

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 4 / 2024



ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

Геофизический институт Владикавказского научного центра
Российской академии наук

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY AND
GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 14
№ 4 / 2024**

Владикавказ 2024

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
«ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ»**

Главный редактор

д. ф.-м. н., проф. **В.Б. Заалишвили**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Заместитель главного редактора

д. ф.-м. н., проф. **И.А. Керимов**, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Члены редакционной коллегии

академик РАН **В.А. Бабешко**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

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

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

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

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

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

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

член-корр. РАН **А.А. Соловьев**, Геофизический центр РАН, г. Москва

член-корр. РАН **П.Н. Шебалин**, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

Ph. D., проф. **И.А. Береснев**, Университет штата Айова, США

Ph. D., проф. **Г.П. Ганапати**, Центр по смягчению последствий стихийных бедствий и управлению, Технологический институт Веллур, Индия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

д.г.-м.н., проф. **С.Г. Парада**

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

Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

363110, РСО-Алания, Пригородный район,

с. Михайловское, ул. Вильямса, 1

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2024

Фото на обложке – Святылище "Хохы Санибайы Реком" ("Малый Реком"), гора Рекомраг, Северная Осетия (К.С. Харебов)

EDITORIAL BOARD OF «GEOLOGY AND GEOPHYSICS OF RUSSIAN SOUTH» JOURNAL

Editor in Chief

Vladislav B. Zaalishvili, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Prof., Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific
Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz

Deputy Editor in Chief

Ibragim A. Kerimov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow

Members of Editorial board

Vladimir A. Babeshko, Academician of RAS, Southern
Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don,
Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA

Ganapathy Pattukandan Ganapathy, Ph.D, Prof. Centre
for Disaster Mitigation and Management Vellore Institute of
Technology, India

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

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

Vladimir M. Makeev, Dr. Sci. (Geol.Min.), Sergeev Insti-
tute of Environmental Geoscience (IEG), RAS, Moscow

Illarion D. Muzaev Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

Executive Secretary

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

Managing Editor

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

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

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

The Journal is published since 2011.

Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

Vladikavkaz Scientific Centre of RAS

Founder address

1 Williamsa Str., Mikhailovskoe,

Prigorodny district,

RNO-Alania, 363110, Russia

Tel.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

Publisher:

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

Publisher and Editorial address:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Subscription index in the United catalog "Press of Russia" – 29119

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2024

Cover photo – Shrine "Khokhi Sanibayi Rekom" ("Maly Rekom"), Rekomrag mountain, North Ossetia (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ГИДРОГЕОЛОГИЯ	
Мохов А.В. Микроэлементы в водах действующих шахт Восточного Донбасса.....	6
ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Вольфман Ю.М., Бондарь М.Н., Колесникова Е.Я. Сейсмичность азово-черноморского сегмента зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты	16
Давыденко Д.Б., Гамбург К.Ю. Глубинное строение зоны сочленения Донецкой складчатой системы и Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным	28
Макеев В.М., Ревазов М.О., Пикулик Е.А., Фикри Е.А. Структуры альпийского орогенеза южного склона Западного сегмента Большого Кавказа в связи с обеспечением безопасности площадок инженерных сооружений	39
Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л., Гросс С.С. Структура консолидированной земной коры и сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа.....	54
ГЕОФИЗИКА	
Керимов И.А., Эльжаев А.С. Применение геофизических методов при изучении оползневых процессов	66
Никитин Д.С., Прикащикова Е.Л., Хуторской М.Д. Тепловое поле Воронежского кристаллического массива	84
Черкашин В.И., Заалишвили В.Б., Мамаев С.А., Атаев З.В., Ибаев Ж.Г., Сулейманов В.К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу	100
Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях	113
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	
Тиратурян А.Н., Акулов В.В. Энергия деформирования в слоистой среде при ударном нагружении (на примере автомобильных дорог)....	128
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Парада С.Г. Геолого-экономическая оценка золотосодержащих руд черносланцевого типа на примере Малка-Муштинского рудного узла (Кабардино-Балкарская республика)	142
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Валиев В.М., Мусаева Ф. Геологические и технико-экономические аспекты проектирования подземных хранилищ газа в пластах-коллекторах.....	152
ГЕОЭКОЛОГИЯ	
Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона.....	166
Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»).....	180
Корчагина Е.А. Долгосрочные изменения режима атмосферных осадков как фактора формирования опасностей гидрологического характера в горной зоне Республики Дагестан.....	192
Мирзоева Н.Ю., Проскурнин В.Ю., Кейта И., Диалло А.И.П., Горбунов Р.В., Коротков А.А., Горбунова Т.Ю., Вахрушев М.О., Терещенко Н.Н. Влияет ли добыча полезных ископаемых открытым способом на загрязнение речных экосистем тяжелыми металлами и природным радионуклидом Рo-210 (исследования на примере реки Фатала, Гвинея Республика)?	206
ЮБИЛЕИ	
Константин Сергеевич Харебов	218

