensity Based on Ground Motion Parameters. Advanced Materials Research. 2014. Vol. 838-841. pp. 1595-1599.

26. Yazgan U. Empirical seismic fragility assessment with explicit modeling of spatial ground motion variability. Engineering Structures. 2015. Vol. 100. pp. 479-489. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2015.06.027

27. Zaalishvili V.B., Gogmachadze S.A. Geomorfological aspects of earthquake intensity effect in highlands. Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Kluwer academic Publishers. Dordrecht/Boston/ London, 2000. pp. 137-144.

28. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 550.8.011:553.041 (470.62)
DOI: 10.46698/VNC.2022.39.85.008

Оригинальная статья

Оценка потенциальной золотоносности Тырныаузского рудного узла на основе дистанционных геофизических данных (Северный Кавказ)

С. Г. Парада

Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр Российской академии наук», Россия, 344005, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: maurmar@yandex.ru;

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

Статья поступила: 21.01.2022, доработана: 27.02.2022, одобрена в печать: 02.03.2022

Резюме. **Актуальность** темы предлагаемой статьи определяется необходимостью создания научно-методических основ разработки новых экологически безопасных методов и технологий дистанционной оценки потенциальной золотоносности рудоносных территорий по геофизическим данным. Выявленные в последние годы золотоносные рудопроявления в пределах Тырныаузского рудного узла обладают признаками промышленно значимых объектов. В связи с чем предполагается возможность переоценить минерагенический потенциал тырныаузского и других неоген-четвертичных интрузивных комплексов центральной части Большого Кавказа на основе использованной в данном случае металлогенической концепции золоторудных систем. **Цель исследования.** Исследование особенностей отображения в потенциальных полях редкометалльных и золоторудных месторождений и рудопроявлений Тырныаузского рудного узла (Северный Кавказ). **Материалы и методы работы.** Сопоставительный анализ геологического строения, металлогенической нагрузки и трансформант потенциальных полей, полученных по геофизическим данным, представленным в виде цифровых моделей полей аэромагниторазведки и гравиразведки к комплекту карт геофизической основы Геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 по листу K-38,39. По этим данным для исследуемой территории построены карты локальных аномалий гравитационного и магнитного полей, выделенных на основе анализа амплитудных характеристик и отражающих распределение плотностных и магнитных характеристик горных пород. **Результаты работы.** Показано, что золоторудный потенциал рудно-магматических систем определяется возможностью взаимодействия гранитоидной магмы с обогащенным золотом субстратом. В этом качестве могут выступать основные и ультраосновные породы и (или) магмы, а также углеродисто-терригенные толщи с повышенным кларком Au. Области такого взаимодействия выявляются при анализе гравиметрических и магнитометрических карт. Установлено, что золоторудные проявления Тырныаузского рудного узла располагаются там, где в пределах гравитационного минимума фиксируются аномально повышенные значения магнитного поля. Редкометалльное месторождение и рудопроявления располагаются за пределами положительных магнитных аномалий. Это дает ключ к оценке перспектив золотоносности рудно-магматических систем Северного Кавказа на основе дистанционных геофизических данных.

Ключевые слова: золото, вольфрам, молибден, рудопроявления, дистанционные методы, потенциальные поля, геофизические аномалии.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках государственного задания на научно-исследовательские работы Геофизического института ВНЦ РАН и Южного научного центра РАН, № государственной регистрации 122020100345-8.

Для цитирования: Парада С.Г. Оценка потенциальной золотоносности Тырныаузского рудного узла на основе дистанционных геофизических данных (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 109–118. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.85.008.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

DOI: 10.46698/VNC.2022.39.85.008

Original paper

Assessment of the potential gold content of the Tyrnyauz ore node based on remote geophysical data (North Caucasus)

S.G. Parada

Federal State Budget Institution of Science "Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: maurmar@yandex.ru;

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

Reseived: 21.01.2022, revised: 27.02.2022, accepted: 02.03.2022

Abstract: The relevance of the topic of the proposed article is determined by the need to create scientific and methodological foundations for the development of new environmentally safe methods and technologies for remote assessment of the potential gold content of ore-bearing territories based on geophysical data. The gold-bearing ore occurrences identified in recent years within the Tyrnyauz ore node have signs of industrially significant objects. In this connection, it is assumed that it is possible to overestimate the minerogenic potential of the Tyrnyauz and other Neogene-Quaternary intrusive complexes of the central part of the Greater Caucasus on the basis of the metallogenic concept of gold ore systems used in this case. **Aim**. Investigation of the features of mapping in potential fields of rare-metal and gold deposits and ore occurrences of the Tyrnyauz ore node (North Caucasus). **Materials and methods**. Comparative analysis of the geological structure, metallogenic load and transformant potential fields obtained from geophysical data presented in the form of digital models of aeromagnetization and gravity exploration fields to a set of maps of the geophysical basis of the Geological Map of the Russian Federation scale 1:1,000,000 on sheet K-38.39. Based on these data, maps of local anomalies of gravitational and magnetic fields were constructed for the studied area, isolated based on the analysis of amplitude characteristics and reflecting the distribution of density and magnetic characteristics of rocks. **Results**. It is shown that the gold-ore potential of ore-magmatic systems is determined by the possibility of interaction of granitoid magma with a gold-enriched substrate. Basic and ultrabasic rocks and (or) magmas, as well as carbon-terrigenous strata with an increased Au clarke can act in this capacity. The areas of such interaction are revealed by analyzing gravimetric and magnetometric maps. It is established that the gold-ore manifestations of the Tyrnyauz ore node are located where abnormally elevated values of the magnetic field are recorded within the gravitational minimum. The rare metal deposit and ore occurrences are located outside the positive magnetic anomalies. This provides a key to assessing the prospects for the gold content of ore-magmatic systems of the North Caucasus on the basis of remote geophysical data.

Keywords: gold, tungsten, molybdenum, ore occurrences, remote methods, potential fields, geophysical anomalies.

Acknowledgement: The article was prepared as part of the state assignment for research work of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and of the Southen Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, State registration №122020100345-8.

For citation: Parada S.G. Assessment of the potential gold content of the Tyrnyauz ore node based on remote geophysical data (North Caucasus). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 109–118. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.85.008.

Введение

Металлогения Тырныаузской рудно-магматической системы до последнего времени предполагала W-Mo-Sn-Cu – специализацию. Действительно, с гранитоидами Тырныаузского интрузивного комплекса связано крупное молибден-вольфрамовое месторождение Тырныауз. Оно открыто в 1940 году и с тех пор эксплуатировалось и изучалось до 2001 г. Из молибден-вольфрамовых руд попутно извлекались Bi и Cu. Извлечено также более 24 тонн золота при его среднем содержании 0,101 г/т. Считалось, что золото лишь сопутствует Mo-W рудам и поэтому в качестве объекта поисков, представляющего самостоятельный интерес, не рассматривалось. В период эксплуатации Тырныаузского месторождения и после не прекращались попытки найти более богатые Mo-W руды. При этом проводились дополнительные анализы отдельных проб на наличие в них золота и др. рудных элементов. В связи с этим поисковая изученность рудного узла и его окрестностей, в том числе на золото, считалась весьма высокой. Тем не менее, как оказалось, перспективные золоторудные объекты были пропущены.

С одной стороны предлагается разработка и внедрение новых более эффективных технологий добычи и переработки традиционных для региона редкометалльных и полиметаллических руд [Дребенштедт и др., 2018], с другой – переоценка известных рудных районов на наличие высоколиквидных руд золота и поиски новых золоторудных объектов на не исследованных ранее территориях [Иванов и др., 2018]. В последнем случае имеется возможность предварительной оценки потенциальной золотоносности территорий на основе дистанционных геофизических методов, которые являются эффективным средством минимизации ущерба окружающей среде при проведении геологоразведочных работ в условиях горных территорий [Серокуров, 2011; Masoumi et al., 2017; Керимов, 2021]. Обобщение опыта использования дистанционных геофизических данных при выполнении работ в пределах перспективных на золото горных территорий и конкретные примеры приведены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях [Заалишвили и др., 2015; Guangxi et al., 2016; Kerr et al., 2016; Ma Xiao-lei et al., 2016; Калмыков и др., 2017].

Цель исследования. Разработка научно-методической основы экологически безопасной дистанционной оценки потенциальной золотоносности горных территорий на примере Тырныаузского рудного узла (Северный Кавказ).

Методы исследования

Сопоставительный анализ геологического строения, металлогенической нагрузки и трансформант потенциальных полей, полученных по геофизическим данным, представленным в виде цифровых моделей полей аэромагниторазведки и гравиразведки к комплекту карт геофизической основы Геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 по листу K-38,39 (Махачкала), раз-

работанных в ВИРГ-Рудгеофизика им. А. А. Логачева МПР РФ, Санкт-Петербург, 2002 г. По этим данным для исследуемой территории построены карты локальных аномалий гравитационного и магнитного полей, выделенных на основе анализа амплитудных характеристик и отражающих распределение плотностных и магнитных характеристик горных пород.

Результаты работы и их обсуждение

По результатам поисковых работ, осуществленных в 2010-2011 гг. при непосредственном руководстве Парады С. Г. выявлены кондиционные рудопроявления золота, обнаруживающие генетическую связь с тырныаузским неоген-четвертичным интрузивным комплексом [Носова и др., 2008; Бубнов и др., 2011], осуществлены их геологическая, минералогическая и геохимическая интерпретации, оценены прогнозные ресурсы золота, объем которых соответствует крупному золоторудному объекту. Показано, что золотое оруденение относится к золото-порфировому типу (по Р. Силитое [Sillitoe, 2010]) [Parada et al., 2017]. Выявление золотоносных проявлений в Тырныаузском рудном узле, обладающих признаками промышленно значимых объектов, предоставляет возможность переоценить минерагенический потенциал тырныаузского и других неоген-четвертичных интрузивных комплексов центральной части Большого Кавказа на основе использованной в данном случае металлогенической концепции золоторудных систем, основные положения которой изложены в [Eirish, 2010]. В соответствии с данной концепцией золоторудный потенциал рудно-магматических систем определяется возможностью взаимодействия гранитоидной магмы с обогащенным золотом субстратом. В этом качестве могут выступать основные и ультраосновные породы и (или) магмы, а также углеродисто-терригенные толщи с повышенным кларком Au. Области такого взаимодействия выявляются при анализе гравиметрических и магнитометрических карт. Возможности применения названной концепции с использованием дистанционных геофизических данных для оценки потенциальной золотоносности рудно-магматических систем обоснованы в [Hart, 2007; Anderson et al., 2016; Носырев, 2016; Root et al., 2017; Парада, 2021]. Ниже приводятся результаты такой оценки для горных территорий Большого Кавказа на примере Тырныаузского рудного узла.

На рисунке 1 показано положение Тырныаузского Mo-W месторождения и рудопроявлений различных металлов в пределах Тырныаузского рудного узла относительно гравитационного минимума и неоднородностей аномального магнитного поля. Гравитационный минимум связан с очагом неоген-четвертичного кислого магматизма, фиксируемого на поверхности наличием даек и штоков лейкократовых гранитов, массива эльджуртинских биотитовых гранитов, некков липаритов, а также обширным ареалом ороговикования и различных метасоматических изменений палеозойских осадочно-вулканогенных пород.

По северной и северо-восточной периферии гравитационного минимума располагаются крупное Mo-W месторождение Тырныауз и рудопроявления таких элементов как W, Mo, Sn, Au, Pb, Zn, Sb. Особенности пространственного распределения в пределах месторождений и рудопроявлений этих элементов в Тырныаузском рудном узле соответствуют классической рудной зональности магматогенно-рудной системы. Очевидно, что тырныаузская магматогенно-рудная система обладает признаками классической порфировой модели по R. Sillitoe [Sillitoe, 2010], а также соответствует глубинной геофизической модели, охарактеризованной в работе [Spichak et al., 2017].

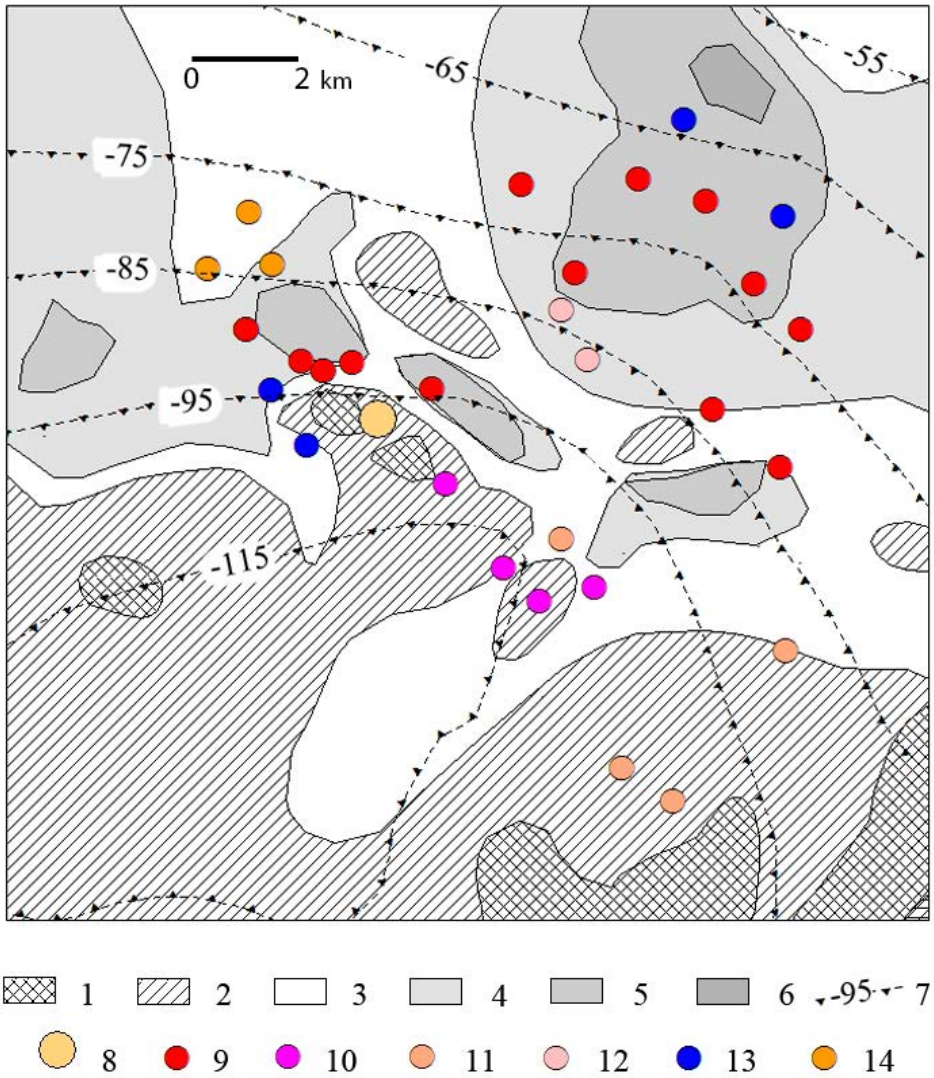


Рис. 1. Расположение месторождений и рудопроявлений Тырныаузского рудного узла (8–14) относительно неоднородностей магнитного (1-6) и гравитационного (7) полей. 1-6 – аномалии магнитного поля (ΔT), нТл:
1 – <-50; 2 – –50 ÷ 0; 3-0 ÷ 50; 4-50 ÷ 100, 5-100 ÷ 200, 6 – >200;
7 – изоаномалы гравитационного поля (Δg), мГл; 8 – Mo-W месторождение Тырныауз; 9-14 – рудопроявления: 9 – золота, 10 – олова, 11 – вольфрама, 12 – молибдена, 13 – свинца, 14 – сурьмы / Fig. 1. Distribution of deposits and ore mineralization of the Tyrnyauz ore node (8–14) relatively to inhomogeneities of magnetic (1 – -6) and gravitation (7) fields. 6 – anomalies of magnetic field (ΔT), nTl: 1 – <–50, 2 – -50÷0, 3-0÷+50, 4 – +50÷+100, 5-100 ÷ 200, 6 – >200, 7 – isoanomalies of gravitation field (Δg), mGl; 8 – Mo-W deposit Tyrnyauz; 9-14 – ore mineralization of: 9 – gold, 10 – tin, 11 – tungsten, 12 – molybdenum, 13 – lead, 14 – antimony

Однако самородное золото не вписывается в указанную зональность. Оно обнаруживается в гранатовых и пироксен-гранатовых скарнах Зыгыркольской зоны Северного фланга Тырныаузского рудного узла. В этих скарнах отсутствуют шеелит, молибдошеелит и молибденит. Такие золотоносные скарны расположены севернее продуктивных на вольфрам и молибден скарнов. В золотоносных и вольфрамоносных скарнах иногда отмечается наложенная гидротермальная минерализация. Последовательность выделения и температуры образования рудных минералов показаны на рисунке 2.

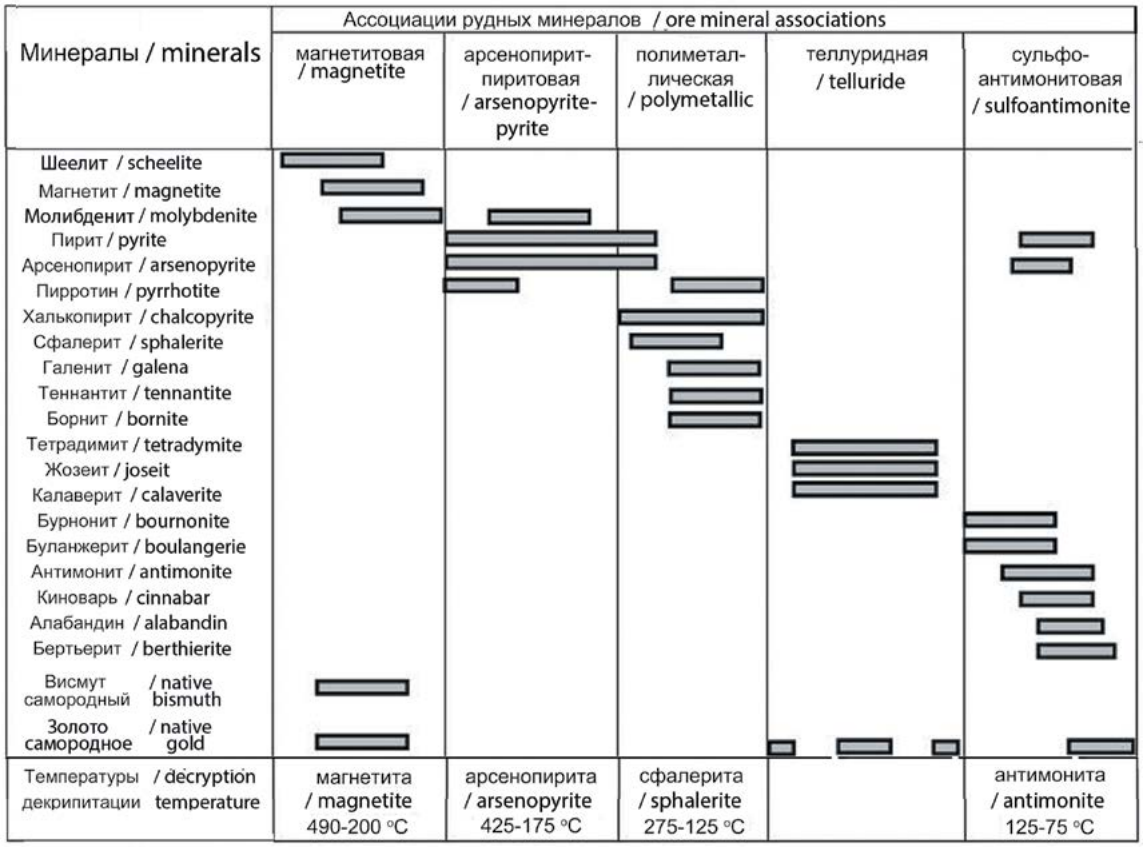


Рис. 2. Последовательность и температурные интервалы отложения главных минералов в рудоносных метасоматитах Тырныаузского рудного узла/
Fig. 2. Sequence and temperature intervals of deposition of main minerals in ore-bearing metasomatites of the Tyrnyauz ore node

Согласно рисунку 2 самородное золото в скарнах Северного фланга Тырныаузского рудного узла отложилось в раннюю магнетитовую стадию, одновременно с отложением шеелита в продуктивных на вольфрам и молибден скарнах Центральной части рудного узла.

По данным мелкомасштабной магнитной съемки, согласно рисунку 1, эпицентр гравитационного минимума представлен салическим субстратом, обладающим слабой магнитностью. Именно поэтому к области слабой магнитности приурочены месторождения и рудопроявления вольфрама, молибдена и олова. Выявленные нами золоторудные проявления, наоборот, располагаются в областях с локально повышенным уровнем магнитного поля, фиксирующим на глубине наличие основных пород. Это согласуется с известными данными о том, что небольшие гранитоидные интрузивы содержат в дополнение к медно-молибден-порфировым ассоциациям, лишенные меди золото-серебряные и золотые руды, там, где отмечаются вулканиты основного состава [Sillitoe, 2010].Таким образом, в соответствии с изложенной выше концепцией, можно предположить, что формирование редкометалльного или золотого оруденения определяется тем, с каким субстратом в данном месте взаимодействовала кислая магма или отделяющиеся от нее пневматолито-гидротермальные растворы.

Петролого-геохимическими исследованиями [Гурбанов и др., 1992] подтверждено, что образование гранитоидов, соответствующих по составу эльджуртинскому граниту, могло осуществиться за счет фракционирования андезитового расплава в

субвулканических условиях. Геохимическое моделирование показало, что это могли быть трахиандезиты, аналогичные таковым Эльбрусской вулканической области. При этом состав кумулата плагиоклаз-амфибол-ортопироксенового состава, равновесного с гранитным расплавом, позволяет оценить условия фракционирования как водонасыщенные, при давлении 5 кбар на глубине 16 км. Все это соответствует изложенной выше концепции магматогенной золоторудной системы.

Таким образом, геофизические данные позволяют обнаружить области глубинного взаимодействия кислых магм с фемическим субстратом, что может приводить к экстракции золота и обогащению им определенных порций пневматолитово-гидротермальных магматогенных растворов. Предполагается, что Тырныаузская рудно-магматическая система формировалась в условиях взаимодействия кислых магм в основном с салическим и частично с фемическим субстратом. Именно последнее обстоятельство, согласно изложенной выше концепции, способствовало формированию золотого оруденения в определенной части рудно-магматической системы.

Подобный анализ может быть применен для оценки перспектив золотоносности Сонгутидонской, Танадонской, Теплинской и др. неомагматических систем Северного Кавказа, в пределах которых известны рудопроявления медно-молибден-порфирового типа.

Выводы

1. Предложен вариант минимизации ущерба окружающей среде при проведении геологоразведочных работ на рудное золото в пределах горных территорий.

2. Установлено, что золоторудный потенциал рудно-магматических систем определяется возможностью взаимодействия гранитоидной магмы с обогащенным золотом субстратом, в качестве которого могут выступать основные и ультраосновные породы и (или) магмы, а также участки углеродисто-терригенных (черносланцевых) толщ с повышенными содержаниями золота. Области такого взаимодействия установлены в пределах Тырныаузского рудного узла. Они располагаются там, где в пределах гравитационного минимума, связанного с гранитоидными интрузиями, фиксируются аномально повышенные значения магнитного поля, связанные с локальными участками распространения основных пород, и пространственно совпадают с золотоносными участками.

3. Целевая обработка данных дистанционных геофизических съемок позволяет обнаружить области глубинного взаимодействия кислых магм с фемическим субстратом, что является главной предпосылкой золотоносности рудно-магматических систем, так как может приводить к экстракции золота из фемических пород и обогащению им определенных порций пневматолитово-гидротермальных магматогенных растворов.

4. Полученные результаты дают ключ к экологически безопасной дистанционной оценке перспектив золотоносности рудно-магматических систем горных территорий на основе анализа данных дистанционных геофизических съемок.

Литература

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

2. Гурбанов А. Г., Богина М. М., Поль И. Биотиты как индикаторы условий становления плиоценовых гранитов Большого Кавказа. // Изв. АН СССР. Серия геол. – 1992. – № 11. – С. 147-153.

3. Дребенштедт К., Голик В. И., Дмитрак Ю. В. Перспективы диверсификации технологии добычи металлов в РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. № 1 (35). – С. 125-131. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131.

4. Заалишвили В. Б., Чотчаев Х. О., Невский Л. Н., Ольховский Г. П., Тибилов С. М., Гогичев Р. Р. Оптимизация геофизических и геохимических критериев поисков месторождений известных рудных формаций горной части республики Северная Осетия-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 3. – С. 28-62.