CONTENTS

HYDROGEOLOGY	
Mokhov A.V. Microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass	6
GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS	
Volfman Yu.M., Bondar M.N., Kolesnikova E.Ya. Seismicity of the Azov-Black Sea segment of the junction zone of the East European platform and the Scythian platet	16
Davydenko D.B., Hamburg K.Y. The deep structure of the junction zone of the Donetsk folded system and the Voronezh crystalline massif according to geophysical data	28
Makeev V.M., Revazov M.O., Pikulik E.A., Fikri E.A. Alpine orogenesis structures of southern slope of the Greater Caucasus Western segment related to the ensuring safety of engineering sites	39
Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L., Gross S.S. Structure of Earth's consolidated crust and seismicity of the Greater Caucasus Central segment.....	54
GEOPHYSICS	
Kerimov I.A., Elzhaev A.S. Application of geophysical methods in the study of landslide processes	66
Nikitin D.S., Prikatshikova E.L., Khutorskoy M.D. The thermal field of the Voronezh crystal massif	84
Cherkashin V.I., Zaalishvili V.B. Mamaev S.A., Ataev Z.V., Ibaev Zh.G., Suleimanov V.K. Geocological state of the upper reaches of the Avarskoye Koisu river basin	100
Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes	113
GEOPHYSICAL METHODS	
Tiraturyan A.N., Akulov V.V. Deformation energy in a layered half-space under impact loading (on the example of highways).....	128
GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY	
Parada S.G. Geological and economic assessment of gold-bearing ores of the black shale type on the example of the Malka-Mushtinsky ore node (Kabardino-Balkarian republic)	142
GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS	
Gasumov R.A., Gasumov E.R., Veliyev V.M., Musayeva F. Geological and technical-economic issues of designing underground gas storage facilities in reservoir formations....	152
GEOECOLOGY	
Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geocological load of mountain region	166
Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site "Roshni-Chu")	180
Korchagina E.A. Long-term changes in the precipitation regime as a factor of the hydrological hazards' formation in the mountainous zone of the Dagestan Republic	192
Mirzoeva N.Yu., Proskurnin V.Yu., Keita I., Diallo A.I.P., Gorbunov R.V., Korotkov A.A., Gorbunova T.Yu., Vakhrushev M.O., Tereshchenko N.N. Does open-pit mining affect the pollution of river ecosystems with heavy metals and the natural radionuclide Po-210 (case study of the Fatale River, Republic of Guinea)?	206
JUBILEES	
Konstantin Sergeyevich Kharebov	218

УДК 622.5:543.3

DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

Оригинальная статья

Микроэлементы в водах действующих шахт Восточного Донбасса

А.В. Мохов 

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: mochov@ssc-ras.ru, mokhov_av@mail.ru

Статья поступила: 18.10.2024, доработана: 02.12.2024, принята к публикации: 04.12.2024

Резюме: Статья посвящена выявлению распространения и причин накопления в водах действующих угольных шахт Восточного Донбасса микроэлементов. **Актуальность исследований** определяется необходимостью ослабления вредного влияния химического состава шахтных вод на природные воды и экологическую в целом обстановку региона. **Цель исследований.** Совершенствование научных основ прогнозирования химического состава вод угольных шахт. **Методы исследований.** Данные о химическом составе шахтных вод Восточного Донбасса, условия его формирования исследованы известными статистическими методами. **Результаты исследований.** Шахтные воды региона отличаются от подземных и поверхностных вод повышенным содержанием ряда макро- и микрокомпонентов химического состава. Распределение концентраций микроэлементов сильно дифференцировано в пределах региона. Выявлено распределение 17 микроэлементов (*Ag, Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr*) в регионе в целом и его геолого-промышленных районах. Повсеместно распространены в относительно больших концентрациях *Mo, Sr, Cd, Mn*. Выявлены статистические связи содержаний *Sr, Zn, Mn* и макрокомпонентов состава воды, их связи с содержанием серы общей в углях, корреляция содержаний *Sr, Zn, Mn*. Характер и степень корреляции указывают на формирование макрокомпонентов и микроэлементов состава в рамках единого макропроцесса – выщелачивания и растворения водовмещающих пород. Источником микроэлементов является вещество угольных пластов и их боковые породы, в частности, *Sr* – карбонатный материал, *Mn* – материал окружавших Донбасс палеообластей сноса, *Zn* – связанный с посткаменноугольным полиметаллическим оруденением. Триггером накопления микроэлементов служит окисление сульфидов, прежде всего, пирита как фактора запуска серии параллельных и цепи последовательных физико-химических реакций. В ходе них происходит как поступление в воду и накопление отдельных химических компонентов, так и уход их из воды. Различие микроэлементного состава вод объясняется разнообразием преимущественно минералогических факторов: присутствием сульфидов и карбонатов, содержанием углекислого и углеводородных газов в горном массиве.

Ключевые слова: шахтные воды, химический состав, микроэлементы, распространение, генезис, Восточный Донбасс.

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

Для цитирования: Мохов А.В. Микроэлементы в водах действующих шахт Восточного Донбасса. Геология и геофизика Юга России. 2024. 14(4): 6-15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

Original paper

Microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass

A.V. Mokhov 

Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: mochov@ssc-ras.ru, mokhov_av@mail.ru

Received: 18.10.2024, revised: 02.12.2024, accepted: 04.12.2024

Abstract: The article is devoted to identifying the distribution and causes of microelements accumulation in the waters of operating coal mines in the Eastern Donbass. **Relevance.** The relevance of the research is determined by the need to reduce the harmful effects of the chemical composition of mine waters on natural waters and the overall environmental situation in the region. **Aim.** Improving the scientific basis for predicting the chemical composition of coal mine waters. **Research methods.** Data on the chemical composition of mine waters in the Eastern Donbass and the conditions of its formation were studied using well-known methods. **Research results.** Mine waters in the region differ from groundwater and surface waters by their increased content of a number of macro- and microcomponents of chemical composition. The distribution of trace element concentrations is highly differentiated within the region. The distribution of 17 microelements (Ag, Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr) in the region as a whole and its geological and industrial areas was revealed. Mo, Sr, Cd, and Mn are widely distributed in relatively high concentrations. Statistical relationships between the content of Sr, Zn, Mn and macrocomponents of water composition, their relationships with the content of total sulfur in coals, and the correlation of the contents of Sr, Zn, Mn were revealed. The nature and degree of correlation indicate the formation of macrocomponents and microelements of the composition within the framework of a single macroprocess – leaching and dissolution of water-bearing rocks. The source of microelements is the substance of coal seams and their wall rocks, in particular, Sr is a carbonate material, Mn is a material of paleo-demolition areas surrounding Donbass, Zn is associated with post-Carboniferous polymetallic mineralization. The trigger for the microelements accumulation is the oxidation of sulfides, primarily pyrite, as a factor in launching a series of parallel and a chain of sequential physicochemical reactions. During these processes, individual chemical components enter the water and accumulate, as well as leave the water. The difference in the microelement composition of the waters is explained by the diversity of predominantly mineralogical factors: the presence of sulphides and carbonates, the content of carbon dioxide and hydrocarbon gases in the mountain range.