5. Иванов А. И., Черных А. И., Вартанян С. С. Состояние, перспективы развития и освоения минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации. // Отечественная геология. – 2018. – № 1. – С. 18-28.

6. Калмыков Б. А., Левин Ф. Д., Трусов А. А. Возможности современных аэрогеофизнческих методов при прогнозировании и поисках золоторудных месторождений. // Золото и технологии. – 2017. – № 2. – С. 76-82.

7. Керимов И. А. Гравитационные аномалии, разломная тектоника и сейсмичность Терско-Каспийского прогиба. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 30-42. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.28.003

8. Носова А. А., Докучаев А. Я., Дубинина Е. О., Гурбанов А. Г., Авдеенко А. С., Орлов Б. Ю., Наркисова В. В., Тарханов Г. В. Три типа рудно-магматических систем позднеколлизионных неогеновах гранитоидов Кавказа: изотопно-геохимические особенности гранитоидов и состав коровых протолитов. // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии. – М.: ИГЕМ РАН, 2008. – С. 152-156.

9. Носырев М. Ю. Геофизические характеристики Бамского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) и их использование при прогнозировании и поисках месторождений золота. // Тихоокенская геология. – 2016. – Т. 35. № 6. – С. 69-80.

10. Парада С. Г. Рудно-магматические системы медно-порфирового типа Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 129-147. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011

11. Серокуров Ю. Н. Дистанционный прогноз руд в России – проблемы и перспективы. // Отечественная геология. – 2011. – № 4. – С. 3-10.

12. Anderson P. E., Cooper M. R., Stevenson C. T., Hastie A. R. Zonation of the Newry Igneous Complex. Northern Ireland, based on geochemical and geophysical data. // Lithos. – 2016. – Vol. 260. – pp. 95-106. DOI: 10.1016/j. lithos. 2016.05.011

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

14. Guangxi Zliou Yequan, Pang Baocheng, Li Yuanqiang, Lit Jiawen The metallogenic regularities and metallogenic prognosis for the Xinping gold deposit in Pingnan County. // Geoscience. – 2016. – Vol. 30. No. 4. – pp. 770-780.

15. Hart C. J. R. Reduced intrusion-related gold systems. // Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Spec. Publ. – 2007. – No. 5. – pp. 95-112.

16. Kerr Andrew C., Lavis Owain, Kakar M. Ishaq, McDonald Iain. Petrogenesis and tectonomagmatic significance of Eocene mafic intrusions from the Neotethyan suture zone in the Muslim Bagh-Khanozai region. Pakistan. // J. Geol. Soc. – 2016. – Vol. 173. No. 3. – pp. 518-530. DOI: 10.1144/jgs2015–119

17. Masoumi F., Eslamkish T., Honarmand M., Abkar A. A. A Comparative Study of Landsat-7 and Landsat-8 Data Using Image Processing Methods for Hydrothermal Alteration Mapping. // Resour. Geol. – 2017. – Vol. 67. No. I. – pp. 72-88. DOI: 10.1111/rge. 121198

18. Ma Xiao-lei, Yuan Bing-qiang, Xu Wen-qiang, Song IJ-jun Dizhi Yu Kantan. The relationship between features of gravity and magnetic field and sandstone-type uranium deposits in the south of Ordos basin. // Geol. and Prospecting. – 2016. – Vol. 52. No. 4. – pp. 647-656.

19. Parada S. G., Stolyarov V. V., Popov Y. V. New type of gold mineralization of the Tyrnyauz ore cluster (Kabardino-Balkar republic). // Doklady Earth Sciences. – 2017. – Vol. 477. No. 1. – pp. 1256-1259. DOI: 10.1134/S1028334X17110058

20. Root B. C., Ebbing J., van der Wal W., England R. V. Comparing gravity-based to seismic-derived lithosphere densities a case study of the British Isles and surroundina areas. // Geophys. J. Int. – 2017. – Vol. 208. No. 3. – pp. 1796-1810. DOI: 10.1093/gji/ggw483

21. Sillitoe R. H. Porphyry Copper Systems. // Econ. Geol. – 2010. – Vol. 105. – pp. 3-41.

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

References

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

2. Gurbanov A. G., Bogina M. M., Pol I. Biotites as indicators of the formation conditions of Pliocene granites of the Greater Caucasus. Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Series geol. 1992. No. 11. pp. 147-153. (In Russ.)

3. Drebenshtedt K., Golik V. I., Dmitrak Yu. V. The prospects of diversification OF technology of extraction of metals in Republic of North Osetia-Alaniya. Sustainable development of mountain territories. 2018. Vol. 10. No. 1. Issue 35. pp. 125-131. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131.

4. Zaalishvili V. B., Chotchaev Kh. O., Nevskiy L. N., Olkhovsky G. P., Tibilov S. M., Gogichev R. R. Optimization of geophysical and geochemical criteria for prospecting for deposits of known ore formations in the mountainous part of the Republic of North Ossetia-Alania. Geology and geophysics of Russian South. 2015. No. 3. pp. 28-62. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2015.3.55274.

5. Ivanov A. I., Chernykh A. I., Vartanyan S. S. Status, prospects for the development and development of the mineral resource base of gold in the Russian Federation. National geology. 2018. No. 1. pp. 18-28. (In Russ.)

6. Kalmykov B. A., Levin F. D., Trusov A. A. Possibilities of modern airborne geophysical methods in forecasting and prospecting for gold deposits. Gold and technologies. 2017. No. 2. pp. 76-82. (In Russ.)

7. Kerimov I. A. Gravity Anomalies, Fault Tectonics and Seismicity of the Terek-Caspian Trough. Geology and geophysics of the South of Russia. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 30-42. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.20.28.003

8. Nosova A. A., Dokuchaev A. Ya., Dubinina E. O., Gurbanov A. G., Avdeenko A. S., Orlov B. Yu., Narkisova V. V., Tarkhanov G. V. Three types of ore-magmatic systems in Late Collisional Neogene granitoids of the Caucasus: isotope-geochemical features of granitoids and composition of crustal protoliths. Problems of geology of ore deposits, mineralogy, petrology and geochemistry. Moscow. IGEM RAS, 2008. pp. 152-156. (In Russ.)

9. Nosyrev M. Yu. Geophysical characteristics of the Bam gold deposit (Upper Amur region) and their use in forecasting and prospecting for gold deposits. Pacific Geology. 2016. Vol. 35. No. 6. pp. 69-80. (In Russ.)

10. Parada S. G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. Geology and geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 129-147. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011.

11. Serokurov Yu. N. Remote forecasting of ores in Russia – problems and prospects. National geology. 2011. No. 4. pp. 3-10. (In Russ.)

12. Anderson P.E., Cooper M.R., Stevenson C.T., Hastie A.R. Zonation of the Newry Igneous Complex. Northern Ireland, based on geochemical and geophysical data. Lithos. 2016. Vol. 260. pp. 95-106. DOI: 10.1016/j. lithos. 2016.05.011

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

14. Guangxi Z.Y., Pang B., Li Yuanqiang, Lit J. The metallogenic regularities and metallogenic prognosis for the Xinping gold deposit in Pingnan County. Geoscience. 2016. Vol. 30. No. 4. pp. 770-780.

15. Hart C.J. R. Reduced intrusion-related gold systems. Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Spec. Publ. 2007. No. 5. pp. 95-112.

16. Kerr Andrew C., Lavis Owain, Kakar M. Ishaq, McDonald Iain. Petrogenesis and tectonomagmatic significance of Eocene mafic intrusions from the Neotethyan suture zone in the Muslim Bagh-Khanozai region. Pakistan. J. Geol. Soc. 2016. Vol. 173. No. 3. pp. 518-530. DOI: 10.1144/jgs2015–119

17. Masoumi F., Eslamkish T., Honarmand M., Abkar A.A. A Comparative Study of Landsat-7 and Landsat-8 Data Using Image Processing Methods for Hydrothermal Alteration Mapping. Resour. Geol. 2017. Vol. 67. No. I. pp. 72-88. DOI: 10.1111/rge. 121198

18. Ma Xiao-lei, Yuan Bing-qiang, Xu Wen-qiang, Song IJ-jun Dizhi Yu Kantan. The relationship between features of gravity and magnetic field and sandstone-type uranium deposits in the south of Ordos basin. Geol. and Prospecting. 2016. Vol. 52. No. 4. pp. 647-656.

19. Parada S.G., Stolyarov V.V., Popov Y.V. New type of gold mineralization of the Tyrnyauz ore cluster (Kabardino-Balkar republic). Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 477. No. 1. pp. 1256-1259. DOI: 10.1134/S1028334X17110058

20. Root B.C., Ebbing J., van der Wal W., England R.V. Comparing gravity-based to seismic-derived lithosphere densities a case study of the British Isles and surroundina areas. Geophys. J. Int. 2017. Vol. 208. No. 3. pp. 1796-1810. DOI: 10.1093/gji/ggw483

21. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems. Econ. Geol. 2010. Vol. 105. pp. 3-41.

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

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.4:911.375
DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009

Оригинальная статья

Типология горных поселений Северной Осетии и основные направления их устойчивого развития

А. Д. Бадов[1], О. А. Бадов[1], Л. Х. Дзахова[2], Д. Б. Бязрова[2]

[1]Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1, e-mail: badov@list.ru;

[2]Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова, Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46, e-mail: ldzahova@mail.ru

Статья поступила: 18.02.2022, доработана: 01.03.2022, одобрена в печать: 10.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Статья посвящена весьма актуальной проблеме типологии горных поселений, связанной с динамикой численности населения исследуемых населенных пунктов. **Цель работы.** Отсюда вытекает цель исследования: типология горных поселений с целью определения направлений их дальнейшего устойчивого развития. Одним из важнейших методов в географии является типология тех или иных объектов исследований, процессов и явлений, происходящих в обществе. **Методы работы.** С целью выявления основных направлений развития горного расселения был применен метод типологии и классификации горного расселения, основанный на трудах Г. М. Федорова. Типология позволяет выявить характерные черты объекта и определить основные направления его дальнейшего развития. Типология проводится по многим направлениям, среди которых географическое положение, высота местности над уровнем моря, факторы и основные этапы формирования, развития и функционирования, динамика численности населения, административный статус, функции поселения, занятость населения, особенности использования природных условий и ресурсов, типы и формы землепользования и т. д. Динамика численности населения оценивается по двум межпереписным периодам, между 2002 и 2020 гг. Это в полной мере относится к горным поселениям и является наиболее точным инструментом, характеризующим населенные пункты. **Результаты работы.** В ходе исследования было выделено пять типов горных поселений, каждый из которых имеет свои особенности по динамике численности населения, географическому положению, статусу, функциям. В настоящей статье исследуются типы горских поселений и определяются пути их развития. Проведенная типология позволила выделить основные направления устойчивого развития каждого из выделенных типов горских населенных пунктов.

Ключевые слова: горы, населенные пункты, Северная Осетия, типы, устойчивое развитие.

Для цитирования: Бадов А. Д., Бадов О. А., Дзахова Л. Х., Бязрова Д. Б. Типология горных поселений Северной Осетии и основные направления их устойчивого развития. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 119–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009.

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009

Original paper

Typology of mountain settlements in North Ossetia and the main directions of their sustainable development

A. D. Badov[1], O. A. Badov[1], L. Kh. Dzakhova[2], J. B. Byazrova[2]

[1]North Caucasian Federal University, 1 Pushkin str., Stavropol 355017, Russian Federation, e-mail: badov@list.ru;

[2]North Ossetian State University named after K. L. Khetagurova, 44-46 Vatutina str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation, e-mail: ldzahova@mail.ru

Reseived: 18.02.2022, revised: 01.03.2022, accepted: 10.03.2022

Abstract: Relevance. The article is devoted to a very urgent problem of the typology of mountain settlements related to the dynamics of the population of the studied settlements. **Aim**. This implies the purpose of the study: the typology of mountain settlements in order to determine the directions of their further sustainable development. One of the most important methods in geography is the typology of certain objects of research, processes and phenomena occurring in society. **Methods**. In order to identify the main directions of development of mountain settlement, the method of typology and classification of mountain settlement based on the works of G. M. Fedorov was applied. The typology allows you to identify the characteristic features of the object and determine the main directions of its further development. The typology is carried out in many areas, including geographical location, the height of the place above sea level, factors and main stages of formation, development and functioning, population dynamics, administrative status, settlement functions, employment, features of the use of natural conditions and resources, types and forms of land use, etc. Population dynamics is estimated by two inter-census periods, between 2002 and 2020. This fully applies to mountain settlements and is the most accurate tools characterizing settlements. **Results**. During the study, five types of mountain settlements were identified, each of which has its own characteristics in terms of population dynamics, geographical location, status, and functions. This article examines the types of urban settlements and determines the ways of their development. The typology made it possible to identify the main directions of sustainable development of each of the identified types of mountain settlements.

Keywords: mountains, settlements, North Ossetia, types, sustainable development.

For citation: Badov A. D., Badov O. A., Dzakhova L. Kh., Byazrova J. B. Typology of mountain settlements in North Ossetia and the main directions of their sustainable development. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 119–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.96.009.

Введение

Типология горного расселения в нашей стране проводится примерно с 1980-1990 гг. Она вызывает особый интерес у ученых, занимающихся исследованием процессов, происходящих в связи с освоением горных территорий и, особенно, обратного движения населения с гор на равнину [Гуня и др., 2020; Branca, Haller, 2021; Guan et al., 2022; Li et al., 2019; Meter et al., 2010; Patarchanova, 2019; Puscasu, Chirita, 2011]. Типология проводится как в сугубо теоретических, так и практических целях. Тогда, когда необходимо определить пути дальнейшего развития горного расселения.

В нашей стране исследования горного расселения (ГР) чаще всего проводились на Северном Кавказе в рамках программы ЮНЕСКО МАБ-6А. В этих исследованиях принимали участие ученые из Москвы (Д. Н. Лухманов [Тлехурай, Лухманов, 2006], Ж. А. Зайончковская [Дробижева, Зайончковская, 2001], П. М. Полян [Полян, 1987]) и регионов Северного Кавказа (А. Д. Бадов [Бадов, 1993], Ш. С. Мудуев [Мудуев, 1996], П. П. Турун [Турун, 1995]) и др. Позже исследования горного расселения проводились фрагментарно, по ряду регионов (Ф. В. Тугуз [Тугуз, 2018], А. Е. Зеленская [Зеленская, 2008]).

В целом исследования горного расселения охватили практически весь Северный Кавказ, за исключением Чечни и Ингушетии. Одновременно, при исследовании горного расселения проводилась типология и классификация поселений, которая помогала выявить особенности горного расселения того или иного региона и определить пути его дальнейшего развития [Воскова и др., 2021]. Основой большинства типологических исследований явились труды Г. М. Федорова [Федоров, 1985]. Исследования вызвали определенный интерес у научного сообщества. В частности, ряд положений вошел в русское издание книги Б. Мессерли и Дж. Д. Айвза «Горы мира» [Мессерли, Айвз, 1999]. В настоящее время, проблемы горного расселения Северной Осетии исследуют А. Д. Бадов, О. А. Бадов, Л. А. Дзахова, Д. Б. Бязрова [Бадов и др., 2021; Дзахова, Чихтисов, 2017].

Методы исследований

Как правило, типология поселений проводится с учетом ряда показателей, в их числе численность населения и ее динамика, функции поселения, географическое положение, отрасли специализации, статус, история развития и т. д. Типология горных поселений обязательно должна учитывать высоту местности над уровнем моря.

Результаты работы и их обсуждение

Горное расселение Северной Осетии имеет давнюю историю. Так, по данным А. Дз. Цагаевой п. Нузал возник в 1272 г. [Цагаева, 1971], с. с. Бад и Назигин – в 1390 г. [Цагаева, 1975].

Все горные поселения Северной Осетии отнесены к трем высотным поясам: низкогорному (501-1000 м н. у. м.), среднегорному (1001-2000 м) и высокогорному (выше 2000 м) [Бадов, 1993]. В высокогорном поясе осталось два заселенных НП – п. В. Згид и с. Кесатикау.

На основании статуса, истории и динамики численности населения предлагается следующая типология горных населенных пунктов.

1. Поселения – бывшие поселки городского типа, преобразованные в сельские в 2007 г., поскольку уже не отвечали статусу городских, ввиду существенного сокращения в них численности населения с положительной динамикой численности населения за 2002-2021 гг. (Мизур, В. Фиагдон, Бурон).

2. Поселения – бывшие поселки городского типа с отрицательной динамикой численности населения за 2002-2021 гг. (Садон, В. Згид, Холст).

Все поселения, кроме В. Згида, расположены в среднегорном поясе. Они являлись центрами добычи полиметаллических руд и их расцвет пришелся на советский период. Позже, в связи с истощением месторождений и закрытием шахт, поселки пришли в упадок. Население стало выезжать. Дальнейшее развитие этих поселе-

ний проходило по-разному. Практически заброшенными оказались Садон, В. Згид и Холст. Последний обезлюдел полностью. Правда, В. Згиду повезло несколько больше – на него обратила свое внимание компания «Бавария». В связи со строительством и функционированием ЗарамагГЭС-1 оживилась хозяйственная деятельность в п. Мизур. Поселок Бурон оказался в фокусе внимания силовых структур.

Наиболее успешно развивается п. В. Фиагдон. Здесь произошла успешная перепрофилизация функций с горнодобывающей на рекреационную отрасль. В поселке давно функционируют Детский санаторий и Пульмонологическая больница. Введены и успешно функционируют гостиницы, рестораны, коттеджный поселок. Планируется строительство горнолыжных трасс. Поселок и его окрестности известны целебным воздухом и сосредоточением значительного числа культурно-исторических достопримечательностей [Скитский, 1972]. Климат поселка весьма благоприятный, он расположен в котловине северо-юрской депрессии и количество солнечных дней достигает 300, осадков выпадает 450-500 мм в год. Весьма важный фактор – транспортная доступность территории. Фактически В. Фиагдон и его окрестности стали главным рекреационным районом республики в горах. Численность населения поселка не только стабилизировалась, но и начала расти.

Поток рекреантов в Фиагдонскую котловину положительно сказался и на таком поселении, как Гусара, которое расположено на пути из Владикавказа в В. Фиагдон. Выгодное географическое положение способствовало развитию села, строительству рекреационных объектов и стремительному росту численности населения (в 2,3 раза за 2002-2020 гг.). Ни одно сельское поселение не росло так быстро. Таким образом, налицо пример оптимального использования выгодного географического положения. Однако, здесь возникает вопрос решения экологических проблем, когда все нечистоты сбрасываются в р. Фиагдон.

Тем не менее, не только с. Гусара выросла численно за 2002-2020 гг. Среди горных поселений, в которых выросла численность населения – Мизур, Бурон, В. Фиагдон, Н. Зарамаг, В. Зарамаг, В. Унал, Сатат, Тиб, Зригатта, Даргавс, Старая Саниба, Дзинага, Махческ. Повышение численности населения произошло в ряде поселений практически всех ущелий, за исключением Дарьяльского. Причинами роста в этих населенных пунктах послужили строительство и функционирование каскада Зарамагских ГЭС, газификация и электрификация горских поселений, функционирование пограничных и таможенных постов, реанимирование горного рекреационного хозяйства. Особым спросом стала пользоваться экологически чистая сельскохозяйственная продукция, произведенная в горах [Бадов и др., 2021]. Однако, у каждого поселения – свой набор факторов роста. Главные драйверы – рекреационное хозяйство, промышленность, сельское хозяйство. Большинство из этих поселений расположено в среднегорном поясе, в межгорных котловинах северо-юрской депрессии. Хотя, есть и исключения (Мизур, Зарамаг и др.).

3. Группа поселений – села с положительной динамикой численности населения за 2002-2020 гг. Их можно подразделить на моно- и полифункциональные. К монофункциональным (сельскохозяйственным) можно отнести В. Унал, Сатат, Тиб, Зригатта. Полифункциональные – Н. Зарамаг (сельское хозяйство, обслуживание), Даргавс (сельское и рекреационное хозяйство), Дзинага (сельское и рекреационное хозяйство) и т. п.

4. Группа поселений – села с отрицательной динамикой численности населения за 2002-2020 гг. – Сахсат, Цемса, Биз, Дагом, Цамад, Дзивгис, Харисджин и др.

5. Ранее покинутые села, но заселенные вновь в 2002-2020 гг. – Абайтикау (Цейский), Варце, Згил, Лисри, Гори, Елгона, Зригатта, Кесатикау, Сахсат, Цасем.

Таким образом, нами выделено пять типов горских населенных пунктов, где основным критерием явилась динамика численности населения за 2002-2020 гг. Другими маркерами типологии были выделены географическое положение (в том числе высота над уровнем моря и расположение в котловине или ущелье), функции поселения. Большое значение для устойчивости поселения имеет фактор расположения на транспортной магистрали. Тем не менее, на поселениях, расположенных вдоль Военно-Грузинской дороги, этот фактор никакой роли практически не сыграл. Примечателен и другой факт – функционирование двух поселений, расположенных в высокогорном поясе (выше 2000 м н. у. м.) – В. Згида и Кесатикау. Последнее, после перерыва в 20 лет, было заселено вновь.

Как видно из таблицы 1, в подавляющем большинстве устойчивых поселений (типы 1 и 3) главным драйвером экономики явилось рекреационное хозяйство. Хотя оно, в настоящее время, находится в республике в зачаточном состоянии. Видимо, эта отрасль станет для горной части определяющей.

Таблица 1 / Table 1

Типы горных поселений Северной Осетии / Types of mountain settlements in North Ossetia

Типы поселений (пояснение в тексте) / Types of settlements (explanation in the text)	Высотный пояс (н – низкогорный, с – среднегорный, в – высокогорный) / High-altitude zone (l – low-mountain, m – mid-mountain, h – high-mountain)	Местоположение (у – ущелье, к – котловина) / Location (g – gorge, b – basin)	Функции / Functions
1. В. Фиагдон / Upper Fiagdon	с / m	к / b	Рекр., адм. / Recreational, administrative
Мизур / Mizur	с / m	у / g	Пром., адм. / Industrial, administrative
Бурон / Buron	с / m	у / g	Тр. /
2. Садон / Sadon	с / m	у / g	Быв. пром. / former industrial
В. Згид / Upper Zgid	в / h	у / g	С.-х., быв. пром. / Agricultural, former industrial
3. Гусара / Gusara	н / l	у / g	Рекр., с.-х. / Recreational, agricultural
В. Унал / Upper Unal	н / l	к / b	С.-х. / Agricultural
Тиб / Tib	с / m	к / b	Рекр., с.-х. / Recreational, agricultural
Даргавс / Dargavs	с / m	к / b	Рекр., с.-х. / Recreational, agricultural
4. Сахсат / Sahsat	с / m	к / b	С.-х. / Agricultural
Харисджин / Harisjin	с / m	к / b	Рекр., с.-х. / Recreational, agricultural
5. Кесатикау / Kesatikau	в / h	у / g	С.-х. / Agricultural
Лисри / Lisri	с / m	к / b	С.-х. / Agricultural

Рис. 1. Новостройки в с. Горная Саниба. Фото К.П. Попова /
Fig. 1. New buildings in the village of GornayaSaniba. Photo by K.P. Popov

Стоит обратить внимание на замечания рекреантов по поводу необоснованно высоких цен на предоставляемые услуги и низкое качество самих услуг. Конкуренцию со стороны грузинского Гудаури и северокавказских курортов наши Мамисон, Цей и др. могут не выдержать.

В горной части Алагирского района была восстановлена свободная экономическая зона. Это позволило привлечь крупных инвесторов для развития крупнейшего на Северном Кавказе горного туристического кластера «Мамисон» [Чотчаев и др., 2020, 2021]. Проект решено развивать в три этапа. В результате будет занято более 3 тыс. чел. Сам проект рассчитан на обслуживание 5700 катающихся в день [Гень, 2020]. Нельзя забывать и о синергетическом эффекте: обеспечении продуктами питания, энергетическими ресурсами и т.д. [Черкасов и др., 2020].

Будущее Садона видится в привлечении инвестиций для развития набирающего популярность промышленного туризма и альпинизма, наряду с традиционными видами.

Развитие промышленности в горах видится через строительство микроГЭС, которые наносят минимальный ущерб экологическому равновесию, в отличие от таких крупных ГЭС, как Зарамаг-1.

Сельское хозяйство развивается своим чередом, в связи с повышенным спросом на экологически чистую продукцию. Однако, здесь, все более уверенными темпами развивается горское форелеводство.

Таким образом, по нашему мнению, усиление потока населения в горы практически неизбежно. Тем не менее, этот поток не всегда благоприятно сказывается на горных ландшафтах, как природных, так и культурных (рис. 1).