Keywords: mine waters, chemical composition, microelements, distribution, genesis, Eastern Donbass.

Acknowledgements: *The work was carried out within the framework of the implementation of the state assignment of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, state registration No. 122020100345-8.*

For citation: Mokhov A.V. Microelements in the waters of operating mines in the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 6-15. DOI: 10.46698/VNC.2024.36.66.002

Введение

Разработка угольных залежей сопровождается формированием значительных объемов попутных вод. Их потоки и скопления рассматриваются как потенциальный крупный ресурс для улучшения обеспеченности техническими водами терри-

торий, в число которых входят также шахтерские районы Восточного Донбасса. Использование шахтных вод открывает возможность ослабления техногенного пресса на окружающую среду.

Сведения о химическом составе и минерализации шахтных вод, определяющих во многом перспективы их использования в хозяйственных целях, представляют также интерес для решения геологических, геоэкологических и иных задач. Выявление процессов формирования состава вод создает возможности для прогнозирования и регулирования их характеристик.

Механизмы насыщения вод теми или иными компонентами являются предметом обширных исследований [Докукин, Докукина, 1950; Назарова, 1968; Кравцов, 1968; Гавришин, 2020; Rybnikova, Rybnikov, 2020; Парада и др., 2022 (464 с.); Мохов, 2023]. Потенциально и фактически они являются многофакторными.

Формирование химического типа подземных, включая шахтные, вод традиционно связывают с составом водовмещающих пород, растворимостью, подверженностью выщелачиванию твердых компонентов горного массива, обменными процессами и проч. [Посохов, 1975].

Значительное влияние имеет газоносность недр [Кравцов, 1968; Мохов, 2023], деятельность микроорганизмов [Кизильштейн, 2002], состав минеральной компоненты угольных пластов [Докукин, Докукина, 1950]. В многочисленных публикациях в России и за рубежом готовится база для решения ряда вопросов формирования химического состава шахтных вод с учетом последнего фактора с акцентом на геоэкологические последствия отведения (стока) шахтных вод [Kursun, Terzi, 2018; Finkelman et al., 2018; Han et al., 2019; Dai et al., 2019; Rybnikova, Rybnikov, 2020; Cao et al., 2020; 2023; Sun et al., 2020; Zhu et al., 2024].

Предлагаются различные схемы формирования компонентного состава воды региона, однако этот вопрос остается недостаточно исследованным в отношении макрокомпонентов и, особенно, микроэлементов. Определенность имеется с генезисом сульфат-ионов и железа – окисление сульфидов горного массива.

Настоящая публикация посвящена исследованию микроэлементного состава вод шахт Восточного Донбасса на пике угледобычи (начало-середина 1980-х гг.) для геолого-промышленных районов: Каменско-Гундоровский (КГГПР), Гуково-Зверевский (ГЗГПР), Шахтинско-Несветаевский (с выделением его Шахтинской (ШГПР) и Новошахтинской (НГПР) частей).

К началу данного этапа углеразработок обнаружено присутствие в шахтных водах Донбасса не менее 30 микроэлементов [Горшков, 1981]. Обобщение данных о микроэлементном составе шахтных (и подземных) вод региона к настоящему времени отсутствует.

Материал и методы исследований

Использованы результаты 850 анализов химического состава шахтных вод 43 угольных шахт из отчетов и публикаций института ВНИИОСуголь и других специализированных организаций и материалы автора. Использованы методы корреляционного анализа и другие способы обработки информации.

Результаты исследований и их обсуждение

Шахтные воды региона образуются материнскими подземными, шахтными, поверхностными и техническими водами.

Обобщение результатов анализов проб шахтных вод на 17 микроэлементов состава (*Ag, Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr*), отобранных преимущественно в первой половине 1980-х гг., показало в целом регулярное наличие большинства из них в водах обследованных шахт.

Содержание элементов варьировалось в следующих диапазонах (от-до, здесь и далее в мг/дм³): *Ag* (0-0,01), *Pb* (0-0,030), *Cd* (0-0,045), *Ni* (0-0,274), *Co* (0-0,200), *Sr* (0,40-12,10), *Be* (0-свыше 0,016), *F* (0,04-1,29), *Mo* (0-0,070), *V* (0-0,018), *Bi* (0-0,007), *Ba* (0-0,546), *Mn* (до 0,020-13,800), *Zn* (0,01-4,50), *Ti* (0-0,350), *Cu* (0-свыше 0,2), *Cr* (до 0,01-0,182).

Повышенными содержаниями отдельных микроэлементов выделяются воды шахт следующих районов (в скобках – максимум содержания микроэлемента): *Pb* – ГЗГПР (0,03), КГГПР (0,021); *Cd* – НГПР (0,045), ШГПР (0,022); *Ni* – НГПР (свыше 0,274), ГЗГПР (0,227); *Sr* – ГЗГПР (10,1), НГПР (12,10), ШГПР (11,00); *Be* и *Zn* – ГЗГПР (свыше 0,016 и 8,10); *Mn* – ГЗГПР (13,80); *Ti* – ШГПР (0,350); *Cu* и *Cr* – НГПР (0,102 и 0,182).

Величины коэффициентов парной корреляции массовых содержаний *Sr*, гидрокарбонат-ионов и сульфат-ионов в рассматриваемой части региона составляли 0,38 (диапазон – от -0,50 в КГГПР до 0,53 в ШГПР) и -0,18 (диапазон – от -0,21 в ШГПР до 0,83 в КГГПР).

Коэффициент корреляции содержаний *Zn* и сульфат-ионов составляет 0,25 (колеблется от 0,08 в ШГПР до 0,54 в НГПР), *Zn* и гидрокарбонат-ионов – -0,04 (от -0,62 в КГГПР до 0,09 в ГЗГПР), *Mn* с ними: 0,60 (от -0,21 в КГГПР до 0,81 в НГПР) и -0,18 (от -0,14 НГПР до 0,34 в КГГПР).

Во всех районах прослеживается сильная обратная зависимость содержаний сульфат-ионов и гидрокарбонат-ионов: в ШГПР (-0,76), НГПР (-0,61), КГГПР (-0,60).

Корреляция содержаний кальция и *Sr*, магния и *Sr* измеряется коэффициентами 0,25 (от -0,07 в КГГПР до 0,49 в ГЗГПР) и 0,26 (от -0,07 в НГПР до 0,91 в КГГПР).

Как видно из приведенных данных, оценки связей для отдельных геолого-промышленных районов отклоняются от усредненных.

Довольно существенны значения коэффициентов корреляции между содержанием *Sr* и сульфат-ионов в ШГПР (0,53) и КГГПР (-0,50), *Sr* и гидрокарбонат-ионов в КГГПР (0,83), *Sr* и магния в КГГПР (0,91) и ШГПР (0,42), *Sr* и кальция в ГЗГПР (0,49).

Содержания *Zn* и сульфат-ионов имеют заметную корреляцию в НГПР (0,54), *Zn* и гидрокарбонат-ионов – в КГГПР (-0,62) и НГПР (-0,58).

Связь *Mn* и гидрокарбонат-ионов слаба повсеместно, *Mn* и сульфат-ионов высока в НГПР (0,81), заметна в ШГПР (0,48) и ГЗГПР (0,43). Связь с магнием существенна только в КГГПР (0,65), с кальцием – в НГПР (0,59).

Корреляция содержаний *Mn* и *Sr*, как правило, высока (в КГГПР 0,87, ГЗГПР 0,76) и заметна в НГПР (0,60); *Mn* и *Zn* – высока только в КГГПР (-0,72); *Zn* и *Sr* – заметна только в КГГПР (-0,42).

В КГГПР корреляция содержания сульфат-ионов заметно отличается и равна со *Sr* -0,50, с *Zn* 0,25, *Mn* -0,21.