Выводы

Таким образом, для Северной Осетии, в последнее время, характерно возвращение населения в горы. Это связано со многими факторами. Одни из них – ухудшение экологической обстановки в равнинной части, открывшиеся экономические перспективы в горах, где можно проявить в полной мере свои возможности. Стали наблюдаться увеличение численности населения в горах и заселение ряда ранее покинутых поселений. Причем подобная тенденция является общемировой практикой [Ciolac et al., 2019; Constantin et al., 2015; Ehrlich et al., 2021; Yordanova, Mateeva, 2016; Zhou et al., 2018].

С целью выявления основных направлений развития горного расселения был применен метод типологии и классификации горного расселения, основанный на трудах Г.М. Федорова.

В ходе проведенного исследования, было выделено 5 типов горских населенных пунктов, каждый из которых имеет свои особенности по динамике численности населения, географическому положению, статусу, функциям. Возможно выделение еще нескольких типов: покинутые за 2002-2020 гг. (таковых не было) и покинутые ранее, но возможно будут заселены после 2020 г. (т.н. «резерв»).

Проведенная типология позволила выделить основные направления устойчивого развития каждого из выделенных типов горских населенных пунктов.

Литература

1. Бадов А.Д. Формирование, развитие и функционирование расселения в Северной Осетии. – Владикавказ: Изд – во СОГУ, 1993. – 174 с.

2. Бадов А.Д., Бадов О.А., Дзахова Л.Х., Бязрова Д.Б., Келехсаев В.Б. Репопуляция горных поселений: проблемы и перспективы (на примере Северной Осетии). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. №4. – С. 528-534.

3. Воскова А.В., Гуня А.Н., Караваев В.А., Марьинских Д.М. Землепользование и возможности регулирования антропогенной нагрузки на горные ландшафты северного макросклона большого Кавказа (на примере долины р. Карасу). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. №1. – С. 16-24. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-16-24

4. Гень Ю. Курорт «Мамисон» в Северной Осетии построят к 2023 году. // Российская газета. – 2020. 17 ноября.

5. Гуня А.Н., Хадзарагова Е.А., Хетагуров В.Н., Караев Ю.И. Междисциплинарные аспекты устойчивого развития горных территорий: роль социально-культурных факторов. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12. №4 (46). – С. 609-619. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-609-619

6. Дзахова Л.Х., Чихтисов Р.А. Ситуация в сфере демографических и миграционных процессов в Северной Осетии-Алании в первом полугодии 2017 года. // Состояние межнациональных отношений и религиозная ситуация в субъектах Российской Федерации Северо-Кавказского федерального округа (первое полугодие 2017 года). – Москва-Пятигорск-Ставрополь. – 2017. – С. 160-161.

7. Дробижева Л.М., Зайончковская Ж.А. Социально-демографические проблемы на Северном Кавказе. // Вестник аналитики. – 2001. – №4. – С. 49-60.

8. Зеленская А.Е. Трансформация сети сельских поселений Кабардино-Балкарии (конец XIX в. – начало XX в.). // Известия РАН. Серия географическая. – 2008. – №6. – С. 51-62.

9. Мессерли Б., Айвз Дж.Д. Горы мира. Глобальный приоритет. – М.: Ноосфера, 1999. – 454 с.

10. Полян П. М. География и социально-экономические проблемы горных регионов. // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. – 1987. – № 3. – С. 144-145.

11. Скитский Б. В. Очерки истории горских народов. Избранное. // Орджоникидзе: СОНИИ, 1972. – 140 с.

12. Тлехурай Ф. В., Лухманов Д. Н. Эволюция расселения на территории Адыгеи в XX в. – Майкоп. – 2006. – 183 с.

13. Тугуз Ф. В. Эволюция систем расселения на территории современной Республики Адыгея. // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2018. – № 1 (212). – С. 91-97.

14. Федоров Г. М. Геодемографическая типология. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. – 153 с.

15. Цагаева А. Д. Топонимия Северной Осетии. Часть 1. – Орджоникидзе: СОНИИ, 1971. – 238 с.

16. Цагаева А. Д. Топонимия Северной Осетии. Часть 2. – Орджоникидзе: СОНИИ, 1975. – 562 с.

17. Черкасов А. А., Белозеров В. С., Щитова Н. А., Сопнев Н. В. Геоинформационный мониторинг демографических процессов в регионах Юга Европейской России. // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26. № 1. – С. 127-140.

18. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 70-100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

19. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.

20. Branca D., Haller A. Urbanization, Touristification and Verticality in the Andes: A Profile of Huaraz, Peru. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13 (11). – Article 6438. https://doi. org/10.3390/su13116438

21. Ciolac R., Adamov T., Iancu T., Popescu G., Lile R., Rujescu C., Marin D. Agritourism-A Sustainable Development Factor for Improving the «Health» of Rural Settlements. // Case Study Apuseni Mountains Area. // Sustainability. – 2019. – Vol. 11 (5). – Article 1467. https://doi. org/10.3390/su11051467

22. Constantin V., Stefanescu L., Kantor C. M. Vulnerability assessment methodology: A tool for policy makers in drafting a sustainable development strategy of rural mining settlements in the Apuseni Mountains, Romania. // Environmental Science & Policy. – 2015. – Vol. 52. – pp. 129-139. https://doi. org/10.1016/j. envsci. 2015.05.010

23. Ehrlich D., Melchiorri M., Capitani C. Population Trends and Urbanisation in Mountain Ranges of the World. // Land. – 2021. – Vol. 10 (3). – Article 255. https://doi. org/10.3390/land10030255

24. Guan Y. Y., Li X. M., Yang J., Li S. B., Tian, S. Z. Spatial differentiation of comprehensive suitability of urban human settlements based on GIS: a case study of Liaoning Province, China. // Environment Development and Sustainability. – 2022. – Vol. 24 (3). – pp. 4150-4174. https://doi. org/10.1007/s10668-021-01610-x

25. Li G., Hu W. M. A network-based approach for landscape integration of traditional settlements: A case study in the Wuling Mountain area, southwestern China. // Land Use Policy. – 2019. – Vol. 83. – pp. 105-112. https://doi. org/10.1016/j. landusepol. 2019.01.043

26. Meter C., Bucher A., Hagenbuch R. Landscape, Landscape Awareness, and Landscape Identity as Potentials for Regional Development – An Empirical Case Study in Southern Glarus, Switzerland. // Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society. – 2010. – Vol. 19 (3). – pp. 213-222. https://doi. org/10.14512/gaia. 19.3.11

27. Patarchanova E. Geodemographic Processes and Their Effects in Blagoevgrad Municipality. // Journal of Settlements and Spatial Planning. – 2019. – Vol. 10 (2). – pp. 167-177. https://doi. org/10.24193/jssp. 2019.2.09

28. Puscasu V., Chirita V. Could be the environmental management differentiated by hypsometric levels? // Journal of Environmental Protection and Ecology. – 2011. – Vol. 12 (4A). – pp. 2303-2310.

29. Yordanova M., Mateeva Z. The Nature Potential of Mountains in Bulgaria and Its Sustainable Use. – 2016. https://doi. org/10.1007/978-3-319-20110-8_5

30. Zhou Z.X., Jia Z.Y., Wang N., Fang M. Sustainable Mountain Village Construction Adapted to Livelihood, Topography, and Hydrology: A Case of Dong Villages in Southeast Guizhou, China. // Sustainability. – 2018. – Vol. 10 (12). – Article 4619. https://doi. org/10.3390/su10124619

References

1. Badov A.D. Formation, development and functioning of settlement in North Ossetia. Vladikavkaz. NOSU, 1993. 174 p. (In Russ.)

2. Badov A.D., Badov O.A., Dzakhova L.Kh., Byazrova D.B., Kelekhsaev V.B. Repopulation of mountain settlements: problems and prospects (on the example of North Ossetia). Sustainable development of mountain territories. 2021. Vol. 13. No. 4. pp. 528-534. (In Russ.)

3. Voskova A.V., Gunya A.N., Karavayev V.A., Mar'inskikh D.M. Land use and possibilities of regulating anthropogenic loads on the mountain landscapes of the northern macro-slope of the Great Caucasus (on the example of the Karasu river valley). Sustainable development of mountain territories. 2021. Vol. 13. No. 1. pp. 16-24. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-16-24 (In Russ.)

4. Gen Yu. Resort "Mamison" in North Ossetia will be built by 2023. Russian newspaper. 2020. November 17. (In Russ.)

5. Gunya A.N., Khadzaragova E.A., Khetagurov V.N., Karaev Yu.I. Interdisciplinary aspects of sustainable development of mountain territories: the role of socio-cultural factors. Sustainable development of mountain territories. 2020. Vol. 12. No. 4. Issue 46. pp. 609-619. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-609-619 (In Russ.)

6. Dzakhova L.Kh., Chikhtisov R.A. The situation in the field of demographic and migration processes in North Ossetia-Alania in the first half of 2017. The state of interethnic relations and the religious situation in the subjects of the Russian Federation of the North Caucasian Federal District (the first half of 2017). Moscow-Pyatigorsk-Stavropol. 2017. pp. 160-161. (In Russ.)

7. Drobizheva L.M., Zaionchkovskaya Zh.A. Socio-demographic problems in the North Caucasus. Bulletin of analytics. 2001. No. 4. pp. 49-60. (In Russ.)

8. Zelenskaya A.E. Transformation of the network of rural settlements in Kabardino-Balkaria (late 19th century – early 20th century). Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographic series. 2008. No. 6. pp. 51-62. (In Russ.)

9. Messerli B., Aivz J.D. Mountains of the world. global priority. Moscow. Noosphere, 1999. 454 p. (In Russ.)

10. Polyan P.M. Geography and socio-economic problems of mountainous regions. Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Geographic series. 1987. No. 3. pp. 144-145. (In Russ.)

11. Skitsky B.V. Essays on the history of mountain peoples. Selectas. Ordzhonikidze: SONII, 1972. 140 p. (In Russ.)

12. Tlekhurai F.V., Lukhmanov D.N. The evolution of settlement on the territory of Adygea in the twentieth century. Maykop. 2006. 183 p. (In Russ.)

13. Tuguz F.V. Evolution of systems of resettlement in the territory of the contemporary Adyghea Republic. Bulletin of the Adyghe State University. Series 4. Natural-mathematical and technical sciences. 2018. No. 1. pp. 91-97. (In Russ.)

14. Fedorov G.M. Geodemographic typology. Leningrad. Leningrad State University. 1985. 153 p. (In Russ.)

15. Tsagaeva A.D. Toponymy of North Ossetia. Part 1. Ordzhonikidze. SONII, 1971. 238 p. (In Russ.)

16. Tsagaeva A. D. Toponymy of North Ossetia. Part 2. Ordzhonikidze. SONII, 1975. 562 p. (In Russ.)

17. Cherkasov A.A., Belozerov V.S., Shchitova N.A., Sopnev N.V. Geoinformation monitoring of demographic processes in the regions of the South of European Russia. InterCarto. InterGIS. 2020. Vol. 26. No. 1. pp. 127-140. (In Russ.)

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

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

20. Branca D., Haller A. Urbanization, Touristification and Verticality in the Andes: A Profile of Huaraz, Peru. Sustainability. 2021. Vol. 13 (11). Article 6438. https://doi. org/10.3390/su13116438

21. Ciolac R., Adamov T., Iancu T., Popescu G., Lile R., Rujescu C., Marin D. Agritourism-A Sustainable Development Factor for Improving the «Health» of Rural Settlements. Case Study Apuseni Mountains Area. Sustainability. 2019. Vol. 11 (5). Article 1467. https://doi. org/10.3390/su11051467

22. Constantin V., Stefanescu L., Kantor C. M. Vulnerability assessment methodology: A tool for policy makers in drafting a sustainable development strategy of rural mining settlements in the Apuseni Mountains, Romania. Environmental Science & Policy. 2015. Vol. 52. pp. 129-139. https://doi. org/10.1016/j. envsci. 2015.05.010

23. Ehrlich D., Melchiorri M., Capitani C. Population Trends and Urbanisation in Mountain Ranges of the World. Land. 2021. Vol. 10 (3). Article 255. https://doi. org/10.3390/land10030255

24. Guan Y. Y., Li X. M., Yang J., Li S. B., Tian, S. Z. Spatial differentiation of comprehensive suitability of urban human settlements based on GIS: a case study of Liaoning Province, China. Environment Development and Sustainability. 2022. Vol. 24 (3). pp. 4150-4174. https://doi. org/10.1007/s10668-021-01610-x

25. Li G., Hu W. M. A network-based approach for landscape integration of traditional settlements: A case study in the Wuling Mountain area, southwestern China. Land Use Policy. 2019. Vol. 83. pp. 105-112. https://doi. org/10.1016/j. landusepol. 2019.01.043

26. Meter C., Bucher A., Hagenbuch R. Landscape, Landscape Awareness, and Landscape Identity as Potentials for Regional Development – An Empirical Case Study in Southern Glarus, Switzerland. Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society. 2010. Vol. 19 (3). pp. 213-222. https://doi. org/10.14512/gaia. 19.3.11

27. Patarchanova E. Geodemographic Processes and Their Effects in Blagoevgrad Municipality. Journal of Settlements and Spatial Planning. 2019. Vol. 10 (2). pp. 167-177. https://doi. org/10.24193/jssp. 2019.2.09

28. Puscasu V., Chirita V. Could be the environmental management differentiated by hypsometric levels? Journal of Environmental Protection and Ecology. 2011. Vol. 12 (4A). pp. 2303-2310.

29. Yordanova M., Mateeva Z. The Nature Potential of Mountains in Bulgaria and Its Sustainable Use. 2016. https://doi. org/10.1007/978-3-319-20110-8_5

30. Zhou Z. X., Jia Z. Y., Wang N., Fang M. Sustainable Mountain Village Construction Adapted to Livelihood, Topography, and Hydrology: A Case of Dong Villages in Southeast Guizhou, China. Sustainability. 2018. Vol. 10 (12). Article 4619. https://doi. org/10.3390/su10124619

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.435.627
DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010

Оригинальная статья

Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий

В. Б. Свалова

Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Россия, 101000, Москва, Уланский переулок, 13, к. 2, e-mail: v-svalova@mail.ru;

Статья поступила: 04.02.2022, доработана: 21.02.2022, одобрена в печать: 11.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Тенденция к повышению опасности и риска природных и техногенных катастроф представляет угрозу человечеству, как на глобальном, так и на национальном и региональном уровнях. В этой связи в качестве приоритетов выдвигается фундаментальная и прикладная наука, призванная на более глубоком научном уровне развивать и разрабатывать новые направления и подходы к решению задач теории безопасности и прикладных методов анализа и управления риском опасных природно-техногенных процессов, чрезвычайных ситуаций, стихийных бедствий и катастроф. **Цель работы.** Прогноз стихийных бедствий и катастроф является одной из важнейших задач научной и народно-хозяйственной деятельности, не решенных до сих пор. Целью работы является разработка комплексного подхода к риск-анализу опасных природных процессов, оценке и управлению риском отдельных и интегральных природных опасностей и рисков; выделение определяющих параметров геоэкологического риска для различных областей, регионов и геологических обстановок; разработка концепции и выделение горячих пятен по геоэкологическому риску. **Методы исследования.** При разработке проблем оценки и управления риском использовались методы и подходы риск-анализа. Одним из основных методов исследования явился Метод анализа иерархий. **Результаты работы.** Разработана концепция и методика унификации, формализации и цифровизации оценки и картографирования природно-экологического риска на базе общей платформы управления риском и выявления определяющих параметров природной опасности для различных территорий и природно-техногенных условий. В Кавказском регионе ярко выделяется горячая полоса Кавказа по степени экологического риска, характеризующая зону коллизии Африканской и Евразийской литосферных плит. Горячая полоса Кавказа проходит от Махачкалы через Грозный, Владикавказ и Краснодар, расширяясь к Черноморскому побережью Кавказа и Азовскому морю. На территории горячей полосы выделяются горячие пятна 1-го ранга риска, связанные с высокой плотностью населения и особо ценными объектами – Дербент, единственный на Кавказе объект культурного наследия ЮНЕСКО, и горный кластер Сочи с Олимпийскими объектами, а также горячие пятна 2-го ранга риска – крупные города и курорты Северного Кавказа. Горячие пятна риска Кавказа требуют повышенного внимания к организации экологического мониторинга, проведения инженерно-защитных мероприятий и информации для населения и принимающих решения организаций о возможных стихийных бедствиях и катастрофах.

Ключевые слова: устойчивое развитие, горные территории, риск, природные опасности, ущерб, уязвимость, метод анализа иерархий Саати.

Благодарности: *Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №19-47-02010, «Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India») и темы НИР (№0142-2014-0027 «Развитие теории и методов изучения новейшей тектоники и современной геодинамики платформенных и орогенных территорий применительно к оценке их безопасности»).*

Для цитирования: Свалова В. Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. *Геология и геофизика Юга России.* 2022. 12 (1): 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010.

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010

Original paper

Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories

V. B. Svalova

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, RAS, 13, building 2 Ulansky per., Moscow 101000, Russian Federation, e-mail: v-svalova@mail.ru;

Reseived: 04.02.2022, revised: 21.02.2022, accepted: 11.03.2022

Abstract: Relevance. The tendency to increase the danger and risk of natural and man-made disasters poses a threat to humanity both at the global and national and regional levels. In this regard, fundamental and applied science is put forward as priorities, designed to develop and develop new directions and approaches to solving problems of safety theory and applied methods for analyzing and managing the risk of hazardous natural and man-made processes, emergencies, natural disasters and catastrophes at a deeper scientific level. **Aim.** The forecast of natural disasters and catastrophes is one of the most important tasks of scientific and national economic activity that has not yet been resolved. The aim of the work is to develop an integrated approach to the risk analysis of hazardous natural processes, risk assessment and management of individual and integral natural hazards and risks; identification of the determining parameters of geoecological risk for various areas, regions and geological settings; development of the concept and identification of hot spots according to geoecological risk. **Methods.** When developing the problems of risk assessment and management, methods and approaches of risk analysis were used. One of the main research methods was the Hierarchy Analysis Method. **Results:** The concept and methodology for unification, formalization and digitalization of the assessment and mapping of natural and environmental risk have been developed based on a common platform for risk management and identification of the key parameters of natural hazard for various territories and natural and technogenic conditions. In the Caucasus region, the hot zone of the Caucasus is clearly distinguished according to the degree of ecological risk, which characterizes the collision zone of the African and Eurasian plates. The hot zone of the Caucasus runs from Makhachkala through Grozny, Vladikavkaz and Krasnodar, expanding to the Black Sea coast of the Caucasus and the Sea of Azov. On the territory of the hot zone, hot spots of the 1st risk rank are distinguished, associated with a high population density and especially valuable objects (Derbent, the only UNESCO cultural heritage site in the Caucasus, and the Sochi mountain cluster with Olympic sites) as well as hot spots of the 2nd risk rank (large cities and resorts of the North Caucasus). Hot risk points in the Caucasus require increased attention to the organization of environmental monitoring, engineering and protective measures and informing the population as well as decision-making organizations about possible natural disasters and catastrophes.

Keywords: sustainable development, mountain territories, risk, natural hazards, damage, vulnerability, the analytical hierarchy process developed by Saaty.

Acknowledgment: *This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, (project No. 19-47-02010, "Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India") and research topics (No. 0142-2014-0027 "Development of the theory and methods of studying the latest tectonics and modern geodynamics of platform and orogenic territories in relation to the assessment of their safety").*

For citation: Svalova V. B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 129-147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010.

Введение

Концепция Устойчивого развития горных территорий является составной частью концепции Устойчивого развития территорий, которая в свою очередь является частью общей концепции Устойчивого развития [Безопасность России, 2015].

Комплексный системный подход к решению проблем устойчивого развития территорий может осуществляться на основе концепции управления риском [Природные опасности России, 2003], когда количественно оценивается риск от каждого последующего шага развития территорий и внедрения в экологическую среду и даются рекомендации по снижению такого риска.

Также следует учитывать все многообразие опасных природных процессов на данной территории и возможное усиление их воздействия на геологическую среду и увеличение возможных ущербов при возрастающей экологической нагрузке на систему.

Природный риск горных и равнинных территорий имеет свою специфику и особенности.

Многие геоэкологические проблемы стоят особенно остро на горных территориях.

Если наибольшей природной опасностью для равнинных территорий являются наводнения, то для горных местностей наибольшую опасность представляют землетрясения [Природные опасности России, 2001, 2002]. И проливные дожди, и землетрясения являются триггерами для оползневых процессов – селей, обвалов, осыпей, оползней разного типа, которые также наиболее опасны для горных территорий [Zaalishvili et al., 2021].

Для оценки экологического риска необходимо проанализировать всю сложность геоэкологической и метеорологической обстановки в регионе, а также вычислить возможные потери и ущерб в результате природных бедствий и катастроф. Все параметры природного риска следует формализовать и оценить для перехода от качественного анализа к количественному.

Некоторые виды опасностей могут носить определяющий характер, а другие подчиненный. Также некоторые тектонические и геолого-геофизические характеристики территорий носят доминирующий характер в регионе, а другие второстепенный и подчиненный. Для каждой территории необходим комплексный геолого-геофизический и метеорологический анализ с точки зрения возможных природных опасностей. Затем необходимо выделение определяющих и доминирующих опасностей, их количественная оценка на основе сравнительных характеристик параметров опасных природных и техногенных процессов.

Процесс оценки экологического риска носит вероятностно-детерминированный характер, связанный как с экспертными оценками специалистов, анализом физических процессов, так и со статистикой природных и техногенных опасностей и их последствий для регионов. Результатом таких исследований для регионов может служить построение карт экологического риска как по отдельным видам опасностей, так и комплексных экологических карт по ряду признаков с выделением горячих пятен по степени риска с дальнейшими рекомендациями по организации комплексного экологического мониторинга для территории в целом и объектового мониторинга для наиболее опасных и ценных строений и объектов, подверженных опасным экологическим процессам. Специальный интерес представляют особо ценные и охраняемые объекты культурного наследия, заповедные территории

и заказники, а также особо опасные промышленные объекты – атомные станции, плотины, дороги, мосты, трубопроводы, заводы опасного промышленного производства и др.

В этой связи большое значение приобретает экологическая оценка территорий с точки зрения изучения экологической нагрузки, решения проблем рационального природопользования и устойчивого развития для планирования градостроительства и размещения на территории новых объектов, представляющих экологическую опасность, таких, например, как места депонирования и глубокой переработки твердых бытовых и коммунальных отходов, что является крайне актуальной и многоплановой задачей, особо важной в горных и густонаселенных регионах, каждый из которых имеет свою специфику и высокую экологическую нагрузку.

Одним из важных вопросов рационального природопользования и территориального планирования Кавказского региона является развитие санаторно-курортного комплекса, строительство новых объектов для развития внутреннего туризма с выполнением всех критериев и норм устойчивого развития как территорий в целом, так и горных территорий в особенности. Таким образом, оценка, картирование и управление экологическим риском является важной народно-хозяйственной задачей, решение которой должно быть востребовано как научными, так и административными организациями, органами, принимающими решения и ответственными за безопасность в регионе, включая систему МЧС.

Целью данной работы является разработка методики унифицированной оценки и картографирования дифференцированного и интегрального природного риска с акцентом на горные территории, выделение определяющих параметров природной опасности, ущерба и риска и расчет весовых вкладов параметров на основе метода анализа иерархий Саати.

Результатом исследований по данной тематике может быть создание комплексного Атласа природных опасностей и рисков Кавказского региона, состоящего из комплекта экологических карт разного назначения, разработка и внедрение геоэкологического рейтинга городов Кавказского региона, а также комплексной системы рекомендаций по организации мониторинга, по системе рационального природопользования и постоянного устойчивого экономического роста.

Опасные природные процессы, стихийные бедствия и катастрофы

Самыми разрушительными стихийными бедствиями в мире являются землетрясения, наводнения и ураганы. Цунами и извержения вулканов также крайне опасны, но они сравнительно редки.

Основными опасными природными процессами на горных территориях являются землетрясения, оползни и наводнения. На равнинных территориях – наводнения, оползни и карст. На городских равнинных территориях – оползневые процессы, карст и подтопление [Геологический риск…, 2020; Москва, 1997; Рекомендации…, 2002] (Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Республики Дагестан от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008-2014 гг.». Махачкала: Главное управление МЧС РФ по Республике Дагестан, 2009-2015; Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Республики Ингушетия от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2008-2014 гг.». Магас: Главное управление МЧС РФ

по Республике Ингушетия, 2008-2014; Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Кабардино-Балкарской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008-2014 гг.». Нальчик: Главное управление МЧС РФ по Кабардино-Балкарской Республике, 2009-2015; Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территории Чеченской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008-2014 гг.». Грозный: Главное управление МЧС РФ по Чеченской Республике, 2009-2015; Доклады «О состоянии защиты населения и территорий Карачаево-Черкесской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2008-2014 гг.». Черкесск: Главное управление МЧС РФ по Карачаево-Черкесской Республике, 2009-2015; Защита от затопления и подтопления городов, населенных пунктов, объектов народного хозяйства и ценных земель в бассейне р. Терек на территории пяти республик Российской Федерации – Дагестана, Ингушетии, Кабардино-Балкарии, Северной Осетии, Чечни (первоочередные противопаводковые мероприятия). Федеральная целевая программа. М.: Роскомвод, 1995. 63 с.; Краевая целевая программа «Экология и природные ресурсы Ставропольского края на 2012-2015 годы. Утверждена постановлением Правительства Ставропольского края от 20 июля 2011 г. №268-п. Ставрополь, 2011. 27 с.; Материалы для ежегодного государственного доклада «О состоянии защиты населения и территории Республики Северная Осетия-Алания от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008-2014 гг.». Владикавказ: Главное управление МЧС РФ по Республике Северная Осетия-Алания, 2008-2014; Материалы для подготовки ежегодного государственного доклада «О состоянии защиты населения и территории Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» по Ставропольскому краю за 2008-2014 гг.». Ставрополь: Главное управление МЧС РФ по Ставропольскому краю, 2009-2015).

Землетрясения и ливни являются триггерами для оползневых процессов.

Не существует опасного природного процесса, напрямую выражающего тектоническую опасность, параметрами которой являются глубинные разломы, скорости движения поверхности и литосферных плит региона, трещиноватость пород, повышенный тепловой поток, напряженно-деформированное состояние среды.

Но многие опасные природные процессы – землетрясения, оползни, вулканы, цунами – вызваны именно тектоническими и геодинамическими причинами [Милюков и др., 2015; Моисеенко, Негров, 1993; Хулелидзе, 2010; Чотчаев и др., 2020; Ganapathy et al., 2018; Rogozhin et al., 2015; Zaalishvili et al., 2021].

Оползни и карст на городских территориях более опасны, чем подтопление, вследствие большей неожиданности и непредсказуемости события. Опасность от подтопления более распределена по времени, но ущерб от разрушенного здания может быть одинаков от воздействия оползня, провала земной поверхности или перекоса фундамента и обрушения здания вследствие подтопления.

Геоэкологический риск

Существуют различные определения геоэкологического риска [Безопасность России, 2015; Геологический риск…, 2020; Природные опасности России, 2003; Рекомендации…, 2002; Шныпарков и др., 2013; Knight, 1921; Corominas et al., 2014; Vranken et al., 2015]. Наиболее распространенными определениями являются: 1) Риск есть математическое ожидание ущерба; 2) Риск равен произведению

вероятности возможного опасного события на произведенный в случае события ущерб:

$$R = PxD,$$

где R – риск, P – вероятность, D – ущерб.

Для оценки опасности, ущерба и риска следует формализовать параметры, их определяющие, и адекватно их оценивать на основе экспертных и статистических характеристик.

Для построения карт риска необходимо найти пересечение карты интегральной природной опасности и интегральной карты (объединения карт) возможного ущерба, т. е. для каждого i-того фрагмента карты риска Ri найти произведение вероятности интегрального опасного события Pi на сумму различных k-тых возможных ущербов от опасных процессов:

$$R = PxD,$$

где R – риск, P – вероятность, D – ущерб.

$$R_i = P_i\, xD_i$$

$$R_i = \sum_j \alpha_j P_{ij} \sum \beta_k D_{ik,} \qquad (1)$$

где α_j – вес отдельной природной опасности, β_k – вес ущерба для отдельного параметра.

Город в сейсмоопасной зоне является источником повышенного риска вследствие больших потенциальных жертв и разрушений.

Там, где на фоне высокой сейсмической опасности существует еще оползневая опасность, риск существенно повышается.

И если сейсмическая опасность на территории города одинакова, то оползневая опасность в сейсмоопасном городе дифференцирована и увеличивает опасность и риск.

Следует понимать, что параметры опасности и риска тесно связаны между собой. Где больше население, там больше жилья, дорог и коммуникаций.

Как правило, цена земли и жилья выше там, где выше плотность населения. Там же выше плотность застройки и коммуникаций. Таким образом, плотность населения может рассматриваться как показатель и определяющий параметр для оценки потенциального ущерба в случае опасного события. Карты плотности на-

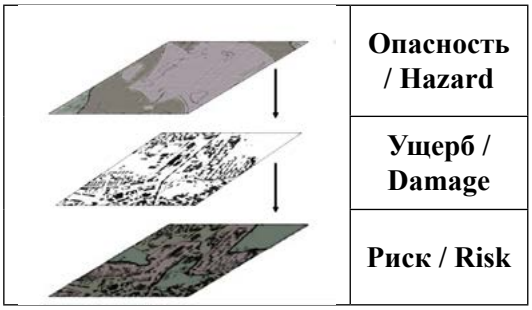


Рис. 1. Информационные слои карты риска [Геологический риск…, 2020, с изменениями] / Fig. 1. Information layers of the risk map [Geological risk…, 2020, as amended]

селения очень показательны для оценки потенциального ущерба при стихийных бедствиях и катастрофах.

На картах риска отражается пространственная распространенность различных природных опасностей с выделением территорий с различной степенью ущерба по отношению к действию опасных процессов.

Расчетными параметрами являются данные о вероятности развития опасных процессов, а также показатель ущерба для территорий. При наложении данных параметров на топографическую основу можно получить величину риска для любого участка карты (рис. 1).

Составляются карты дифференцированного и интегрального риска. Карты дифференцированного риска отражают риск от какой-либо одной природной опасности – сейсмической, оползневой, карстовой и т. д. Карты интегрального риска показывают суммарный эффект от нескольких опасностей на заданной территории за определенную единицу времени, обычно, 1 год.

По отношению к реципиенту риски могут быть социального, экономического, экологического и др. характера. Карты имеют различный масштабный уровень: глобальный, федеральный, региональный, локальный и объектовый.

Опасные природные процессы Кавказского региона. Анализ фактического материала и методы исследования

1. Сейсмичность

Северный Кавказ является частью протяженной Крым-Кавказ-Копетдагской зоны Иран-Кавказ-Анатолийского сейсмоактивного региона.

Северный Кавказ характеризуется самой высокой сейсмической активностью в европейской части России [Атлас…, 2007, 2010; Уломов и др., 2007].

Ему свойственны очень крупные землетрясения.

В сейсмическом отношении наиболее активны территории Дагестана, Чечни, Ингушетии и Северной Осетии.

Наиболее сейсмоопасной является территория в полосе шириной 200-300 км вдоль южной государственной границы, где возможны землетрясения интенсивностью 8-10 баллов (рис. 2).

2. Оползневой риск на Северном Кавказе

Оползневые процессы встречаются практически на всей территории Северного Кавказа.

Территории с чрезвычайно опасными районами распространены в двух субъектах Северного Кавказа – Краснодарском крае и Республике Дагестан [Атлас…, 2007, 2010; Добрев и др., 2019; Шнырпарков и др., 2013; Бабурин и др., 2014].

Практически во всех субъектах Северного Кавказа получили распространение районы с высокой и весьма высокой степенью оползневой опасности (рис. 3).

Воздействию оползней на Северном Кавказе подвержены такие крупные города как Новороссийск, Краснодар, Сочи, Майкоп, Армавир, Ставрополь, Черкесск, Кисловодск, Нальчик, Владикавказ, Грозный, Махачкала.

В средне- и низкогорье в наибольшей степени проявляется оползневая опасность и сосредоточена значительная часть инфраструктуры, что определяет наибольший оползневой риск.

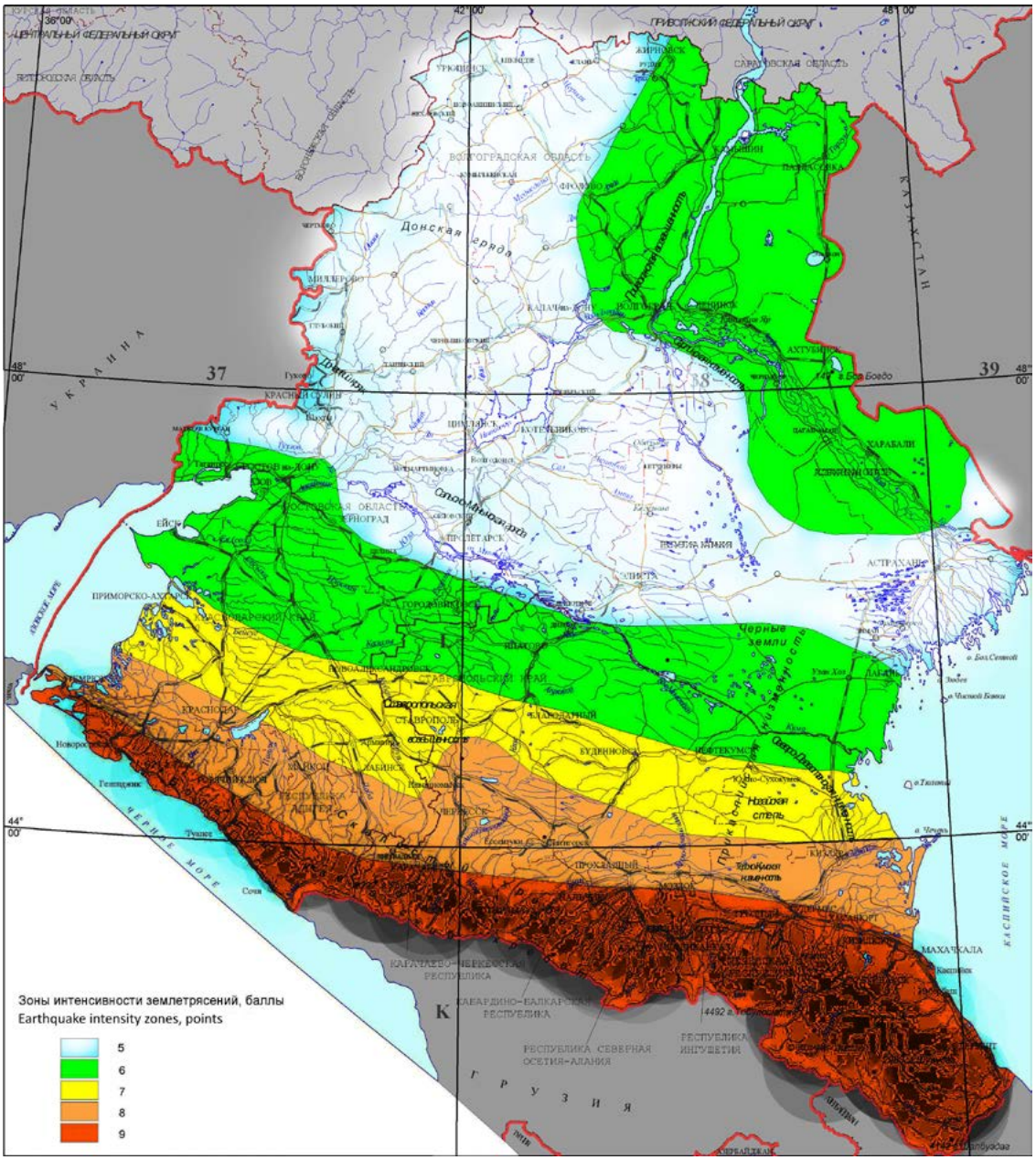


Рис. 2. Северо-Кавказский и Южный федеральный округа. Карта общего сейсмического районирования со степенью сейсмической опасности (Росстат) /
Fig. 2. North Caucasian and Southern Federal Districts. Map of general seismic zoning with the degree of seismic hazard (Rosstat)

3. Наводнения на Северном Кавказе

Весенние половодья и летне-весенние паводки являются источниками наиболее опасных и разрушительных наводнений на Северном Кавказе.

Реки Северного Кавказа характеризуются различными видами формирования стока. Реки подразделяются на два типа [Разумов и др., 2000, 2013]: 1) Реки с максимальным стоком от таяния снегов и ледников. 2) Реки с максимальным стоком, обусловленным выпадением интенсивных осадков. К первому типу относится часть рек Ставропольского края и реки республик Северного Кавказа. Ко второму типу – равнинные реки Ставропольского края.

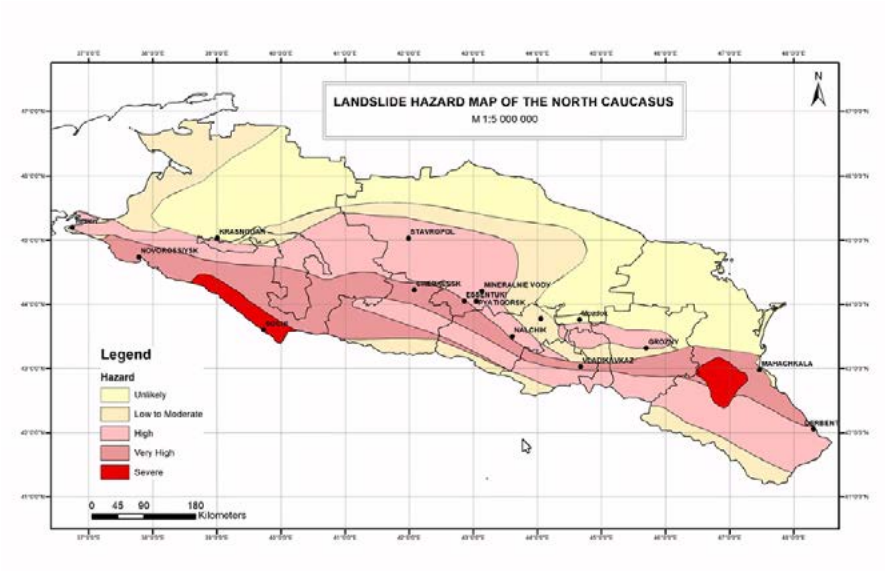


Рис. 3. Опасность оползней Северного Кавказа [Атлас…, 2007] /
Fig. 3. Hazard of landslides in the North Caucasus [Atlas…, 2007]

Степень опасности наводнений определяется превышением максимального уровня воды в реках во время затопления над исходным уровнем.

Максимальный уровень воды определяет площадь затопления. Выделяются 4 зоны с разной степенью опасности наводнений (рис. 4) [Разумов и др., 2000, 2013].

1) Зона чрезвычайно опасных наводнений. При этом максимальные уровни воды превышают исходный уровень более чем на 3,2 метра (район в бассейне р. Кубань.)

2) Зона весьма опасных (2,1-3,2 м) и опасных (1,5-2,0 м) наводнений

(районы в среднем и нижнем течении р. Терек).

3) Зона умеренно опасных наводнений (0,8-1,4 м) (бассейны рек Сулак, Сунжа, Малка, Баксан, Чегем, Черек, Кума).

4) Зона мало опасных наводнений. Подъем воды менее 0,8 м. Распространены на большей части региона.

Наибольшей угрозе наводнений подвержена самая густонаселенная предгорная и равнинная часть региона. В горных и предгорных районах наблюдается высокая вероятность прохождения по руслам рек селевых потоков, что является результатом совместного действия талых вод и проливных дождей. Процесс сопровождается стремительным подъемом уровня воды в узких речных долинах. Паводки редкой повторяемости с максимальным расходом наносят наибольший урон экономике и населению.

Потенциальный ущерб от природных опасностей и катастроф. Анализ фактического материала

При оценке потенциального ущерба в случае наступления катастрофического события в качестве определяющих параметров могут рассматриваться плотность населения, плотность застройки, плотность коммуникаций, стоимость жилья, стоимость земли. На основе экспертных оценок в качестве основных определяющих параметров оценки интегрального ущерба можно рассматривать плотность населения, плотность коммуникаций и плотность застройки (рис. 5).

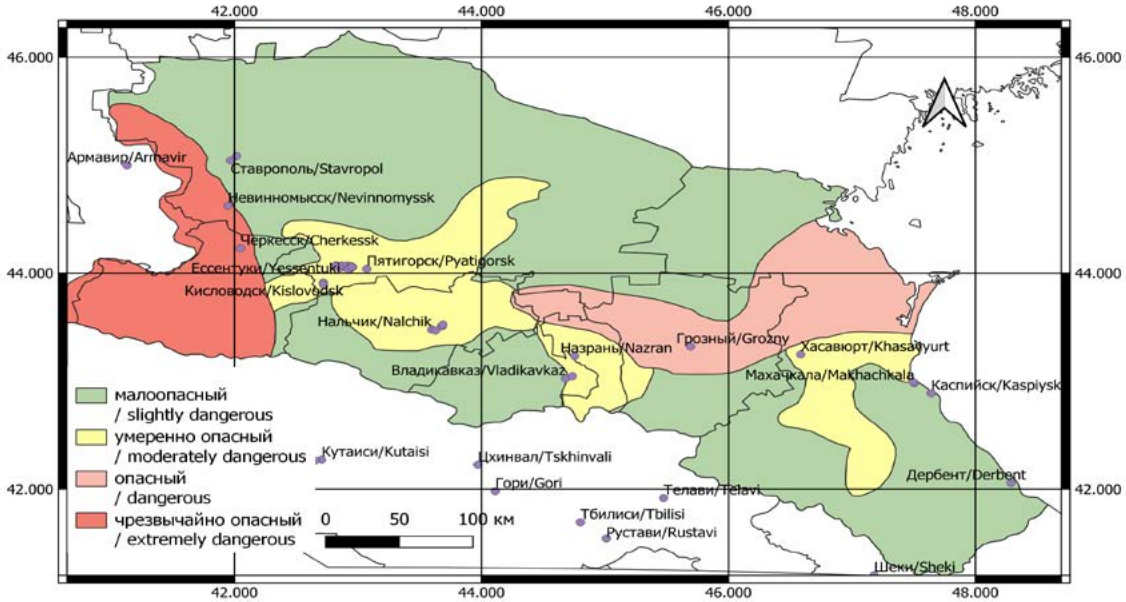
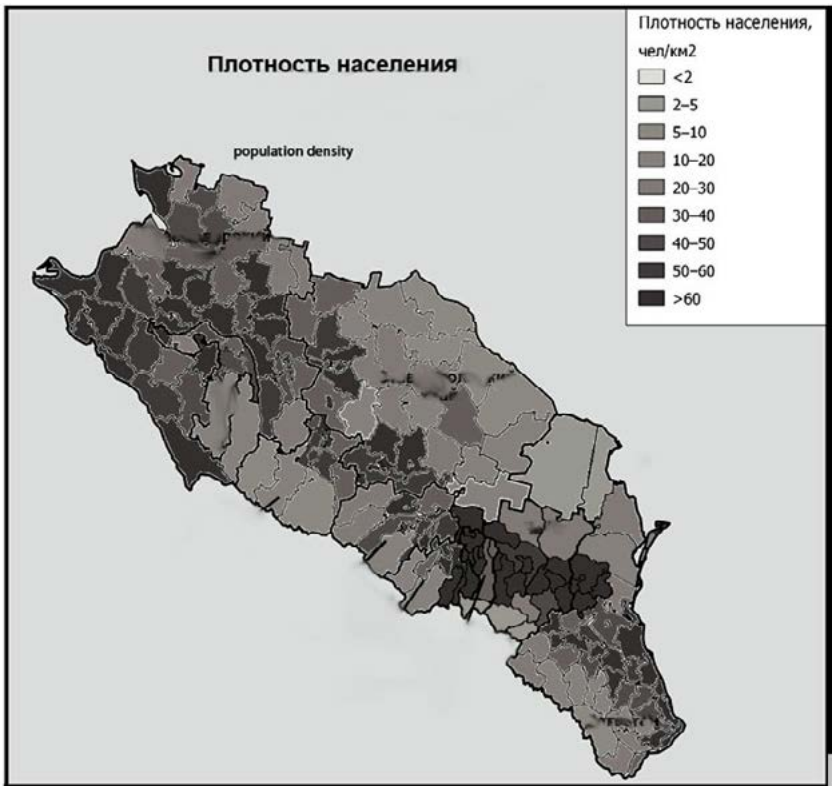


Рис. 4. Опасность наводнений [Разумов и др., 2000, 2013]. Тип процесса по уровню опасности: 1) черный – чрезвычайно опасный, 2) темный – опасный / очень опасный, 3) белый – умеренно опасный, 4) светлый – малоопасный /

Fig. 4. Flood hazard [Razumov et al., 2000, 2013]. Type of process by hazard level: 1) black – extremely dangerous, 2) dark – dangerous / very dangerous, 3) white – moderately dangerous, 4) light – slightly dangerous



1) 2) 3)

Рис. 5. Плотность населения Северного Кавказа (Росстат) /

Fig. 5. Population density of the North Caucasus (Rosstat)

Методы исследования
Метод анализа иерархий

Существуют две основные проблемы при оценке и картографировании геоэкологического риска:

1) Унификация количественной оценки природного риска от разного вида опасностей при наличии различных качественных и количественных параметров опасных природных процессов и различных параметров и значений оценки ущерба.

2) Унифицированный подход к построению пересечения карт интегральной опасности и интегрального ущерба, включая построение интегральных карт различных опасных природных процессов и интегральных карт различного вида потенциальных ущербов.

Количественными параметрами оценки опасности служат:

– Для землетрясений – сейсмичность в баллах,
– Для наводнений и подтоплений – высота подъема воды,
– Для ураганов – скорость ветра,
– Для ливней – количество выпавших осадков,
– Для засухи – температура и влажность воздуха и почвы.
– Для оползней таким количественным параметром может служить устойчивость оползневого склона, но это расчетный параметр. А измеряемыми параметрами оценки оползневой опасности могут служить угол склона, высота склона, прочностные свойства пород, обводненность (близость реки), а триггерами – сейсмичность и метеорология (ливни, таяние снега). Также результат оползневого процесса оценивается объемом и массой оползневого тела.
– Для снежных лавин и селей для характеристики опасного процесса используются скорости движения потока масс, длина склона, плотность и состав пород, объем движущихся масс. Оценивается и рассчитывается область поражения движущимся потоком.

По каждому из выбранных параметров устанавливается количественная шкала и делится на 5 градаций: очень малое значение, малое, среднее, умеренно большое, очень большое. Каждой градации присваивается численный параметр, например: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9. Этот параметр рассматривается как оценка вероятности опасного природного события.

Ущерб также оценивается по 5 градациям: очень малое значение, малое, среднее, умеренно большое, очень большое. Каждой градации также присваивается численный параметр: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9.

Чтобы учесть все эти параметры, необходима также весовая оценка вклада каждого параметра в процесс.

Аналогично, весовая оценка вклада потребуется при оценке интегрального риска как суммы рисков от различных опасных процессов. Что в свою очередь требует экспертной оценки специалистов, статистических данных и разработки математических методов и подходов.

Так одним из наиболее продуктивных методов оценки весовых характеристик вклада природных опасностей от каждого из опасных природных процессов в оценку интегрального риска может служить метод анализа иерархий, разработанный Томасом Саати (США) в 1970 г. [Саати, 1993].

Основу метода Саати составляют попарные сравнения альтернатив по каждому из критериев и попарное сравнение критериев с точки зрения важности для поставленной цели. Т. е. все сравнения производятся попарно самым простым методом.

Метод позволяет получить объективные математические соотношения между альтернативами на основе субъективного взгляда лица, принимающего решение.

Метод предлагает использовать для сравнения качественные признаки, переводимые в количественные по 9-тибалльной шкале (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Качественные варианты сравнения и соответствующие им количественные баллы. / Qualitative comparison options and their corresponding quantitative scores.

Качественное сравнение/ Qualitative comparison	Количественный аналог/ Quantitative analogue	Качественное сравнение/ Qualitative comparison	Количественный аналог/ Quantitative analogue
равно / equals	1	равно / equals	1
немного лучше / a little better	3	немного хуже / a little bit worse	1/3
лучше / better	5	хуже / worse	1/5
значительно лучше / much better	7	значительно хуже / much worse	1/7
принципиально лучше / fundamentally better	9	принципиально хуже / fundamentally worse	1/9

Можно использовать промежуточные баллы 2, 4, 6, 8, если трудно определиться между двумя качественными признаками.

Построение матрицы попарных сравнений критериев по цели

Основными опасными природными процессами на горных территориях являются землетрясения, оползни и наводнения. На равнинных территориях – наводнения, оползни и карст. На городских равнинных территориях – оползневые процессы, карст и подтопление.

Согласно экспертным оценкам, можно считать, что для горных территорий землетрясения являются самыми опасными процессами, опаснее, чем оползни, и значительно опаснее, чем наводнения. А оползни опаснее, чем наводнения.

Тогда можно получить матрицу попарных сравнений критериев для землетрясений (ЗТ), оползней (О) и наводнений (Н) (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Матрица попарных сравнений критериев. / Pairwise Criteria Comparison Matrix.