Степень корреляции микроэлементов с серой общей углей ($S_t^d, \%$) характеризуется, как правило, сильно отличающимися, часто, низкими или противоположной направленности значениями: ГЗГПР (*Sr* -0,16; *Zn* 0,1; *Mn* 0,01), ШГПР (*Sr* 0,17;

Zn 0,84; *Mn* 0,14), НГПР (*Sr* -0,15; *Zn* 0,71; *Mn* 0,43), КГПР (*Sr* -0,31; *Zn* 0, 67; *Mn* 0,02).

Эти расчеты указывают на широту диапазона силы связей (могут быть близки к функциональной зависимости), часто отсутствие или слабость связи для большинства пар компонентов в регионе в целом и отдельных районах.

Районы (их части) ГЗПР, НГПР и ШПР, выделяющиеся формированием потоков кислых (анализы проб из водосборников и выпусков на поверхности) высокоагрессивных шахтных вод, характеризуются повышенным содержанием многих микроэлементов, включая *Sr*, *Zn* и *Mn*. Величина коэффициента парной корреляции содержания сульфат-ионов с серой составляет в: ГЗПР 0,64, ШПР 0,27, НГПР 0,59.

Совпадение связей для отдельных макрокомпонентов и микроэлементов дает основание заключить о насыщении ими вод в большинстве ситуаций в рамках общего макропроцесса в ходе валового растворения кислой средой и выноса содержащих их пород.

Эти данные указывают на исключительное значение в формировании состава шахтных вод окисления сульфидов недр.

Потенциально близкая к функциональной связь содержаний сульфат-ионов и ряда компонентов состава воды с серой общей углей преобразуется (ослабляется) разнонаправленными химическими процессами. Аномально низкое значение коэффициента парной корреляции содержания сульфат-ионов с серой в КГПР (0,03) является результатом весьма сильного проявления вторичных процессов вывода этих ионов из раствора. Отклонения от функциональности говорят о неоднородности формирования химического состава воды.

Потенциальными источниками микрокомпонентов являются материнские воды, горные породы, газы недр и шахтной атмосферы, техногенные потоки воды, конструкционные материалы.

По сравнению с природными подземными водами угленосных каменноугольных отложений объекты на поверхности воды шахт имеют существенно бóльшую минерализацию и повышенное содержание многих компонентов [Гидрогеология ..., 1971]. Они регулярно превосходят по концентрации ряда микроэлементов значения ПДК для естественного фона.

Превышение ПДК для наиболее распространенных природных вод потребительского и экологического эталона (согласно «Предельно допустимые концентрации (ПДК) в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы.», 2003) шахтными водами на протяжении рассматриваемого промежутка времени установлено в рассматриваемой выборке для химических элементов (в скобках: диапазон изменчивости содержаний в рассматриваемой части региона и величина ПДК, мг/дм³): *Pb* (0-0,030 и 0,01), *Cd* (0-0,04 и 0,001), *Ni* (0-0,274 и 0,02), *Co* (0-0,20 и 0,1), *Sr* (0,40-12,10 и 7,0), *Be* (0-свыше 0,016 и 0,0002), *F* (0,04-1,29 и 1,2), *Mn* (до 0,020-13,80 и 0,1), *Zn* (0,01-4,50 и 1,0), *Ti* (0-0,350 и 0,1), *Cr* (до 0,01-0,182 и 0,05) и имеет широкий размах. Превышения ПДК для *F*, *Zn*, *Cr* единичны, для остальных элементов не обнаружены.

Таким образом, особенности состава материнских подземных вод не являются главной причиной появления в шахтных водах высоких содержаний рассматриваемых микроэлементов. Напротив, влияние действующих шахт служит основным генератором появления многих компонентов в их избыточных (по отношению к фоновым) содержаниях в подземных водах.

Рассматриваемые микрокомпоненты находятся в виде акцессорных минералов и рассеянных примесей в угленосной толще.