	Землетрясения / Earthquakes	Оползни / Landslides	Наводнения / Floods
Землетрясения / Earthquakes	1	5	7
Оползни / Landslides	1/5	1	5
Наводнения / Floods	1/7	1/5	1

Достаточно составить только часть матрицы над главной диагональю. Под главной диагональю записываются числа, обратные к числам над диагональю. На диагонали ставятся единицы, так как одинаковые критерии равны между собой.

Далее, согласно методике Саати, проводится нормировка матрицы:

1. Находится сумма элементов каждого столбца (табл. 3).

2. Все элементы матрицы делятся на сумму элементов соответствующего столбца (табл. 4).

3. Определяются веса строк. Для этого определяется среднее значение в каждой строке полученной матрицы (табл. 5).

Полученный столбец определяет веса строк матрицы – веса критериев с точки зрения поставленной цели. Этот столбец называется **весовым столбцом критериев по цели** (см. табл. 5).

Таблица 3 / Table 3

Матрица суммы элементов каждого столбца. / Sum matrix of elements of each column.

	Землетрясения / Earthquakes	Оползни / Landslides	Наводнения / Floods
Землетрясения / Earthquakes	1	5	7
Оползни / Landslides	1/5	1	5
Наводнения / Floods	1/7	1/5	1
∑	1,343	6,2	13

Таблица 4 / Table 4

Матрица элементов, деленных на сумму элементов соответствующего столбца. / Matrix of elements divided by the sum of the elements of the corresponding column.

	Землетрясения / Earthquakes	Оползни / Landslides	Наводнения / Floods
Землетрясения / Earthquakes	0,745	0,8	0,56
Оползни / Landslides	0,15	0,16	0,38
Наводнения / Floods	0,1	0,03	0,08
∑	1,343	6,2	13

Таблица 5 / Table 5

Матрица с весовым столбцом критериев по цели. / Matrix with a weighted column of criteria by goal.

	Землетрясения / Earthquakes	Оползни / Landslides	Наводнения / Floods	$\sum_{стр}/3$
Землетрясения / Earthquakes	0,745	0,8	0,56	0,7
Оползни / Landslides	0,15	0,16	0,38	0,23
Наводнения / Floods	0,1	0,03	0,08	0,07
∑	1,343	6,2	13	

Полученный столбец {0,7; 0,23; 0,07} задает веса строк матрицы – веса критериев с точки зрения поставленной цели.

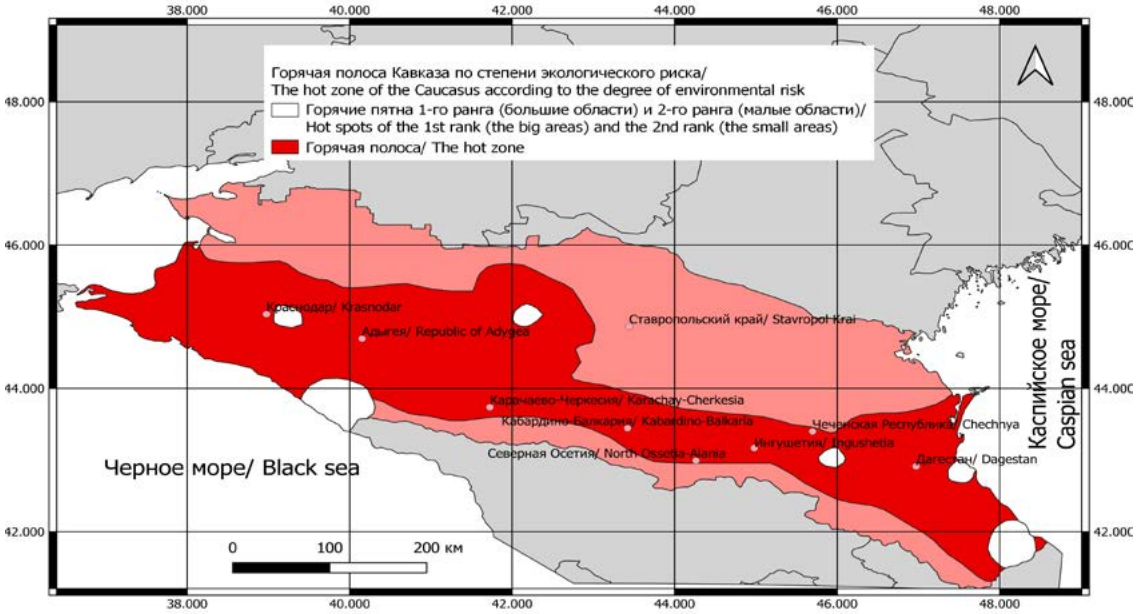


Рис. 6. Горячая полоса Кавказа по степени экологического риска: горячие пятна риска на горячей полосе Кавказа (темная полоса) [Атлас…, 2007, 2010]; большие белые круги – горячие пятна 1-го ранга, малые белые круги – 2-го ранга. (Большие города и курорты Северного Кавказа) /
Fig. 6. The hot zone of the Caucasus according to the degree of environmental risk: Risk hot spots in the Caucasus hot zone (dark band) [Atlas…, 2007, 2010]. Large white circles are hot spots of the 1st rank, small white circles are of the 2nd rank. (Big towns and Resorts of the North Caucasus)

Тогда вес землетрясений при оценке интегральной опасности 0,7, оползневых процессов 0, 23, а наводнений 0,07.

Что отражает наибольший вклад сейсмической опасности в интегральную природную опасность. Таким образом получен весовой вектор природных опасностей α_j:

$$\alpha_j = \{0,7;\ 0,23;\ 0,07\}$$

Составив аналогичную матрицу попарных сравнений критериев по цели для оценки ущерба, считая плотность населения значительно важнее плотности коммуникаций, а плотность коммуникаций важнее плотности застройки, в качестве основного параметра с наибольшим весом можно выделить плотность населения, которая определяет все остальные параметры. Тогда можно получить весовой вектор потенциальных ущербов β_k:

$$\beta_k = \{0,7;\ 0,23;\ 0,07\}$$

Затем интегральный риск рассчитывается по формуле (1):

$$R_i = \sum_j \alpha_j P_{ij} \sum \beta_k D_{ik} \quad (1)$$

Исторически сложилось так, что именно на горячей полосе Кавказа по степени природной опасности сконцентрирована наибольшая плотность населения (Рис. 5), плотность коммуникаций и застройки, техногенной нагрузки (Рис. 6), а это определяет горячую полосу Кавказа по экологическому риску, на которой выделяются горячие пятна риска 1-го и 2-го ранга (Рис. 7).

В Кавказском регионе таким образом можно выделить горячую полосу Кавказа по степени экологического риска, характеризующую зону коллизии Африканской

и Евразийской литосферных плит, которая проходит от Махачкалы через Грозный, Владикавказ и Краснодар, расширяясь к Черноморскому побережью Кавказа и Азовскому морю. На территории горячей полосы выделяются горячие пятна 1-го ранга риска, связанные с высокой плотностью населения и особо ценными объектами – Дербент, единственный на Кавказе объект культурного наследия ЮНЕСКО, и горный кластер Сочи с олимпийскими объектами, а также горячие пятна 2-го ранга риска – крупные города и курорты Северного Кавказа (рис. 7).

Горячие пятна риска Кавказа требуют повышенного внимания к организации экологического мониторинга, проведения инженерно-защитных мероприятий и информации для населения и принимающих решения организаций о возможных стихийных бедствиях и катастрофах.

Результаты исследования и их обсуждение

Несмотря на развитие цивилизации, опасные природные процессы, стихийные бедствия и катастрофы являются постоянным источником больших человеческих жертв и огромных разрушений. Ущерб и жертвы от землетрясений, наводнений, штормов, ураганов, цунами, извержений вулканов, оползней, селей, лавин и других опасных природных процессов и явлений не только не уменьшаются, но продолжают расти. Человечество живет в условиях возрастающего риска стихийных бедствий и катастроф. За последние 20 лет в катастрофах и стихийных бедствиях в мире погибло свыше 3 миллионов человек, пострадало свыше 800 миллионов [Basher, 2006; Brikmann, 2007; Blaikie, 1994; Cutter, 2014; Cutter, Finch, 2008; Dirk, 2007].

Интересно отметить, что существуют 2 концепции горячих пятен – в геодинамике и в оценке риска [Свалова, 2021; Dilley et al., 2005; Birch, 1975; Burke, Wilson, 1981]. Важным и интересным следствием работ является рассмотрение двух концепций горячих пятен: в геодинамике в связи с подъемом мантийных плюмов и диапиров (горячих пятен hot spots) и в оценке геоэкологического риска – мест максимального риска (hot spots). Области подъема мантийных диапиров на фоне коллизии литосферных плит являются областями повышенной тектонической опасности и напряженности. Горячими областями на Земном шаре являются Тихоокеанское огненное кольцо и Альпийско-Тихоокеанский пояс, где происходит наибольшее число землетрясений и извержений вулканов. Кавказский регион является частью Альпийского пояса. Не существует опасного природного процесса, напрямую выражающего тектоническую опасность, параметрами которой являются глубинные разломы, скорости движения поверхности и литосферных плит региона, трещиноватость пород, повышенный тепловой поток, геотермальные проявления (гейзеры, фумаролы, газовые эманации), повышенное напряженно-деформированное состояние среды. Но многие опасные природные процессы – землетрясения, оползни, вулканы, цунами – вызваны именно тектоническими и геодинамическими причинами.

Разработана концепция и методика унификации, формализации и цифровизации оценки и картографирования природно-экологического риска на базе общей платформы управления риском и выявления определяющих параметров природной опасности для различных территорий и природно-техногенных условий. А также разработана методика расчета интегрального ущерба и риска и расчет весовых вкладов параметров на основе метода анализа иерархий Саати.

Выводы

Разработана концепция горячей полосы Кавказа и горячих пятен Кавказа различного ранга по риску, а также методика риск-анализа унифицированной оценки и картографирования дифференцированного и интегрального геоэкологического риска. Разработана методика оценки весовых параметров и интегрального геоэкологического риска на основе метода сравнения иерархий Саати.

Аналогичный подход может быть использован при выборе площадок для строительства особо важных и опасных объектов промышленности и культуры, мест депонирования и переработки твердых бытовых и коммунальных отходов, мусоросжигательных заводов, строительства дамб и плотин, атомных электростанций и др. Методика дает возможность увеличивать детальность оценки риска, делать научно-технические выводы и давать рекомендации для населения и лиц и организаций, принимающих решения и обеспечивающих безопасность жизнедеятельности и устойчивое развитие регионов.

Литература

1. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация. / Под общей редакцией С.К. Шойгу. – М.: Феория, 2010. – 696 с.

2. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций РФ. Южный федеральный округ. – М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2007.

3. Бабурин В.Л., Данилина А.В., Гаврилова С.А., Грязнова В.В., Шныпарков А.Л. Оползневой риск на Северном Кавказе. // В сборнике Снежные лавины, сели и оценка риска. Выпуск 3. – М.: Изд-во «Перо», 2014. – С. 41-49.

4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Системные исследования чрезвычайных ситуаций. / Под ред. Махутова Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015. – 864 с.

5. Геологический риск урбанизированных территорий. / Под ред. Осипова В.И. – М.: РУДН, 2020. – 316 с.

6. Добрев Н.Б., Иванов П.Г., Свалова В.Б., Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В. Опасные экзогенные процессы в горных районах Северного Кавказа и Болгарии. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2019. – Т. 18. №4. – С. 5-14.

7. Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. // Геотектоника. – 2015. – №3. – С. 56-65.

8. Моисеенко У.И., Негров О.Б. Геотермические условия Северо-Кавказской сейсмоопасной зоны. // В кн.: Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 32-40.

9. Москва. Геология и город. / Под ред. Осипова В.И. и Медведева О.П. – М.: Московские учебники и картолитография, 1997. – 400 с.

10. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. / Под ред. А.Л. Рагозина. – М.: Изд. фирма «КРУК», 2003. – 320 с.

11. Природные опасности России. Экзогенные геологические опасности. / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. – М.: Изд. фирма «КРУК», 2002. – 348 с.

12. Природные опасности России. Гидрометеорологические опасности. / Под ред. Г.С. Голицина, А.А. Васильева. – М.: Издательская фирма «КРУК», 2001. – 296 с.

13. Разумов В.В., Перекрест В.В., Стрешнева Н.П., Кюль Е.В. Атлас природных опасностей и стихийных бедствий Кабардино-Балкарской Республики. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. – 66 с.

14. Разумов В.В., Аджиев А.Х., Разумова Н.В. и др. Опасные природные процессы Северного Кавказа. / Под ред. проф. В.В. Разумова. – М.: Изд-во «Феория», 2013. – 320 с.

15. Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы. / Под ред. А.Л. Рагозина. Москомархитектура, ГУ ГО ЧС г. Москвы. – М.: Изд-во ГУП НИАЦ, 2002. – 59 с.

16. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Decision making. Method of hierarchy analysis]. Пер. с англ. – М.: изд-во «Радио и связь», 1993. – 278 с.

17. Свалова В.Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 76-92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

18. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // Физика земли, 2007. – №7. – С. 31-45.

19. Хулелидзе К.К. Анализ опасных природных процессов на территории Северной Осетии. // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. – Вып. 1. – С. 48-49.

20. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70-100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

21. Шнырпарков А.Л., Колтерман П.К., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф. Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа. // Георриск. – 2013. – №4. – С. 20-25.

22. Birch F.S. Conductive heat flow anomalies over a hot spot in a moving medium. // J. Geophysical Research. – 1975. – Vol. 80. – pp. 4825-4827.

23. Brikmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications, // Environment Hazards. – 2007. – No. 7. – pp. 20-31.

24. Burke K.C., Wilson J.T., Hot spots on the Earths surface. // Sci., Amer. – 1981. – Vol. 235. No. 2. – pp. 46-60.

25. Basher R. Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. // Philosophical Transactions of the Royal Society A 364 (1845). – 2006. – pp. 2167-2182.

26. Blaikie P.M., Cannon T., Davis I., Wisner B. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. – Routledge, London. – 1994.

27. Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Mallet J.-P. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. // Bulletin of Engineering Geology and Environment. – 2014. – Vol. 73. No. 2. – pp. 209-263.

28. Cutter S.L. Building disaster resilience: steps toward sustainability. // Challenges in Sustainability. – 2014. – Vol. 1 (2). – pp. 72-79.

29. Cutter S.L., Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. // Proc. Natl. Acad. Sc. – 2008. – Vol. 105 (7). – pp. 2301-2306.

30. Dilley M., Chen R.S., Deichmann W., Lerner-Lam A.L., Arnold M. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. – Washington D.C.: The World Bank, 2005.

31. Dirk Proske. Catalogue of risks. // Natural, Technical, Social and Health Risks. Springer. – 2007. ISBN 978-3540795544.

32. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Mel'kov D. A., Svalova V.B., Nikolaev A.V. GIS approach geospatial application for seismic microzonation study. // Geology and Geophysics of the South of Russia. – 2018. – No. 3. – pp. 116-136.

33. Knight F.H. Risk, Uncertainty and Profit. – Chicago: Houghton Mifflin Company, 1921.

34. 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.

35. Saaty T.L. Decision making with dependence and feedback. The Analytic Network Process. RWS Publications, 2001. – 370 p.

36. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. // Int.J. Services Sciences. – 2008. – Vol. 1. No. 1. – pp. 83-98.

37. Vranken L., Vantilt G., Van Den Elckhaut M., Vandekerckhove L., Poesen J. Landslide risk assessment in densely populated hilly area. // Landslides. – 2015. – Vol. 12. No. 4. – pp. 787-798.

38. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Berger M.G., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Melkov D.A., Kanukov A.S., Svalova V.B., Nikolaev A.V. Endogenous and exogenous manifestations of geodynamic activity in the Central Caucasus. // In: Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering". Switzerland. – 2021. – pp. 499-532.

References

1. Atlas of natural and man-made hazards and emergency risks. The Russian Federation. Ed. S. K. Shoigu. Moscow. Feoria, 2010. 696 p. (In Russ.)

2. Atlas of natural and man-made hazards and risks of emergency situations in the Russian Federation. Southern Federal District. Moscow. IPTs Design. Information. Cartography, 2007. (In Russ.)

3. Baburin V.L., Danilina A.V., Gavrilova S.A., Gryaznova V.V., Shnyparkov A.L. Landslide risk in the North Caucasus. In: Proceedings Snow avalanches, mudflows and risk assessment. Issue 3. Pero, Moscow, 2014. pp. 41-49. (In Russ.)

4. Security of Russia. Legal, socio-economic and scientific and technical aspects. System research of emergency situations. Ed. Makhutova N.A. Moscow. MGOF Znanie, 2015. 864 p. (In Russ.)

5. Geological risk of urbanized territories. Ed. Osipova V.I. Moscow. RUDN, 2020. 316 p. (In Russ.)

6. Dobrev N.B., Ivanov P.G., Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V. Dangerous exogenous processes in the mountainous regions of the North Caucasus and Bulgaria. Grozny Natural Science Bulletin. 2019. Vol. 18. No. 4. pp. 5-14. (In Russ.)

7. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. Geotectonics. 2015. No. 3. pp. 56-65. (In Russ.)

8. Moiseenko U.I., Negrov O.B. Geothermal conditions of the North Caucasian seismically hazardous zone. Geothermy of seismic and aseismic zones. Moscow. Nauka, 1993. pp. 32-40. (In Russ.)

9. Osipova V.I. and Medvedeva O.P. (ed.) Moscow. Geology and city. Moscow. Moscow textbooks and cartolithography, 1997. 400 p. (In Russ.)

10. Ragozin A.L. (ed.) Natural hazards in Russia. Assessment and management of natural risks. Moscow. KRUK, 2003. 320 p. (In Russ.)

11. KutepovaV. M., Sheco A.I. (ed.) Natural hazards in Russia. Exogenous geological hazards. Moscow. KRUK, 2002. 348 p. (In Russ.)

12. GolitsinaG. S., VasilievA. A. (ed.) Natural hazards in Russia. hydrometeorological hazards. Moscow. KRUK, 2001. 296 p. (In Russ.)

13. Razumov V.V., Perekrest V.V., Streshneva N.P., Kul E.V. Atlas of natural hazards and natural disasters of the Kabardino-Balkarian Republic. St. Petersburg. Gidrometeoizdat, 2000. 66 p. (In Russ.)

14. Razumov V.V., Adzhiev A.Kh., Razumova N.V. et al. Dangerous natural processes of the North Caucasus. Ed. V. V. Razumova. Moscow. Feoria, 2013. 320 p. (In Russ.)

15. Recommendations for the assessment of geological risk in the territory of Moscow. Ed. A. L. Ragozin. Moskomarchitectura, GU GO EMERCOM of Moscow. Moscow. NIATs, 2002. 59 p. (In Russ.)

16. Saati T. Decision making. Method of hierarchy analysis. Moscow. Radio and Communication, 1993. 278 p. (In Russ.)

17. Svalova V.B. Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical and mathematical modeling. Geology and geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 76-92. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

18. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 2007. No. 7. pp. 31-45. (In Russ.)

19. Khulelidze K.K. Analysis of dangerous natural processes in the territory of North Ossetia. Scientific and educational problems of civil protection. 2010. Issue 1. pp. 48-49. (In Russ.)

29. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain territories. Geology and geophysics of RussianSouth. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70-100. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

21. Shnyparkov A.L., Kolterman P.K., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Perov V.F. Mudflow risk on the Black Sea coast of the Caucasus. Georisk. 2013. No. 4. pp. 20-25. (In Russ.)

22. Birch F.S. Conductive heat flow anomalies over a hot spot in a moving medium. J. Geophysical Research. 1975. Vol. 80. pp. 4825-4827.

23. Brikmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. Environment Hazards. 2007. No. 7. pp. 20-31.

24. Burke K.C., Wilson J.T., Hot spots on the Earths surface. Sci., Amer. 1981. Vol. 235. No. 2. pp. 46-60.

25. Basher R. Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. Philosophical Transactions of the Royal Society A 364 (1845). 2006. pp. 2167-2182.

26. Blaikie P.M., Cannon T., Davis I., Wisner B. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Routledge, London. 1994.

27. Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Mallet J.-P. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and Environment. 2014. Vol. 73. No. 2. pp. 209-263.

28. Cutter S.L. Building disaster resilience: steps toward sustainability. Challenges in Sustainability. 2014. Vol. 1. No. 2. pp. 72-79.

29. Cutter S.L., Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. In: Proc. Natl. Acad. Sc. 2008. Vol. 105, No. 7. pp. 2301-2306.

30. Dilley M., Chen R.S., Deichmann W., Lerner-Lam A.L., Arnold M. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. Washington D.C. The World Bank, 2005.

31. Dirk Proske. Catalogue of risks. Natural, Technical, Social and Health Risks. Springer. 2007. ISBN 978-3540795544.

32. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Svalova V.B., Nikolaev A.V. GIS approach geospatial application for seismic microzonation study. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2018. No. 3. pp. 116-136.

33. Knight F.H. Risk, Uncertainty and Profit. Chicago: Houghton Mifflin Company, 1921.

34. 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.

35. Saaty T.L. Decision making with dependence and feedback. The Analytic Network Process. RWS Publications, 2001. 370 p.

36. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. /Int. J. Services Sciences. 2008. Vol. 1. No. 1. pp. 83-98.

37. Vranken L., Vantilt G., Van Den Elckhaut M., Vandekerckhove L., Poesen J. Landslide risk assessment in densely populated hilly area. Landslides. 2015. Vol. 12. No. 4. pp. 787-798.

38. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Berger M.G., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Melkov D.A., Kanukov A.S., Svalova V.B., Nikolaev A.V. Endogenous and exogenous manifestations of geodynamic activity in the Central Caucasus. In: Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Switzerland. 2021. pp. 499-532.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 552.52: 553:691
DOI: 10.46698/VNC.2022.45.82.011

Оригинальная статья

Низкообжиговая, энергосберегающая, экологически безопасная технология производства керамических материалов на основе глинистых сланцев

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

ФГБУН Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: dangeogis@mail.ru

Статья поступила: 12.012022, доработана: 17.02.2022, одобрена в печать: 25.02.2022

Резюме: **Актуальность работы**. В настоящее время, с целью энерго- и ресурсосбережения в производстве строительных материалов для строительной отрасли ставятся задачи разработки эффективных стеновых материалов нового поколения, предусматривающие отказ от традиционных обжиговых стеновых материалов, применение которых значительно удорожает стоимость зданий и сооружений. В этой связи разработка и внедрение энергосберегающих строительных материалов нового поколения, произведенных по низкообжиговой и безобжиговой технологиям с использованием природного минерального и техногенного сырья является весьма актуальной задачей. **Цель работы.** Обоснование нового научного направления в технологии производства керамических строительных материалов, а именно безобжигового материала из нерудного минерального сырья на примере низкообжиговых глинистых сланцев, результаты использования которого позволят предположить возможность получения аналогичных строительных материалов и из других видов нерудного сырья (аргиллиты, бентониты, кремнеземистые породы и т. д.). **Методика работы**. Для выполнения комплексных физико-химических исследований нерудного сырья – глинистого сланца были проведены дифференциально-термический, рентгенографический и петрографический анализы глинистого сланца. А для определения нормальной густоты, сроков схватывания, нормальной консистенции стандартных растворов были также применены стандартные методики (ГОСТ 310.1-76…310.3-76, 310.4-81). Физико-технические свойства разработанного безобжигового стенового керамического материала определяли по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 530-95 и ГОСТ 8462-85. **Результаты работы**. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность получения безобжигового керамического материала из низкообожженного (600°С) глинистого сланца, при совместном помоле с негашеной известью до удельной поверхности 2500 см^2/г, путем введения нанодисперсных полисиликатов натрия и перемешивания с водой, и формования из полученной массы изделий, твердение которых происходит как в естественных условиях, так и при тепловлажностной обработке (80–90°С) за счет взаимодействия извести с нанодисперсными частицами полисиликата натрия, а также алюминатными и силикатными составляющими сланца с образованием соответственно гидроаллюминатов и гидросиликатов кальция. Новизной этих исследований является возможность получения производства керамических материалов по безобжиговой технологии из низкообженного нерудного минерального сырья – глинистых сланцев, обжиг которых осуществляется до формования изделий и при низких температурах 500-600°С при этом содержание его в составе смеси составляет до 90-95%, общей массы, что позволяет называть полученный материал керамическим.

Ключевые слова: нерудное минеральное сырье, низкообжиговые глинистые сланцы, нанодисперсные полисиликаты натрия, композиционное вяжущее, керамические материалы.

Для цитирования: 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. 12 (1): 148–161. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.82.011.