Эти ингредиенты появились здесь в ходе ее накопления и последующей трансформации. Формирование толщи (песчаники кварцевые, реже аркозовые, алевролиты, аргиллиты в приблизительно равных пропорциях, известняки, угли) происходило в результате доставки разнообразного по вещественному составу материала с юга и севера [Гамов и др., 2016]. Известны небольшие интрузии посткаменноугольных магматических пород различного состава и проявления руд преимущественно полиметаллов [Парада и др., 2022 (464 с.)]. Среди углевмещающих пород высоким содержанием многих элементов (*V, Mn, Ni, Cu, Cd, Cr, Pb* и других) выделяются компоненты глинистого состава [Кизильштейн, 2002].

Угольная масса содержит ряд перечисленных и других элементов и является их концентратором. Концентрирование зависит от исходного биохимического состава, характера и результатов его преобразования. Возможна вторичная минерализация угольных пластов [Кизильштейн, 2002].

Отметим характерное присутствие часто в высоких концентрациях десятков микроэлементов в угольных пластах различных регионов мира, что показано в приведенных выше литературных источниках, включая публикации зарубежных исследователей [Finkelman et al., 2018 и др.].

Антрациты Восточного Донбасса могут содержать заметное количество (в г/т) *Ti* (около 246), *Ba* (76), *Mn* (80), *Zn* (7), *V* (6), *Ag* (8), *Cu* (5), *Ni* (4), *Pb* (2), *Mo* (0,2), *Be* (0,15). В составе углей региона, сжигаемых на Новочеркасской ГРЭС, средняя концентрация микроэлементов может быть еще более высокой. Выделяются в данном отношении *Mn* (129), *Ni* (50,4), *Cu* (32,4), *V* (23,9), в меньшей степени *Co* (14,9), *Cr* (14,6), *Be* (2,5), *Cd* (0,8) [Гамов, Левченко, 2009].

Материал угольных пластов в естественном залегании, как правило, весьма сухой, является благоприятной для консервации многих элементов средой после прекращения элизионного процесса. В ходе литогенеза происходит замещение свободной и связанной воды газами, потоки которых осуществляют непрерывный вынос отсюда различных веществ. Важным для раскрытия миграции металлов и минерализации может считаться присутствие самородных элементов, например, висмута, микроскопически установленное [Гамов и др., 2016] наличие которого указывает на сохранность и пассивность этого (и ряда других) металла в сухом угле на протяжении геологического времени.

Высокие концентрация пирита и марказита в угольной массе, насыщенность железом сульфидного происхождения шахтных вод, особенности движения воды в горных выработках дают основание для вывода о том, что основное количество минеральных веществ извлекается из остатков угольной массы разрабатываемого пласта, пород ложа и сечения водного потока. Эти контактирующие с водой среды являются также основным поставщиком микроэлементов, выводимых параллельно из массива агрессивными водами в окислительной среде газовой атмосферы выработок шахты.

Значительные вариации содержаний, силы и характера связей компонентов между районами служат признаком возможности реализации различных механизмов метаморфизации воды.

Общим для региона является запуск окислением сульфидов серии параллельных и цепей последовательного преобразования состава материнской и шахтной

вод первичными продуктами окисления (серная кислота, ионы двухвалентного железа) и новообразованными ингредиентами [Мохов, 2023].

Большое влияние на преобразование состава воды оказывает реакция Гильгарда [Мохов, 2023], обеспечивающая приток сюда гидрокарбонатов, что влияет на состав в целом и создает, с одной стороны, благоприятные условия для накопления микроэлементов и геохимические барьеры для них, с другой. Вероятны антагонистические взаимоотношения гидрокарбонат-ионов с *Mn*, вытеснение ими из раствора сульфат-ионов и кальция, что особенно развито в КГГПР и НГПР.

Высокое содержание *Sr* в кислых шахтных водах (в регионе 2,0-12,10 г/дм³) всех исследованных районов кроме КГГПР, наличие его устойчивой положительной корреляции с содержанием кальция, магния, сульфат- и гидрокарбонат-ионов указывает на источник поступления в воду данного элемента, как и ряда сопутствующих микро- и макрокомпонентов – карбонатный материал массива (известняки, цемент пород, конкреции).

Повышенные содержания *Zn* в НГПР и ШГПР вероятно сопряжены с известной здесь, а в ГЗГПР также потенциальной полиметаллической минерализацией в связи с посткаменноугольной магматической деятельностью.