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2022.45.82.011

Original paper

Low-burning, energy-saving, environmentally safe technology for producing ceramic materials based on clay shales

B. D. Toturbiev, S. A. Mamaev, A. B. Toturbiev

Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the RAS, 75 Yaragskiy Str., Makhachkala 367010, Russian Federation, e-mail: dangeogis@mail.ru

Reseived: 12.01.2022, revised: 17.02.2022, accepted: 25.02.2022

Abstract: Relevance. Currently, in order to save energy and resources in the production of building materials for the construction industry, the tasks are set to develop effective new generation wall materials that provide for the abandonment of traditional fired wall materials, which significantly increases the cost of buildings and structures. In this regard, the development and implementation of energy-saving building materials of a new generation using low-burning and non-burning technologies using natural mineral and technogenic raw materials is a very urgent task. **Aim.** Substantiation of a new scientific direction in the technology of production of ceramic building materials, namely non-fired from nonmetallic mineral raw materials by the example of low-fired clay shales, the results of which will suggest the possibility of obtaining similar building materials on other types of nonmetallic raw materials (mudstones, bentonites, siliceous rocks, etc…). **Methods.** Differential thermal, X-ray and petrographic analyzes of the shale were carried out to carry out complex physical and chemical studies of nonmetallic raw materials – shale. And to determine the normal density, setting time, normal consistency of standard solutions, standard methods were also used (GOST 310.1-76, 310.3-76, 310.4-81). GOST 530-95 and GOST 8462-85. **Results.** The performed theoretical and experimental studies have shown the possibility of obtaining a non-fired ceramic material from low-fired (600 ° C) clay shale, by joint grinding with quicklime to a specific surface of 2500 cm^2 / g, by introducing nanodispersed sodium polysilicates and mixing with water, and molding from the resulting masses of products, the hardening of which occurs both under natural conditions and during heat and humidity treatment (80-90 ° C) due to the interaction of lime with nanodispersed sodium polysilicate particles, as well as aluminate and silicate components of shale with the formation of hydroaluminates and calcium hydrosilicates, respectively. The novelty of these studies is the possibility of obtaining the production of ceramic materials using low-firing technology from low-fired nonmetallic mineral raw materials – clay shales, which are fired before molding products and at low temperatures of 500-600 ° C, while its content in the mixture is up to 90-95%, total mass, which makes it possible to call the resulting material ceramic.

Key words: nonmetallic mineral raw materials, low-fired clay shale, nanodispersed sodium polysilicates, composite binder, ceramic materials.

For citation: Toturbiev B. D., Mamaev S. A., Toturbiev A. B. Low-burning, energy-saving, environmentally safe technology for producing ceramic materials based on clay shales. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 148–161. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.82.011.

Введение

Масштабы и темпы роста развития современного производства в различных отраслях промышленности требуют разработки и внедрения критических инновационных наукоемких, энерго-ресурсосберегающих, экологически чистых, высоких технологий в различных отраслях промышленности.

Скорейшее решение этой актуальной задачи, когда в мире нарастает экологическая напряженность, рассматривается как стратегическое направление рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды, особенно в странах с высоким научно-техническим и промышленным потенциалом [Путин, 1999].

В этой связи строительная отрасль, относящаяся к крупным потребителям минерально-сырьевых ресурсов, особенно строительная индустрия, требует необходимость создания новых перспективных технологий получения строительных материалов и конструкций на основе местного нерудного минерального сырья [Воробьев, Джимиева, 2008; Бессонов, 2017].

Сейчас, с целью энерго- и ресурсосбережения в производстве строительных материалов для строительной отрасли ставятся задачи разработки эффективных стеновых материалов нового поколения, предусматривающие отказ от традиционных обжиговых стеновых материалов, применение которых значительно удорожает стоимость зданий и сооружений.

Анализ данных ранее проведенных научных исследований в этом направлении [Булгаков, 1998; Лопатников, 2004; Гальперина и др., 1988; Рыбьев и др., 1987; Gendler, Kovshov, 2016; Muñoz et al., 2014; Lianyang, 2013; Scholtzova et al., 2013] показывает, что известные традиционные способы производства керамических изделий состоят из добычи, транспортирования и хранения сырьевых материалов, их переработки и обогащения, приготовления керамических масс, формования сырца, сушки и обжига изделий, который осуществляется в основном по обжиговой технологии. Следовательно, весьма энергоемкой технологии, что усложняет, удорожает и значительно удлиняет технологический процесс изготовления изделий.

Целью исследований является разработка и внедрение энергосберегающих строительных материалов нового поколения по низкообжиговой и безобжиговой технологиям с использованием природного минерального и техногенного сырья, что становится очевидной необходимой задачей для развития современной экономики в этой области.

В этой связи в лаборатории комплексных исследований горных пород и композиционных материалов Института Геологии ДФИЦ РАН проводятся научные исследования комплексного использования ресурсов нерудного сырья для строительной индустрии, на базе современных наукоемких, энерго- и ресурсосберегающих и высоких технологий.

По результатам исследований разработаны инновационные проекты, позволяющие проводить комплексное освоение месторождений нерудного сырья, в том числе вскрышных пород, включая добычу, переработку и производство строительных материалов [Chmielarz et al., 2013; Тотурбиев и др., 2018, 2019; Шутенко, 2008].

Методы исследований

Для выполнения комплексных физико-химических исследований нерудного сырья – глинистого сланца были проведены дифференциально-термический, рентгенографический и петрографический анализы глинистого сланца. Были также применены стандартные методики (ГОСТ 310.1-76…310.3-76, 310.4-81), в том числе для определения нормальной густоты, сроков схватывания, нормальной консистенции стандартных растворов соответственно их активности, как при нормальном твердении, так и при тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму 2+3+6+2

ч (соответственно: продолжительность предварительного выдерживания, подъём температуры и остывание) при температуре изотермического прогрева 85–90ºС. Физико-технические свойства разработанного безобжигового стенового керамического материала определяли по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 530-95 и ГОСТ 8462-85. При этом для определения водопоглощения материала насыщение образцов проводили кипячением их в воде в течение 5 ч, а оценку морозостойкости по степени повреждения и по потере массы после требуемого количества циклов при объёмном замораживании образцов с использованием термокамеры «Синтез», обеспечивающей позиционное регулирование температур в диапазоне от –17 до –25°С.

Объект исследований

Исследуемый нами глинистый сланец Дагестанского месторождения представляет собой смесь глинистых минералов: хлорита, монтмориллонит – гидрослюдистого смешано-слойного образования, полевых шпатов, гидрооксидов железа и кристаллического кварца.

Химический состав глинистого сланца содержит следующие оксиды (в масс., %): SiO_2-52,8; Al_2O_3-20,18; Fe_2O_3-9,60; CaO-0,69; MgO-2,98; SO_3-1,68; Na_2O-0,32; K_2O-1,62; TiO_2-0,8 и потери при прокаливании 9,6%, видимо, определяются дегидратацией глинистых минералов, а также выгоранием органики. Проведённые дифференциально-термический, рентгенографический и петрографический анализы глинистого сланца показали, что разложение материалов глин происходит при температуре 465-550˚С. При этих же температурах на рентгенограмме отмечается частичное разложение хлорита с образованием гематита, количество которого с увеличением температуры растёт, что отмечается красной окраской полученного продукта при обжиге. На рентгенограмме имеются также линии, относящиеся к минералу монтмориллониту. Дифференциально-термическим анализом установлено удаление адсорбированной воды при 100-190°С, конституционной при 500-600°С и разрушение кристаллической решетки при температуре 800-880°С. В этом интервале температур (800–880°С) по данным петрографического анализа отмечается образование стеклофазы. При температуре 1250°С происходит полное разложение глинистых минералов и кварца с образованием муллита и гематита, а также увеличивается количество стеклофазы.

Таким образом, на основании комплексных физико-химических исследований можно отметить, что представленный глинистый сланец не может обладать гидравлической активностью после обжига без соответствующих добавок обладающих гидравлической активностью.

Поэтому в дальнейшем наши исследования были направлены на использование низкообоженных глинистых сланцев в качестве тонкомолотой минеральной добавки при разработке состава вяжущей композиции. В качестве связующего вещества в состав композиции была введена комовая известь как наиболее применяемая для этих целей.

С этой целью для оптимизации температуры обжига глинистого сланца и предварительной оценки возможности его использования была проведена серия обжигов при температуре 500ºС, 600ºС, 800ºС, 1000ºС и 1200ºС. Выдержка смеси минералов в обжиговой печи при заданной температуре была принята во всех режимах 1 час.

Далее для сравнительной оценки гидравлической активности смеси минералов, полученной при каждом из обжигов, изготовлены образцы в виде кубиков 1x1x1 см из совместно молотого низкообожжённого глинистого сланца и комовой извести. Формы с образцами выдерживались трое суток во влажной среде, а затем подвергались испытаниям на прочность при сжатии, которые проводились на ручном прессе через 3, 7, 14, 21 и 28 суток. В каждом определении разрушению подвергались шесть кубиков. Результаты испытаний представлены в таблице 1. Откуда следует, что наилучшие показатели по прочности показывают образцы из сланцев, обожжённые при температуре 600-800ºС составов 2,3.

Близкие результаты показывает добавка, обожжённая при температуре 600ºС. Обжиг при температуре 1200ºС приводит к ухудшению показателей. Таким образом, результаты проведённых испытаний позволяют сделать предварительный вывод, о возможности получения вяжущей композиции на базе низкообжигового глинистого сланца при совместном помоле с негашеной известью.

Результаты работы и их обсуждение

В данной статье приведены результаты проведённых экспериментальных исследований возможности применения низкообжиговых глинистых сланцев для изготовления вяжущих композиций и стеновых материалов на их основе, получаемых по энергосберегающей технологии [Chmielarz, 2013].

Изготовление композиционного вяжущего осуществлялось путем совместного помола низкообжигового глинистого сланца и комовой извести в шаровой мельнице. Дисперсность полученного таким образом композиционного вяжущего составляло Sуд – 2500-3000 см^2/г, что подтверждает его высокую размолоспособность. Плотность – 2,58 г/см^3 и насыпная плотность – 890 кг/м^3.

Откуда следует, что композиционное вяжущее характеризуется наименьшими показателями насыпной плотности, что соответствует более низкой плотности его компонентов – извести и сланца.

Предварительные результаты определения стандартных характеристик разработанного композиционного вяжущего в сравнении их с традиционным гидравлическим вяжущим – портландцементом, показали его высокую водопотребность, при этом нормальная густота существенно превышает показатель контрольного образца из портландцемента и отличается более длительными сроками схватывания.

С целью сокращения срока схватывания разработанного вяжущего нами были проведены дополнительные эксперименты с введением в оптимальный состав вяжущего полуводного гипса, структурообразование которого в значительной степени определено гидратацией полуводного гипса.

Результаты, полученные на образцах из бесцементного композиционного вяжущего, с введением полуводного гипса до 5% от массы вяжущего были уточнены при испытании по стандартным методикам, в том числе с определением нормальной густоты, сроков схватывания, нормальной консистенции стандартных растворов соответственно и их активности, как при нормальном твердении, так и при тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму 2+3+6+2 ч (соответственно продолжительность предварительного выдерживания, подъём температуры и остывание) при температуре изотермического прогрева 85–90ºС (методики ГОСТ 310.1-76, 310.3-76, 310.4-81).

Таблица 1 / Table 1

Результаты физико-механических испытаний образцов / Results of physical and mechanical tests of samples

Составы тонкомолотых композиций / Compositions of finely ground compositions	В/В, % W /W, %	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут. / Compressive strength, MPa, age, days.				
		3	7	14	21	28
Низкообжиговый глинистый сланец (500°C): негашеная известь – 80:20 мас., % / Low-calcination shale (500°C): quicklime – 80:20% wt	40	2,9	5,8	8,7	11,2	12,7
Низкообжиговый глинистый сланец (600°C): негашеная известь – 80:20 мас., % / Low-calcination shale (600°C): quicklime 80:20% wt	42	4,3	8,3	11,1	13,2	14,8
Низкообжиговый глинистый сланец (800°C): негашеная известь – 80:20 мас., % / Low-calcination shale (800°C): quicklime 80:20% wt	44	4,9	8,1	10,9	13,1	14,6
Низкообжиговый глинистый сланец (1000°C): негашеная известь – 80:20 мас., % / Low-calcination shale (1000°C): quicklime 80:20% wt	48	3,9	6,1	9,9	12,1	13,4
Низкообжиговый глинистый сланец (1200°C): негашеная известь – 80:20 мас., % / Low-calcination shale (1200°C): quicklime 80:20% wt	52	2,3	4,8	8,1	10,2	12,2

Результаты определения стандартных характеристик полученных вяжущих приведены в таблице 2. Они также свидетельствуют о более высокой водопотребности вяжущих, содержащих низкообожженный сланец, нормальная густота которых (28,5-33%) существенно превышает водопотребность контрольного образца из портландцемента (24,3%).

Разработанное композиционное вяжущее обладает наиболее длительными сроками схватывания, структурообразование которого на ранней стадии в значительной степени определяется гидратацией полуводного гипса, количество которого сравнительно невелико.

Прочность при сжатии образцов нормального твердения в значительной степени отличается при использовании композиционного вяжущего от прочности контрольных образцов из портландцемента. Значения прочности были почти в 4 раза ниже и не имели прочности при изгибе.

В условиях тепловлажностной обработки гидратационные процессы в композиционном вяжущем с введением полуводного гипса значительно интенсифицируются, а прочность при сжатии составляет 19,7 МПа, уступая прочности контрольных образцов не более чем на 26%.

Во всех случаях использования разработанного вяжущего, с полуводным гипсом, пропаренные образцы не имели признаков деструктивных изменений (трещин, вспучивания поверхности), что подтверждается сроками схватывания и данными об их достаточно интенсивном структурообразовании в первые часы и после затворения с водой. С целью активизации физико-химических процессов, таких как адгезионных и когезионных свойств, определяющих соответственно клеящую способ-

Таблица 2 / Table 2

Сравнительные показатели характеристик композиционного вяжущего на основе обожженного глинистого сланца (600°С) при испытании по ГОСТ 311-76…ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 310.4-81 / Comparative indicators of the characteristics of a composite binder based on burntclayshale (600°C) when tested in accordance with GOST 311-76… GOST 310.3-76, GOST 310.4-81.

Вид вяжущего / Binder type	$S_{уд}$, см²/г / S_{ud}, cm² / g	Нормальная густота, % / Normal density, %	Сроки схватывания, ч-мин. / Setting time, h-min		B/B раствора / IV solution	Расплыв конуса, см мм / Cone spread, cm mm	R, МПа (изгиб/сжатие) в воздухе после 1 сут / R, MPa (bending / compression) in air after 1 day	
			Начало/ Start	Конец/ End			Норма тверд. / Norm is firm.	ТВО / TVO
Портландцемент (контроль) / Portland cement (control)	2450	24,3	4-45	7-20	0,40	105	2,4/6,7	5,1/26,5
Композиционное вяжущее / Composite binder	4500	33,0	2-45	5-05	0,45	107	-/1,8	5,0/19,7
Портландцемент (справочные данные и нормативные требования) / Portland cement (reference data and regulations)	Не нормируется обычно 2500-3000 / Not standardized usually 2500-3000	Не нормируется обычно 22-31 / Not standardized usually 22-31	Не ранее 45 мин. (ГОСТ 10178) / Not earlier than 45 min. (GOST 10178)	Не позднее 10 час (ГОСТ 0178) / Not later than 10 hours (GOST 0178)	0,4 (ГОСТ 310.4-85) / 0.4 (GOST 310.4-85)	106-115 (ГОСТ 310.4-85) / 106-115 (GOST 310.4-85)	Не нормируется / Not standardized	

ность этой связки и прочность клеевых контактов, обеспечивающих механическую прочность композиции, а также образование соответствующих гидроалюминатов и гидросиликатов кальция из алюминатных и силикатных составляющих глинистого сланца, в состав композиционного вяжущего вводили модифицирующую добавку для определения ее влияния на основные свойства вяжущего.

В качестве модифицирующей добавки использовали нанодисперсный полисиликат натрия с силикатным модулем 6,5, представляющий переходную область составов от жидких стекол к кремнезолям и классифицирующийся как наноматериал. Структурным элементом полисиликата является кремнекислородный тетраэдр, который является основной полимерной составляющей полисиликатов. Основным отличием полисиликатов от жидких стекол (высокощелочных силикатных систем) является их полимерная форма, представляющая кремнеземные частицы размером от 4 до 5 нм. Полимерная форма составляет 60% и более от общего содержания

аблица 3 / Table 3

Составы изготовленных масс /
Compositions of the prepared masses

Компоненты / Components	Состав, мас. % / Composition, wt. %			
	1	2	3	4
Нанодисперсный полисиликат натрия, силикатным модулем – 6,5 / Nanodispersed sodium polysilicate, with silicate module – 6.5	2,0	3,0	4	5
Композиционное вяжущее / Composite binder	98	97	96	95

кремнезема, что обеспечивает высокие прочностные свойства образующихся гелевых структур. Эффективность полисиликатов в 4 раза выше эффективности жидких стекол, что позволяет использовать технологические растворы с более низкой концентрацией [Тотурбиев и др., 2014; Корнеев и др., 1996; Iler, 1982; Брыков, 2009; Пестерников и др., 1999; Тотурбиев, 1988; Шабанова и др., 2004].

Коллоидные нанодисперсные полисиликаты натрия изначально изготавливали в лабораторных условиях, согласно патенту [Пестерников и др., 1999], путем введения в 20%-ный водный раствор силиката натрия 16%-го гидрозоля диоксида кремния при их соотношении 1:1,6, перемешивания при 100°С, в течение 3,0 ч с последующей выдержкой не более 0,5 ч. Затем в отдозированное для каждого состава приведенного в таблице 3, сухое керамическое известковое (бесклинкерное) вяжущее с удельной поверхностью 3000-4000 см^2/г вводили нанодисперсный полисиликат натрия с добавлением воды (В/В=0,3-0,4 в зависимости от состава смеси) и перемешивали в лопастной лабораторной мешалке принудительного действия до получения однородной массы.

Из полученной гомогенной массы изготавливали образцы различных составов для определения основных свойств разработанного вяжущего путем послойной трамбовки.

Твердение отформованных образцов осуществлялось путем тепловлажностной обработки (ТВО) по режиму 2+3+6+2 ч (соответственно продолжительность предварительного выдерживания, подъём температуры и остывание) при температуре изотермического прогрева 85–90ºС (методики ГОСТ 310.1-76…310.3-76, 310.4-81). Результаты исследования интенсифицирующего воздействия модифицирующей добавки – нанодисперсного полисиликата натрия на свойства разработанного вяжущего приведены на рисунке 1.

Откуда следует, что существенное влияние на прочность при сжатии композиционного вяжущего оказывает процентное содержание в нем нанодисперсного полисиликата натрия. Кривые зависимости имеют при этом экстремальный характер.

По характеру левых восходящих ветвей можно сделать вывод о недостаточности нанодисперсного полисиликата натрия в вяжущем для гидратационного соединения, и создания оптимального числа клеевых контактов в нем. При 3-5% содержании нанодисперсного полисиликата натрия в вяжущем достигается максимум прочности и средней плотности. Есть также правые нисходящие ветви, которые свидетельствуют о спаде прочности, средней плотности при дальнейшем увеличении содержания нанодисперсного полисиликата натрия в композиционном вяжущем.

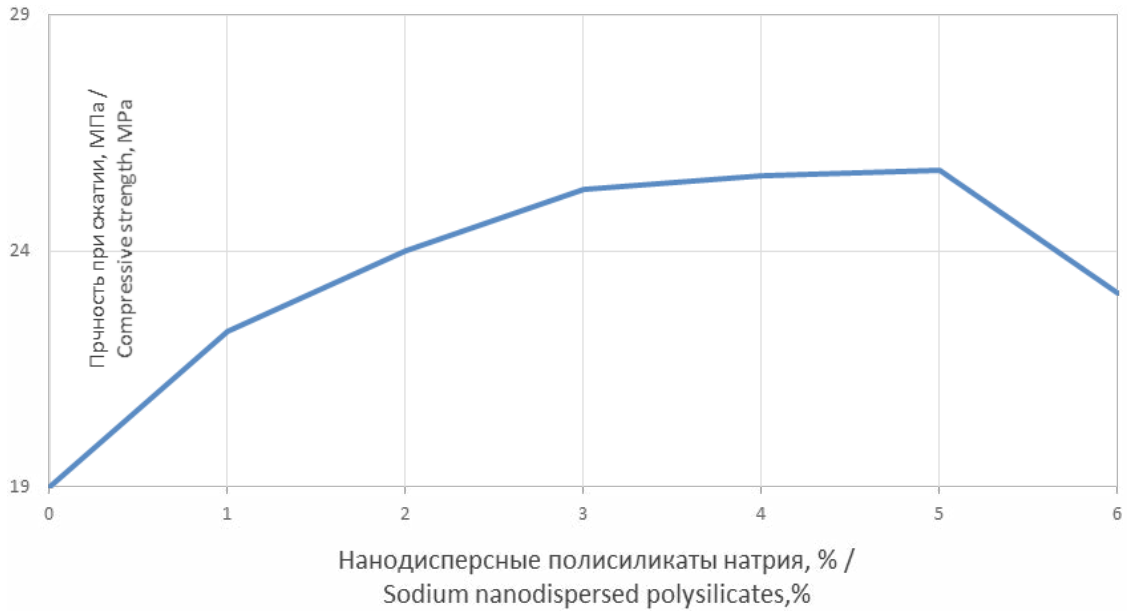


Рис. 1. График зависимости интенсифицирующего воздействия модифицирующей добавки нанодисперсного полисиликата натрия от свойства разработанного вяжущего /
Fig. 1. A graph of the dependence of the intensifying effect of a modifying additive, nanodispersed sodium polysilicate, on the properties of the developed binder.

На следующем этапе наших исследований исходя из анализа полученных результатов сравнительной оценки гидравлической активности компонентов и их соотношения, а также влияния модифицирующей добавки на основные показатели свойств разработанного композиционного вяжущего нами было сделано предположение о возможности получения керамического стенового материала с высоким содержанием наполнителя – низкообжигового глинистого сланца. Спроектированные составы керамического стенового материала на основе разработанного композиционного вяжущего и заполнителя – низкообжигового глинистого сланца приведены в таблице 4.

Здесь низкообжиговые глинистые сланцы применяются не только как тонкомолотый керамический компонент для изготовления композиционного вяжущего выполняющего роль связки, но и как крупный заполнитель фракции 1,25-3,0 мм выполняющий основу керамической массы.

Таблица 4 / Table 4

Составы композиций для стеновой керамики /
Compositions of compositions for wall ceramics.

Компоненты / Components	**Содержание компонента, % масс, в составах. / Component content, wt. %in compositions**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Композиционное вяжущее / Composite binder	4	8	18	26	35	44	53
Нанодисперсные полисиликаты натрия / Nanodispersed sodium polysilicates	1	2	3	4	5	6	7
Низкообжиговые глинистые сланцы / Low- calcination shales	95	90	80	70	60	50	40

Для испытания и оценки свойств безобжигового стенового керамического материала готовили образцы размерами 140x40x40 мм. Подготовку компонентов, изготовление образцов, их сушку или тепловлажностную обработку проводили по описанной выше технологии. Испытания сырца на прочность из разных составов композиций показали, что введение в состав керамической массы связки из композиционного вяжущего и коллоидного полисиликата натрия и заполнителя из низкообжиговых глинистых сланцев дает положительный эффект и при визуальном осмотре отсутствовали микротрещины в сырце.

Физико-технические свойства безобжигового стенового керамического материала определяли по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 530-95 и ГОСТ 8462-85. При этом для определения водопоглощения материала насыщение образцов проводили кипячением их в воде в течение 5 ч, а оценку морозостойкости по степени повреждения и по потере массы после требуемого количества циклов при объёмном замораживании образцов с использованием термокамеры «Синтез», обеспечивающей позиционное регулирование температур в диапазоне от –17 до –25°С.

Приведенные в таблице 5 результаты показывают, что разработанная нами керамическая композиция из композиционного вяжущего совместно с наполнителем – низкообжиговым глинистым сланцем может обеспечить необходимые физико-технические показатели свойств при производстве лицевых и пустотелых низкообжиговых стеновых керамических изделий путем прессования.

Таблица 5 / Table 5

Физико-технические свойства низкообжигового керамического материала / Physical and technical properties of low-fired ceramic material

Показатели свойств / Property indicators	Состав / Compound							Требования / Requirements	
	1	2	3	4	5	6	7	ГОСТ /GOST 7484-78	ГОСТ / GOST 530-95
Водопоглощение, % / Water absorption, %	16,2	15,3	13,8	12,2	15,4	16.3	-	<14	>8
Усадка, % / Contraction, %	7,2	0,45	0,25	0,1	–0,2	–0.4	–0,6	-	-
Плотность, кг/м^3 / Density, kg/m^3	1870	1840	1820	1800	1790	1770	1790	1600	1900
Прочность при сжатии, МПа, после твердение 28 сут. / Compressive strength, MPa, after 28 days hardening	5,2	9,6	12,4	22.4	24,6	23,5	16,8	>10	>10
Прочность при сжатии, МПа, после ТВО по режиму 2+3+6+2 ч / Compressive strength, MPa, after steam treatment according to the 2+3+6+2 h mode	7,2	13,7	14,5	25,3	26,2	25,6	17,3	>10	>10
Морозостойкость, циклы / Frost resistance, cycles	13	20	35	36	32	27	24	>23	>15

Свойства образцов из керамических масс с содержанием низкообжиговых глинистых сланцев в составе керамической массы 70-80% значительно лучше свойств других рассматриваемых масс и при равной плотности практически отсутствует усадка образцов. Образцы из керамических масс с содержанием низкообжиговых глинистых сланцев в составе керамической массы 70-80% в 2,5-4,5 раза прочнее и имеют марки по морозостойкости 25, 35 и 50 циклов против 23.

После тепловлажностной обработки образцы из масс этих составов имели красивый светлокрасный цвет. Кроме того, образцы характеризуются высокой прочностью и низким водопоглощением, после прессования (1,3-1,5 МПа). Перечисленные значения показателей свойств образцов из композиций с содержанием сланцев 70-80% показывают, что они являются перспективными для получения и пустотелых стеновых керамических материалов.

Выводы

Результаты проведенных нами экспериментальных исследований позволяют сделать заключение о возможности создания низкообжигового керамического материала с достаточно высокими физико-техническими свойствами из низкообожженного глинистого сланца. При совместном помоле с негашеной известью до удельной поверхности 2500-3000 см^2/г, и получении композиционного вяжущего, затем перемешивании его совместно с заполнителем – низкообжиговым глинистым сланцем и водой с введением модифицирующей добавки-нанодисперсного полисиликата натрия, и формовании путем прессования из полученной таким образом массы, изделий и последующего твердения, которое происходит как в естественных условиях (при комнатной температуре), так и при тепловлажностной обработке 80-90°С за счет взаимодействия извести с наночастицами полисиликата натрия, а также алюминатными и силикатными составляющими сланца с образованием соответственно гидроалюминатов кальция и гидросиликатов кальция.

Учитывая, что в результатах показателей свойств из глинистого сырья, обожженного при 500°С и 800°С имеется небольшой разброс и с целью уменьшения топливно-энергетических расходов при изготовлении керамических изделий экономически целесообразно изготовление керамической шихты из глинистого сланца обожженного при 600°С. Разработанная критическая технология производства керамических материалов из низкообжиговых (600ºС) глинистых сланцев является низкообжиговой, т. е. изготовление керамических изделий не предусматривает обжиг по специальному режиму, тем самым сокращается расход топлива, материальные и энергетические затраты, снижается продолжительность технологического цикла, что увеличивает производительность технологического процесса.

Предварительные технико-экономические расчеты разработанного низкообжигового керамического материала показали, что расход топливно-энергетических ресурсов сокращается в 1,8 раза, при этом увеличивается производительность технологического процесса в 2,4 раза. Себестоимость продукции снижается в 1,9 раза, а содержание оксидов железа в низкообожженном глинистом сланце улучшает эстетические качества изделий.

Результаты испытаний образцов разработанного низкообжигового керамического материала после тепловлажностной обработки показывают возможность повышения показателей свойств в разы за счет интенсификации физико-химических процессов происходящих при твердении путем автоклавной обработки. Есть не-

обходимость также в проведении дополнительных исследований путем введения различных добавок, которые производят эффект порообразования и вспучивания размягченной до оптимальной вязкости керамической массы.

Большой интерес представляет проведение дальнейших исследований влияния нанодисперсного полисиликата натрия на процессы наноструктурирования композиционного вяжущего и в целом, изготовления безобжигового керамического материала и взаимодействие наночастиц коллоидного полисиликата натрия с тонкодисперсными частицами извести и низкообжигового глинистого сланца. При этом представляется интересным исследовать процесс приобретения адгезионных свойств, определяющих клеящую способность этой связки и когезионную прочность клеевых контактов, обеспечивающих механическую прочность композиции.

Таким образом, теоретически и экспериментально обосновано новое направление в технологии производства керамических материалов, а именно безобжиговое из нерудного сырья – низкообжиговых глинистых сланцев, результаты применения которого позволяют предположить возможность получения аналогичных строительных материалов и из других видов нерудного сырья (аргиллиты, бентониты, кремнеземистые породы и т. д.), а также техногенных отходов различных отраслей промышленности. Есть также необходимость проведения дальнейших исследований в этом направлении путем введения различных добавок, которые производят эффект порообразования и вспучивания размягченной до оптимальной вязкости керамической массы.

Таким образом, новизной научных исследований является возможность получения производства керамических материалов по низкообжиговой технологии из нерудного минерального сырья – глинистых сланцев, обжиг которых осуществляется до формования изделий при низких температурах 500-600°С. При этом содержание его в составе смеси составляет до 90-95% от общей массы, что позволяет называть полученный материал керамическим.

Литература

1. Бессонов А. С. Технологии ресурсосбережения в строительстве и их применение на современном этапе. // Современные научные исследования и инновации. – № 2. – 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://web. snauka. ru/issues/2017/02/78083 (дата обращения: 02.06.2017).

2. Брыков А. С. Силикатные растворы и их применение. // Учебное пособие. – СПб: СПбГТИ (ТУ), 2009. – С. 54.

3. Булгаков С. Н. Технологические инновации в инвестиционно-строительном комплексе. – М.: Изд-во РААСН, 1998. – 547 с.

4. Воробьев А. Е., Джимиева Р. Б. Современные методы прогнозирования возможного развития технологий недропользования. // VII Международная конференция «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр», Москва, 15-19 сентября, 2008 г. – М.: Изд-во РУДН, 2008. – С. 86-88.

5. Гальперина М. К., Тарантул М. П., Петриченко С. В. Новые виды сырья для производства изделий строительной керамики. // Керамическая промышленность. Сер. 5.: Экспресс-информация. – 1988. – Вып. 3. – С. 2-8.

6. Корнеев В. И., Данилов В. В. Растворимое и жидкое стекло. – СПб.: Стройиздат, 1996. – С. 216.

7. Лопатников М. И. Минерально-сырьевая база керамической промышленности России. // Строительные материалы. – 2004. – № 2. – С. 26-28.

8. Пестерников Г. Н., Максютин А. С., Пучков С. П., Обухова В. Б. Способ получения полисиликатов натрия (варианты). // Патент России № 2124475. – 1999. – Бюл. № 1.

9. Путин В. В. Минерально-сырьевые ресурсы в стратегии развития Российской экономики. // Записки Горного института. – 1999. – Т. 144 (1). – С. 1-11.

10. Рыбьев и др. Общий курс строительных материалов: учебное пособие для строительных ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1987. – С. 478.

11. Тотурбиев Б. Д., Мамаев С. А., Тотурбиева У. Д. Инновационные технологии производства экологически чистых строительных материалов нового поколения. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 149-155.

12. Тотурбиев Б. Д., Мамаев С. А., Тотурбиев А. Б. Композиционные вяжущие вещества из промышленных отходов. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 4. – С. 140-148.

13. Шабанова Н. А., Саркисов П. Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. – М.: «Академкнига», 2004. – С. 208.

14. Шутенко Е. Е. Проблемы ресурсосбережения в современном строительном комплексе. // Современные наукоемкие технологии (приложение к журналу). – 2008. – № 2. – С. 71-73.

15. Chmielarz L., Kowalczyk A., Wojciechowska M., Boroń P., Dudek B., Michalik M. Montmorillonite intercalated with SiO2, SiO2-Al^{2}O3 or SiO2-TiO2 pillars by surfactant-directed method as catalytic supports for DeNOx process. // Journal Chemical Papers, Publisher Springer. Vienna. 2013.

16. Gendler S. G., Kovshov S. V. Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry. // Eurasian Mining. – 2016. – No. 1. – pp. 45-49.

17. Iler R. K. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica. John Wiley and Sons, Chichester 1979. XXIV, 886 p.

18. Lianyang Zhang. Production of bricks from waste materials: A review. // Construction and Building materials. – 2013. – No. 47. – pp. 643-655.

19. Muñoz Velasco P., Morales Ortíz M. P., Mendívil Giró M. A., Muñoz Velasco L. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. // Construction and Building materials. – 2014. – Vol. 63. – pp. 97-107.

20. Scholtzova E., Tunega D., Madejov J., Palkova H., Komadel P. Theoretical and experimental study of montmorillonite intercalated with tetramethyl ammonium cation. // Vibrational Spectroscopy. – 2013. – Vol. 66. – pp. 123-131.

References

1. Bessonov A. S. Resource saving technologies in construction and their application at the present stage. Modern scientific research and innovation. No. 2. 2017. URL: http://web. snauka. ru/issues/2017/02/78083 (access date: 02.06.2017). (In Russ.)

2. Brykov A. S. Silicate solutions and their application. Tutorial. Saint Petersburg, SPbGTI (TU), 2009. 54 p. (In Russ.)

3. Bulgakov S. N. Technological innovations in the investment and construction complex. Moscow. RAASN, 1998. 547 p. (In Russ.)

4. Vorobiev A. E., Dzhimieva R. B. Modern methods of forecasting the possible development of subsoil use technologies. In: Proceedings of VII International Conference Resource-reproducing, low-waste and environmental technologies of subsoil development, Moscow, 2008. RUDN, 2008. pp. 86-88. (In Russ.)

5. Galperina M. K., Tarantul M. P., Petrichenko S. B. New types of raw materials for the production of building ceramics. Ceramic industry. Ser. 5. Express information. 1988. Issue 3. pp. 2-8. (In Russ.)

6. Korneev V. I., Danilov V. V. Soluble and liquid glass. Saint Petersburg. Stroiizdat, 1996. pp. 216. (In Russ.)

7. Lopatnikov M.I. Mineral resource base of the ceramic industry in Russia. Construction Materials. 2004. No. 2. pp. 26-28. (In Russ.)

8. Pesternikov G.N., Maksyutin A.S., Puchkov S.P., Obukhova V.B. Method for producing sodium polysilicates (options). Patent of Russia N2124475. 1999. Bul. No. 1. (In Russ.)

9. Putin V.V. Mineral resources in the development strategy of the Russian economy. Notes of the Mining Institute. 1999. Vol. 144. No. 1. pp. 1-11. (In Russ.)

10. Rybiev et al. General course of building materials: a textbook for building universities. Moscow. Vysshaya shkola, 1987. 478 p. (In Russ.)

11. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbieva U.D. Innovative production technology of new generation building materials. Geology and Geophysics of Russian South. 2018. No. 4. pp. 149-155. (In Russ.)

12. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbiev A.B. Composite binders from industrial waste. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 140-148.

13. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. Fundamentals of the sol-gel technology of nanodispersed silica. Moscow. Akademkniga, 2004. 208 p. (In Russ.)

14. Shutenko E.E. Problems of resource conservation in the modern building complex. Modern high technologies (appendix). 2008. No. 2. pp. 71-73. (In Russ.)

15. Chmielarz L., Kowalczyk A., Wojciechowska M., Boroń P., Dudek B., Michalik M. Montmorillonite intercalated with SiO2, SiO2-Al^2O3 or SiO2-TiO2 pillars by surfactant-directed method as catalytic supports for DeNOx process. Journal Chemical Papers, Publisher Springer. Vienna. 2013.

16. Gendler S.G., Kovshov S.V. Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry. Eurasian Mining. 2016. No. 1. pp. 45-49.

17. Iler R.K. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica. John Wiley and Sons, Chichester 1979. XXIV, 886 p.

18. Lianyang Zhang. Production of bricks from waste materials: A review. Construction and Building materials. 2013. No. 47. pp. 643-655.

19. Muñoz Velasco P., Morales Ortíz M.P., Mendívil Giró M.A., Muñoz Velasco L. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. Construction and Building materials. 2014. Vol. 63. pp. 97-107.

20. Scholtzova E., Tunega D., Madejov J., Palkova H., Komadel P. Theoretical and experimental study of montmorillonite intercalated with tetramethyl ammonium cation. Vibrational Spectroscopy. 2013. Vol. 66. pp. 123-131.

ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 504.61+502.52
DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012

Оригинальная статья

Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных

Н. А. Яицкая, В. С. Бригида

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Россия, 354002, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 2/28, e-mail: 1z011@inbox.ru

Статья поступила: 09.01.2022, доработана: 14.02.2022, принята к публикации: 23.02.2022

Резюме: Актуальность работы. Наличие комплексного влияния нескольких антропогенных факторов горного производства, а также обусловленные ими нелинейности протекания геомеханических и аэрогазовых процессов в техногеннонарушенном массиве горных пород актуализируют широкий перечень геоэкологических проблем обеспечения устойчивого развития территорий Юга России. Наличие ряда ограничений в методологии проведения геопространственного анализа при решении трехмерных задач геоэкологии не позволяет до конца раскрыть потенциал ГИС-технологий. В связи с недостаточной степенью качества оценки применения детерминированных методов определения пространственного распределения исследуемой переменной все большее распространение получают стохастические методы. При этом использование кригинга не всегда обеспечивает более надежные модели пространственного распределения поллютантов. **Цель исследований** – выявление перспективных направлений аппроксимации пространственных данных для обеспечения устойчивого развития территорий, за счет повышения качества геоэкологического мониторинга источников загрязнения природной среды. **Методика исследований** заключалась в сравнительном анализе методов пространственной интерполяции, обобщения теоретико-методологических подходов к оценке качества получаемых зависимостей на основе критериев «goodness-of-fit», а также использовании методов локально оцененного сглаживания рассеянных данных (в сочетании с методом конечных элементов) для повышения точности полученных моделей. В процессе решения задач были определены наиболее представительные критерии соответствия моделей экспериментальным данным, а также проведен анализ подходов к установлению зависимостей переменной от нескольких предикторов. **Результатами исследования** стало формирование авторского подхода к обработке трехмерных данных, позволяющего преодолеть основной недостаток детерминированных методов интерполяции геоэкологических данных при повышении качества получаемых геопространственных моделей. Кроме того, для оценки качества аппроксимации предложено использование *Q-Q* (квантиль-квантиль) графиков. Это позволяет оценить качество моделей по отношению к теоретически достижимой линии максимального соответствия моделируемых и опытных данных. Дальнейшие исследования следует вести в направлении перехода к Q-Q плоскостям, для формирования поверхности остатков (ошибок) при подборе моделей исследуемых процессов.

Ключевые слова: геостатистика, пространственная интерполяция, трехмерные задачи геоэкологии, геопространственный анализ, экологический мониторинг, устойчивая добыча полезных ископаемых, ГИС в горном деле.

Для цитирования: Яицкая Н. А., Бригида В. С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

GEOINFORMATICS

DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012

Original paper

Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoecological problems. Spatial data interpolation

N. A. Yaitskaya, V. S. Brigida

Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabriciusa, Sochi 354002, Russian Federation, e-mail: 1z011@inbox.ru

Reseived: 09.01.2022, revised: 14.02.2022, accepted: 23.02.2022

Abstract: Relevance. The presence of the complex influence of several anthropogenic factors of mining, as well as the nonlinearity of geomechanical and air-gas processes flow in the technogenically disturbed rock mass due to them, actualizes a wide list of geoecological problems of ensuring the sustainable development of the South of Russia territories. The presence of a number of limitations in the methodology of conducting geospatial analysis when solving three-dimensional problems of geoecology does not allow to fully reveal the potential of GIS technologies. Due to the insufficient degree of quality in assessing the application of deterministic methods for determining the spatial distribution of the variable under study, stochastic methods are becoming more widespread. Moreover, the use of cricking does not always provide more reliable models of pollutants spatial distribution. **The Aim** of the study is to identify promising directions for the approximation of spatial data to ensure sustainable development of territories by improving the quality to geoecological monitoring of environmental pollution sources. **The methods** consisted in a comparative analysis of spatial interpolation methods, generalization of theoretical and methodological approaches to assessing the quality of the obtained dependencies based on the "goodness-of-fit" criteria, as well as the use of locally estimated smoothing methods of scattered data (in combination with the finite element method) to improve the accuracy of the obtained models. In the process of solving the problems, the most representative criteria for matching models with experimental data were determined, and an analysis of approaches to determining the dependencies of a variable on several predictors was carried out. **Results** of the study were the formation of the author's approach to the processing of three-dimensional data, which allows overcoming the main drawback of deterministic interpolation methods to geoecological data while improving the quality of the geospatial models obtained. In addition, the use Q-Q (quantile-quantile) graphs is proposed to assess the quality of models in relation to the theoretically achievable line of maximum correspondence between the simulated and experimental data. Further research should be conducted in the direction of transition to Q-Q planes, to form the surface of residues (errors) when selecting models of the processes under study.

Keywords: geostatistics, spatial interpolation, three-dimensional problems of geoecology, geospatial analysis, environmental monitoring, sustainable mining, GIS in mining.

For citation: Yaitskaya N. A., Brigida V. S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoecological problems. Spatial data interpolation. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

Введение

Доля горнорудной промышленности России в мировых масштабах добычи геоматериалов составляет 9,5% (от 5% для железных до 25% для калийных руд), при этом объемы отходов обогащения превышают 45 млрд т [Хайрутдинов и др., 2020]. В то же время антропогенное воздействие на биоценозы в результате техно-

генной трансформации окружающей природной среды неуклонно растет [Клюев и др., 2020; Рыльникова и др., 2017]. Только в процессе разработки нефелин-апатитовых руд Хибинского месторождения (Кольский полуостров) накопилось свыше 1,3 млрд т отвальных пород обогащения полиметаллического сырья, содержащих до 1,18 млн т редкоземельных металлов [Когарко, 2019]. После частичной отработки Садонского месторождения (Республика Северная Осетия-Алания) на территории Мизурской обогатительной фабрики сосредоточено около 2,5 млн м^3 отвальной массы с высоким содержанием Cu, Zn и Ni [Дребенштедт и др., 2018]. Переход к безотходной утилизации таких некондиционных запасов в виде инертных заполнителей для приготовления разнопрочных закладочных смесей позволяет частично смягчить экологическое влияние горного производства [Голик и др., 2015], а более совершенные технологии взрывной отбойки – снизить объемы накопления пустой породы [Комащенко и др., 2014]. В то же время качество оценок опасности и масштабов уже нанесенного вреда остается недостаточно изученным.

Реструктуризация и закрытие шахт, отрабатывающих глубокозалегающие газоносные угольные пласты, актуализировала вопросы оценки микроклиматических изменений, вызванных длительной эмиссией метана из подработанных территорий. Методические основы определения зональности ее распространения – естественной дегазации из нарушенного массива далеки от окончательного формирования [Качурин, 2021]. При этом половина от всех источников выделения метана в России приходится на добывающую промышленность, в отличие от большинства развитых стран, а общий вклад нашей страны в глобальную эмиссию достигает 7% [Saunois et al., 2016].

Усложнение математического аппарата, а также наличие специфических аспектов проведения геопространственного анализа составляют объективные сложности, которые можно преодолеть с использованием современных геоинформационных технологий [Zaalishvili et al., 2020b; Чотчаев и др., 2020]. Например, использование спутниковых снимков для получения цифровой модели рельефа в программах *QGIS* и *GRASS GIS* позволило выявить масштабы распределения загрязнения р. Левый Ул от освоения оловорудных месторождений Дальнего Востока [Усиков и др., 2019]. Выявлено, что результатом пятилетнего роста хвостохранилища Многовершинного обогатительного комбината (Хабаровский край), явилось увеличение удельного комбинаторного индекса загрязнения воды на 70% с (3,69 до 5,24).

Наибольший опыт в данном подходе сосредоточен в смежных областях знаний гидрометеорологии, океанологии и гидрологии, а также исследованиях динамической активности горных склонов южной части Большого Кавказа [Чотчаев и др., 2021]. Большая часть исследований сопряжена с использованием зарубежных программных продуктов *ArcGIS* [Матишов и др., 2018]; данных глобального реанализа *ERA Interim, NCEP/NCAR* [Лопатухин, Яицкая, 2019]; гидрологических моделей *HEC-RAS, HEC-HMS, SWAT* имеющих отечественные аналоги – *ECOMAG*, *Flood, STREAM_2D* [Moreido et al., 2021]. В то же время вопросы применения конкретного метода обработки трехмерных данных остаются наиболее сложными. Таким образом, выявление наиболее перспективных методов формирования моделей нелинейных гидрометеорологических и аэрогазовых процессов, является *фундаментальной научной задачей* для обеспечения устойчивого развития территорий за счет повышения качества геоэкологического мониторинга источников загрязнения природной среды. **Цель работы** заключается в выявлении перспективных направ-

лений аппроксимации пространственных геоэкологических данных для обеспечения устойчивого развития территорий.

Для ее достижения необходимо решение следующих задач: выявить наиболее релевантные критерии соответствия моделей («*goodness-of-fit*») экспериментальным данным; проанализировать подходы к выявлению взаимосвязей зависимой переменной от нескольких предикторов при наличии ограничений в данных временных рядов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялся комплексный метод исследования, заключавшийся в сравнительном анализе методов пространственной интерполяции, машинного обучения и фильтров, основанных на Гауссовских процессах; обобщения теоретико-методологических подходов к оценке получаемых зависимостей на соответствие экспериментальным данным; использовании методов локально оцененного сглаживания рассеянных данных (фильтр Ставицкого-Голея) в сочетании с методом конечных элементов для повышения точности полученных моделей.

Результаты работы и их обсуждение

Критерии «goodness-of-fit» для проверки достоверности моделирования. Используемые модели гидрологических и климатических процессов основаны на проверке их соответствия эмпирическим данным с учетом имеющихся ограничений. Для оценки меры согласия между моделью и опытными данными или результатами моделирования и моделью, чаще всего используют показатели тесноты корреляционной связи, используемые в регрессионном анализе. В зарубежной литературе такие критерии соответствия модели экспериментальным данным называют «*goodness-of-fit*» [Legates, McCabe, 1999]. Часто к ним относятся параметры, описывающие абсолютные (*MAE, MSE, RMSE*) [Ali et al., 2021] или относительные ошибки (*MAPE,* R^2) результатов моделирования, индексы эффективности (*E, KGE*) или соответствия (*d, AI, Wi*) [Montano et al., 2020].

Наибольшее распространение получили следующие меры оценивания. Средняя абсолютная ошибка (*MAE*) – среднеарифметическое всех абсолютных значений ошибок аппроксимации (или прогноза, если речь идет об анализе временных рядов):

$$MAE = N^{-1}\sum_{i=1}^{N}\left|P_i - O_i\right|, \qquad (1)$$

где N – количество фактических данных наблюдений;

P – значение полученное в результате моделирования;

O – наблюдаемое значение.

Альтернативным критерием точности или качества модели служит среднеквадратическая ошибка (*MSE*) и стандартная ошибка (*RMSE = MSE*):

$$MSE = N^{-1}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - O_i\right)^2, \qquad (2)$$

Некоторые исследователи [Ali et al., 2021] в качестве критерия используют коэффициент корреляции Карла Пирсона (r) или его значение, возведенное в квадрат (r^2 – частный случай коэффициента детерминации) – нормализированное измерение ковариации или в меру силы линейной связи между двумя переменными:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \overline{O}\right)\left(P_i - \overline{P}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \overline{O}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \overline{P}\right)^2}}, \quad (3)$$

где O и P – средние значения результатов опытных наблюдений и модели.

Более представительно, в качестве критерия соответствия модели использовать коэффициент детерминации (R^2) [Chicco et al., 2021] – доля дисперсии прогнозной переменной, которая может быть объяснена на основе опытных данных. Начиная с работы [Legates, McCabe, 1999] вопросы выбора и обоснования наилучшего показателя качества-соответствия при проверке гидроклиматических моделей остаются открытыми. В современных работах осуществляются попытки использования индексных критериев, на основании обобщения как абсолютных, так и относительных показателей (например «индекс адекватности» *AI*). При их использовании авторы не предоставляют результатов «анализа остатков», как это принято для проверки регрессионных моделей. Кроме того, данного рода «обобщенные» критерии не имеют математического обоснования, вводя в заблуждение простотой использования. В упрощенном виде достаточно сравнивать модели по показателям *RMSE* и R^2. Альтернативный метод – использование Квантиль-квантильных (*Q-Q*) графиков для одного или нескольких сечений исследуемой функции. В тоже время одновременное использование не менее двух (не взаимоисключающих) из вышеперечисленных критериев правомерно при относительном сравнении нескольких методов моделирования. Один из выбранных показателей доложен указывать на относительные, а другой на абсолютные ошибки.

Подходы к прогнозированию многофакторных геоэкологических процессов с использованием геопространственного анализа. Основная задача геостатистики – определение пространственного распределения исследуемой переменной. То есть по ограниченному количеству замеров концентрации метана, проведенных в некоторых точках пространства, требуется определить его значения в любых других пространственных точках – задача интерполяции. В сущности, задачу можно свести к оценке функции максимально приближенной (аппроксимация) к набору опытных точек – экспериментально определенной функции исследуемого процесса заданной в неявном виде. При этом открывается возможность сравнения нескольких параметров (например, среднемесячной температуры воздуха) для одних и тех же географических точек (геопространственный анализ) для определения взаимосвязи интенсивности метановыделения и локальных изменений климата. Наличие фактора времени, а также других объективных предикторов обуславливают усложнение рассматриваемых задач в области дополнительного анализа временных рядов данных. Основные подходы к обработке пространственных данных можно свести к трем типам: детерминированные, стохастические и использующие искусственный интеллект (машинное обучение).

К детерминированным относят методы интерполяции, предполагающие существование аналитической зависимости между данными в заданном пространстве. Основные из них реализуются на основе: взвешивания по обратному расстоянию (Шепарда) (*IDW*), наложения на основе прямоугольников (*RBB*), наложения на основе треугольников (*TBB*), глобальной полиномиальной интерполяции (*GPI)*, локальной полиномиальной интерполяции (*LPI)*, узловых базисных функций (*NBF*), радиальных базисных функций (*RBF*), конечных элементов (*FE*).

К стохастическим относятся методы, основанные на статистической интерпретации данных, когда пространственная модель является вероятностной функцией. К ним относят: модели пространственной регрессии, простой кригинг (*SK*) или регрессия Гауссовского процесса, обычный кригинг (*OK*), универсальный кригинг (*UK*), эмпирический байесовский кригинг (*EBK*), прогнозирование эмпирической байесовской кригинг-регрессии (*EBKRP*).

Модели искусственного интеллекта основываются на эволюционной оптимизации функций при помощи машинного обучения (*ML)* на основе имеющихся опытных данных: алгоритм k-ближайших соседей (*kNN)*, лес случайных решений (*RF*), искусственные нейронные сети (*ArtificialNN*), байесовские сети (*BNN*), рекуррентные нейронные сети (*LSTM, GRU*) и др.

Диагностика результирующих значений, или обоснование правильности выбора метода, типа модели, а также оптимальность ее параметров является наиболее сложным и трудозатратным процессом. В сущности, вопрос сводится к тому, насколько численные результаты модели (обуславливающие стохастическую взаимосвязь между данными в пространстве) соответствуют опытным данным. Оптимальность методики оценки качества геоэкологических моделей остается дискуссионным вопросом, тем не менее, общие подходы можно сформулировать на основе примеров из смежных областей знаний.

Применение методов трехмерной интерполяции в области гидродинамики (океанология). Например, оценку качества прогнозирования моделей динамики береговой линии производят следующим образом [Montano et al., 2020]. Для предсказания изменения береговой линии пляжа Таируа (Новая Зеландия) с 2014 по 2017 гг. на основе фактических данных камер проводился конкурс по моделированию. В конкурсе участвовали два типа моделей: 1) девять гибридных (*Hybridmodel «HM1-9*») в виде комбинации физических моделей с детерминированными, 2) семь моделей искусственного интеллекта (*Machinelearning – kNN, RF, BNN, Artificial NN* «*NeuFor*», рекуррентная нейронная сеть с долговременной и кратковременной памятью «*LSTM*», нелинейная авторегрессионная экзогенная модель «ANN-*EI1*» и «*ANN-EI2*»). Из анализа полученных результатов следует, недостатки гибридных моделей заключаются в невозможности предсказывать относительно быстрые флуктуации исследуемого показателя. Модели машинного обучения хорошо отражают экстремальные локальные отклонения или краткосрочные колебания. В тоже время они генерируют и большие абсолютные ошибки, поскольку значение береговой линии очень зависит от качества предоставленного набора данных для обучения. Это в свою очередь указывает на невозможность учитывать тенденции долгосрочных циклов, находящиеся в «слепой» зоне из-за предоставления краткосрочных данных. Кроме того, использование *Q-Q* графиков позволяет улучшить качество моделирования при перекрестной проверке. Таким образом, прогностическая способность моделей машинного обучения остается низкой. Данный факт подтверждается и относительно низкими показателями R^2 для *ML* моделей, в периоде прогноза (от 0,5 до 0,7), при высоких значениях *RMSE* в диапазоне от 4 до 6 м. Это доказывает, что отделение долгосрочных циклов, а также стохастических флуктуаций и их выделение из обобщенной линии тренда остается сложной задачей.

Опыт использования интерполяции в метеорологии. При проведении анализа пространственно-временной изменчивости климатологических данных [Lai, Dzombak, 2019; Das et al., 2017] в основном используют ГИС-приложения. Пример

сравнительной оценки большинства методов с использованием *ArcGIS* представлен при ретроспективном анализе осадков в Пакистане [Ali et al., 2021]. В данной работе детерминированные методы представлены: *IDW, RBF, LPI*. Стохастические – пятью типами (*OK, UK, EBK, SK, EBKRP*) при этом для большинства из них рассматривали семь видов полувариограмм. Анализ значений R^2, а также проекций поверхностей отклика на карту Пакистана показывает, что модели кригинга не всегда качественно превосходят классические детерминированные методы интерполяции. Кроме того в исследовании не приведено пространственное распределение стандартных ошибок для каждой из моделей, что существенно усложняет интерпретацию полученных результатов. Это вносит дополнительные неопределенности при интерпретации получаемых карт распределения осадков.

Авторский метод, применительно к вопросам шахтного метана. Геопространственный анализ в области рудничной аэрогазодинамики производят при помощи регрессионных моделей [Dzhioeva, Tekhov, 2021]. Известно, что для решения задач аппроксимации (когда функция задана в неявном виде) трехмерных функций можно применять интерполяцию, регрессию и сглаживание. К достоинствам детерминированных методов относится способность работать с рассеянными данными, которые неоднородно распределены по сетке без использования декластеризации [Демьянов, Савельева, 2010]. Существенным недостатком является сложность в оценке ошибок, когда интерполянты проходят через экспериментальные точки. В связи с этим классические методы (*IDW* или *FE*) в настоящее время используются все меньше. Преодолеть данный недостаток можно следующим образом. Вначале определяют уравнение регрессии, методом наименьших квадратов используя полиноминальные функции. После чего определяют достоверности моделирования (по выбранным критериям «*goodness-of-fit*» или путем анализа остатков). Затем к этим же данным применяют детерминированный метод интерполяции и снова определяют уравнение регрессии для того же типа модели. Разница в качестве полученной поверхности отклика позволит охарактеризовать эффективность

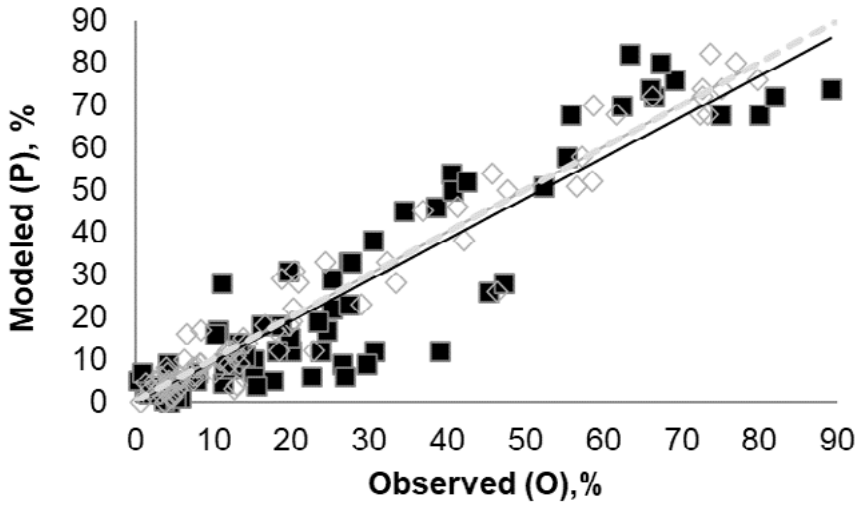


Рис. 1. «Q-Q графики» сигмовидных моделей на основе первичных данных (ромбы) и детерминированных методов интерполяции (квадраты) /
Fig. 1. "Q-Q graphs" of sigmoid models based on primary data (rhombuses) and deterministic interpolation model (squares)

используемого метода. Для проверки вышеописанного подхода использовались данные пространственного распределения метановыделения в подземные скважины из работы [Джиоева, Бригида, 2020]. В отличие от стандартного применения полиномов Чебышева для этого использовали двумерные сигмоидные полиномы 7-го порядка. Кроме того, на первом этапе для сглаживания «выбросов» применили фильтр Ставицкого-Голея [Golik et al., 2020]. На втором этапе к уже сглаженным первичным данным (15 строк по 5-6 точек) применяли метод трехмерной интерполяции конечными элементами по образцу работы [Джиоева, Бригида, 2020], после чего на выходе имелось 1200 точек (15×80). На последнем этапе методом наименьших квадратов определяли оптимальные параметры двумерного сигмовидного полинома регрессионной модели, при которых R^2 = 0,906. Коэффициент детерминации этой же модели при простом приближении к первичным данным составил R^2 = 0,954, что существенно отразилось на *Q-Q* графике рисунка 1.

Из анализа рисунка 1 следует, что линии тренда для первичных и интерполированных данных достаточно приближены к максимально теоретически достижимой корреляции, (пунктирная линия). Уравнения прямых соответствия моделей сигмовидных функций основанных на экспериментальных (*P*), с R^2 = 0,96 и сглажено-интерполированных данных (*P′*), с R^2 = 0,85 имеют вид:

$$P' = 0.96O + 0.05, \tag{4}$$

$$P = 0.99O + 0.09, \tag{5}$$

Из параметров уравнения (5), а также угла подъема серого линейного тренда (см. рис. 1) очевидно, что сигмовидная модель имеет минимальную степень откло-

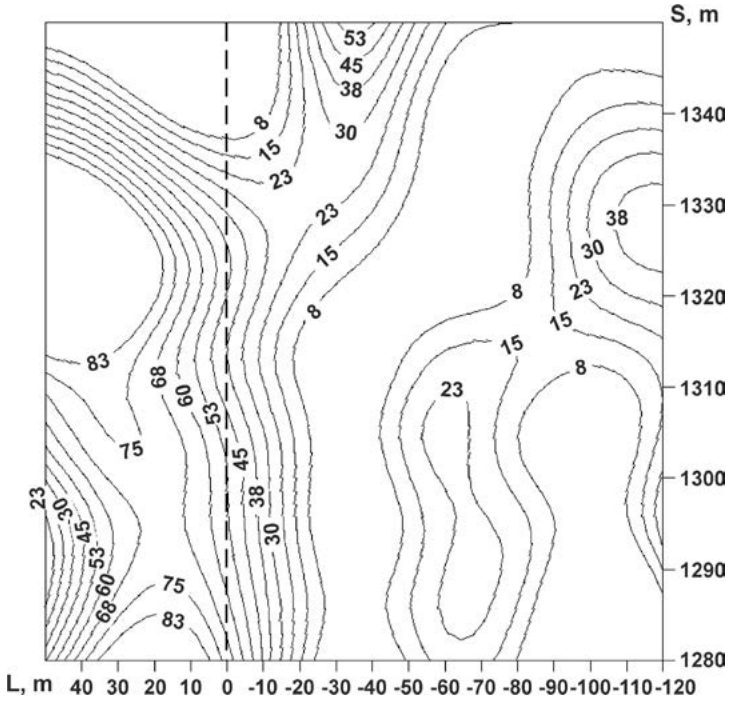


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации метана в подземных скважинах в зависимости от протяженности вентиляционной выработки (S) и расстояния до линии очистного забоя (L) /
Fig. 2. Spatial distribution of methane concentration in underground wells depending on the length of tailgate (S) and the distance to the production face (L)

нения результатов от опытных данных, и более достоверно описывает исследуемый процесс. При последующем анализе проекций поверхности отклика выяснилось, что механическое приближение полиномами генерирует большее искажение модели. Данный эффект аналогичен проблеме большей генерации ошибок при использовании ML моделей эволюции береговой линии пляжа Таурия, который описан выше. Более того, сигмовидная модель (основанная на интерполированных данных) показала максимальное соответствие результатам работы [Джиоева, Бригида, 2020], полученных на основе многочленов Чебышева (рис. 2).

Выводы

Наличие существенных ограничений в методологии проведения геопространственного анализа, при решении трехмерных геоэкологических задач обеспечения устойчивого развития территорий Юга России, обуславливает необходимость совершенствования геоинформационных технологий и их широкого внедрения в горном деле. Из проведенного анализа следует, что для оценки качества моделирования наиболее представительно использовать *Q-Q* графики.

Близкие углы наклона линейных трендов таких графиков указывают на достаточную степень приближения полученных результатов к опытным данным (см. рис. 1). В связи с этим сформированный авторский подход к обработке трехмерных данных, позволяет преодолеть основной недостаток детерминированных методов пространственной интерполяции данных (невозможность отображения распределения ошибок моделирования, когда интерполянты проходят через экспериментальные точки). Результаты исследований могут быть использованы при совершенствовании методики пространственного анализа профилей электромагнитного излучения [Iakovleva et al., 2022].

Литература

1. Голик В. И., Лукьянов В. Г., Хашева З. М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. № 5. – С. 6-14.

2. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука. 2010. – 327 с.

3. Джиоева А. К., Бригида В. С. Пространственная нелинейность динамики метановыделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий. // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 522-530. DOI: 10.31897/PMI. 2020.5.3

4. Дребенштедт К., Голик В. И., Дмитрак Ю. В. Перспективы диверсификации технологии добычи металлов в РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. № 1 (35). – С. 125-131. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131.

5. Качурин Н. М., Корчагина Т. В., Качурин А. Н., Сидоров Р. В. Оценка газообмена подработанных территорий угольных бассейнов России с атмосферой. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. № 1. – С. 290-302.

6. Когарко Л. Н. Редкоземельный потенциал апатита в месторождениях и отходах производства апатито-нефелиновых руд Хибинского массива. // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. № 16. – С. 271-275. DOI: 10.31241/FNS. 2019.16.055.

7. Клюев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283-290.

8. Комащенко В.И., Голик В.И., Белин В.А., Гапоненко А.Л. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьерах. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №9. – С. 293-304.

9. Лопатухин Л.И., Яицкая Н.А. Данные реанализа полей ветра над Каспийским морем для расчета режима ветрового волнения. // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46. №6. – С. 598-604. DOI 10.31857/S0321-0596466598-604.

10. Матишов Г.Д., Яицкая Н.А., Бердников С.В. Изменение температуры и солености вод каспийского моря в XX веке. // Океанологя. – 2018. – Т. 58. №6. – С. 864-874. DOI: 10.1134/S0030157418060114.

11. Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А., Попова Т.М. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №1. – С. 92-101.

12. Усиков В.И., Липина Л.Н., Александров А.В., Корнеева С.И. Оценка влияния отходов горного производства на окружающую среду с применением ГИС технологий. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №12. – С. 114-126. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-114-126.

13. Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – №11. – С. 30-36. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.

14. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (4). – С. 70-100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

15. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.

16. Ali G., Sajjad M., Kanwal S., Xiao T, Khalib Sh, Shoaib F., Gul H.N. Spatial-temporal characterization of rainfall in Pakistan during the past half-century (1961–2020). // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. No. 1. Article No 6935. DOI: 10.1038/s41598-021-86412-x.

17. Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. // Peer J. Computer Science. – 2021. – Article No 7: e623. DOI: 10.7717/peerj-cs. 623.

18. Das M., Hazra A., Sarkar A., Bhattacharya S., Banik P.J. M. Comparison of spatial interpolation methods for estimation of weekly rainfall in West Bengal, India. // Mausam. – 2017. – Vol. 68. No 1. – pp. 41-50.

19. Dzhioeva A.K., Tekhov A.V. Reduction of mine methane emissions for ensuring sustainable development of geotechnologies in the transition to Industry 3.0. // Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1064. Article No 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012008.

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

21. Lai Y., Dzombak D.A. Use of historical data to assess regional climate change. // Journal of Climate. – 2019. – Vol. 32. No. 14. – pp. 4299-4320. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0630.1.

22. Legates D.R., McCabe Jr., G.J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. // Water Resources Research. – 1999. – Vol. 35. No. 1. – pp. 233-241. DOI: 10.1029/1998WR900018.

23. Montano J., Coco G., Antolinez J.A. A., Beuzen T., Bryan K.R., Cagigal L., Castelle B., Davidson M.A., Goldstein E.B., Ibaceta R., Idier D., Ludka B.C., Masoud-Ansari S., Méndez F.J.,

Murray A.B., Plant N.G., Ratliff K.M., Robinet A., Rueda A., Sénéchal N., Simmons J.A., Splinter K.D., Stephens S., Townend I., Vitousek S., Vos K. Blind testing of shoreline evolution models. // Scientific Reports. – 2020. No. 10. Article No 2137. DOI: 10.1038/s41598-020-59018-y.

24. Moreido V., Gartsman B., Solomatine D.P., Suchilina Z. How well can machine learning models perform without hydrologists? Application of rational feature selection to improve hydrological forecasting. // Water (Switzerland). – 2021. – Vol. 13. No. 12. Article No 1696. DOI: 10.3390/w13121696.

25. Saunois M., Jackson R.B., Bousquet P., Poulter B., Canadell J.G. The growing role of methane in anthropogenic climate change. // Environmental Research Letters. – 2016. − Vol. 11. No. 120207. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/120207.

26. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 913. − 2020b. − pp. 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.

27. Iakovleva E., Belova M., Soares A., Rassõlkin A. On the Issues of Spatial Modeling of Non-Standard Profiles by the Example of Electromagnetic Emission Measurement Data. // Sustainability (Switzerland). − 2022. − Vol. 14 (1). – Article No 574. DOI: 10.3390/su14010574.

References

1. Golik V.I., Lukyanov V.G., Khasheva Z.M. Substantiation of the possibility and expediency of using ore dressing tailings for the manufacture of hardening mixtures. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2015. Vol. 326. No. 5. pp. 6-14. (In Russ.)

2. Demyanov V.V., Savelyeva E.A. Geostatistics: theory and practice. Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Power Engineering, Russian Academy of Sciences. Moscow. Nauka. 2010. 327 p. (In Russ.)

3. Dzhioeva A.K., Brigida V.S. Spatial Nonlinearity of Methane Release Dynamics in Underground Wells for the Sustainable Development of Geotechnologies. Notes of the Mining Institute. 2020. Vol. 245. pp. 522-530. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI. 2020.5.3

4. Drebenshtedt K., Golik V.I., Dmitrak Yu.V. The prospects of diversification of technology of extraction of metals in republic of North Osetia-Alaniya. Sustainable development of mountain territories. 2018. Vol. 10. No. 1. Issue 35. pp. 125-131. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131.

5. Kachurin N.M., Korchagina T.V., Kachurin A.N., Sidorov R.V. Estimation of gas exchange of undermined territories of Russian coal basins with the atmosphere. In: Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences. 2021. No. 1. pp. 290-302. (In Russ.)

6. Kogarko L.N. Rare-earth potential of apatite in deposits and production wastes of apatite-nepheline ores of the Khibiny massif. In: Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS. 2019. No. 16. pp. 271-275. (In Russ.) DOI: 10.31241/FNS. 2019.16.055.

7. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Maier A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of the natural and technical system. Sustainable development of mountain territories. 2020. No. 2. pp. 283-290. (In Russ.)

8. Komashchenko V.I., Golik V.I., Belin V.A., Gaponenko A.L. Improving the efficiency of explosive breaking based on new methods of initiating borehole charges in quarries. Mining information and analytical bulletin. 2014. No. 9. pp. 293-304. (In Russ.)

9. Lopatukhin L.I., Yaitskaya N.A. Reanalysis data of wind fields over the Caspian Sea to calculate the wind wave regime. Water resources. 2019. Vol. 46. No. 6. pp. 598-604. (In Russ.) DOI 10.31857/S0321-0596466598-604.

10. Matishov G.D., Yaitskaya N.A., Berdnikov S.V. Changes in the temperature and salinity of the waters of the Caspian Sea in the 20th century. Oceanology. 2018. Vol. 58. No. 6. pp. 864-874. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0030157418060114.

11. Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A., Popova T.M. Robotic geotechnologies as a way to improve the efficiency and ecologization of subsoil development. Physical and technical problems of mineral development. 2017. No. 1. pp. 92-101. (In Russ.)

12. Usikov V.I., Lipina L.N., Alexandrov A.V., Korneeva S.I. Assessment of the impact of mining waste on the environment using GIS technologies. Mining information and analytical bulletin. 2019. No. 12. pp. 114-126. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-114-126.

13. Khairutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Cementless stowing mixtures based on water-soluble man-made waste. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2020. Vol. 331. No. 11. pp. 30-36. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.

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

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

16. Ali G., Sajjad M., Kanwal S., Xiao T, Khalib Sh, Shoaib F., Gul H.N. Spatial-temporal characterization of rainfall in Pakistan during the past half-century (1961–2020). Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. Article No 6935. DOI: 10.1038/s41598-021-86412-x.

17. Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. Peer J. Computer Science. 2021. Article No. 7: e623. DOI: 10.7717/peerj-cs. 623.

18. Das M., Hazra A., Sarkar A., Bhattacharya S., Banik P.J. M. Comparison of spatial interpolation methods for estimation of weekly rainfall in West Bengal, India. Mausam. 2017. Vol. 68. No 1. pp. 41-50.

19. Dzhioeva A.K., Tekhov A.V. Reduction of mine methane emissions for ensuring sustainable development of geotechnologies in the transition to Industry 3.0. Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1064. Article No 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012008.

20. Golik V.I., DmitrakYu. V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. Vol. 5. pp. 47-54. DOI: https://doi. org/10.33271/NVNGU/2020-5/047.

21. Lai Y., Dzombak D.A. Use of historical data to assess regional climate change. Journal of Climate. 2019. Vol. 32. No. 14. pp. 4299-4320. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0630.1.

22. Legates D.R., McCabe Jr., G.J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research. 1999. Vol. 35. No. 1. pp. 233-241. DOI: 10.1029/1998WR900018.

23. Montano J., Coco G., Antolinez J.A.A., et al. Blind testing of shoreline evolution models. Scientific Reports. 2020. No. 10. Article No. 2137. DOI: 10.1038/s41598-020-59018-y.

24. Moreido V., Gartsman B., Solomatine D.P., Suchilina Z. How well can machine learning models perform without hydrologists? Application of rational feature selection to improve hydrological forecasting. Water (Switzerland). 2021. Vol. 13. No. 12. Article No 1696. DOI: 10.3390/w13121696.

25. Saunois M., Jackson R.B., Bousquet P., Poulter B., Canadell J.G. The growing role of methane in anthropogenic climate change. Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11. No. 120207. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/120207.

26. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 913. 2020b. pp. 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.

27. Iakovleva E., Belova M., Soares A., Rassõlkin A. On the Issues of Spatial Modeling of Non-Standard Profiles by the Example of Electromagnetic Emission Measurement Data. Sustainability (Switzerland). 2022. Vol. 14. No. 1. Article No 574. DOI: 10.3390/su14010574.

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: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика; 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых; 25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 25.00.35 – Геоинформатика; 25.00.36 – Геоэкология, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга Росии» 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. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

– статья (структуру и правила оформления см. ниже);

– на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;

– направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;

– экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. 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 (МВт/см^2) – прямым

(обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и υ, 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 соблюсти 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 полутоновых. 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 ВНЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail. ru

INFORMATION FOR AUTHORS

The journal "Geology and Geophysics of Russian South" publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 25.00.03 – Geotectonics and geodynamics; 25.00.10 – Geophysics, geophysical methods of mineral exploration; 25.00.11 – Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 25.00.23 – Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 25.00.35 – Geoinformatics; 25.00.36 – Geoecology and related scientific directions..

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal "Geology and Geophysics of the South of Russia" are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal "Geology and Geophysics of Russian South" publishes:

– articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

– brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);

– reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal "Geology and Geophysics of Russian South".

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service http://www. geosouth. ru or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal "Geology and Geophysics of Russian South".

The following materials should be presented:

– an article (structure and rules see below),

– a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;

– a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;

– an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames, 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 υ, e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail. ru

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 1. 2022 г. Том 12)

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 28.03.2022 г. Формат 60×84 1/8.
Дата фактического выхода 5.04.2022 г.
Усл. печ. лист 20,9. Гарнитура «Times».
Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 36.
Свободная цена.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.

Издатель:
Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра "Владикавказский научный центр Российской академии наук"
Адрес издателя и редакции:
362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а
тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056
e-mail: southgeo@mail.ru
http://geosouth.ru

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.
362000, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3