Накопление *Mn* связано, вероятно, с выщелачиванием материала, доставленного палеореками из окружающих регион областей сноса, в частности, докембрийского возраста на стадии формирования здесь угленосной толщи.

Выводы

Обобщение результатов химических анализов шахтных вод действовавших в начале–середине 1980-х гг. шахт Восточного Донбасса показало широкое распространение *Pb, Cd, Ni, Co, Sr, Be, F, Mo, V, Bi, Ba, Mn, Zn, Ti, Cu, Cr*.

Содержание этих микроэлементов распределено мозаично и варьируется здесь от десятитысячных долей до нескольких миллиграммов в литре воды. Повсеместно распространены в относительно больших концентрациях *Mo, Sr, Cd, Mn*. Повышенным содержанием и регулярным присутствием относительно других микроэлементов района выделяются: *Pb* в ГЗГПР, КГГПР, *Cd* – НГПР и ШГПР, *Ni* – НГПР и ГЗГПР, *Be* и *Zn* – ГЗГПР, *Mn* – ГЗГПР и НГПР, *Cu* и *Cr* – НГПР.

Обнаружена корреляция содержаний микроэлементов между собой и с макрокомпонентами состава шахтных вод.

Формирование микроэлементного и макрокомпонентного состава шахтных вод из подземных материнских происходит в рамках единого процесса выщелачивания и растворения пород.

Главным источником микроэлементов является в силу седиментационно-литологических и горно-геомеханических причин вещество разрабатываемых угольных пластов. Накопление, разубоживание и преобразование формы нахождения микроэлементов тяготеет ко времени становления и активного функционирования элизинной водонапорной системы угленосного массива.

Общим триггером накопления микроэлементов служит окисление сульфидов, прежде всего, пирита как сильнейшего фактора, запускающего серию параллельных и цепи последовательных физико-химических реакций. Различие микроэлементного состава вод объясняется преимущественно разнообразием минералогических факторов, в частности, присутствием сульфидов и карбонатов, углекислого и углеводородных газов в горном массиве.

Источником поступления *Sr* в повышенном количестве является карбонатное вещество в ходе его растворения кислыми водами. Повышенные локальные содержания *Zn* на западе региона связаны с распространенной здесь полиметаллической минерализацией в связи с посткаменноугольной магматической деятельностью. Накопление *Mn* связывается с его присутствием в материале, поступавшем из областей денудации на стадии формирования угленосной толщи. Эти выводы представляют интерес для поисков различных руд в регионе.

Литература

1. Гавришин А.И. Шахтные воды и управление 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.
2. Гамов М.И., Левченко С.В. Металлоносность углей Восточного Донбасса. // Материалы научно-практической конференции «Состояние минерально-сырьевой базы Юга России и перспективы её развития». Ростов-на-Дону: НОК, 2009. – С. 121–124.
3. Гамов М.И., Левченко С.В., Рылов В.Г., Рыбин И.В., Труфанов А.В. Закономерности формирования и перспективы комплексного использования металлоносных углей Восточного Донбасса. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. №8. – С. 1477–1487. DOI: 10.15372/GiG20160804.
4. Гидрогеология СССР. Т. VI. Донбасс. М.: Недра, 1971. – 480 с.
5. Горшков В.А. Очистка и использование сточных вод предприятий угольной промышленности. М.: Недра, 1981. – 269 с.
6. Докукин А.В., Докукина Л.С. Возникновение кислотных рудничных вод и борьба с ними. М.-Л.: Углетехиздат, 1950. – 332 с.
7. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2002. – 296 с.
8. Кравцов А.И. Геологические условия газоносности угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1968. – 330 с.
9. Мохов А.В. Минерагенический аспект накопления сульфат- и гидрокарбонат-ионов в шахтных водах (на примере Восточного Донбасса). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №4. – С. 188–197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015.
10. Назарова Л.Н. Шахтные воды восточной части Донбасса и некоторые вопросы происхождения их химического состава. // Гидрохимические материалы. – 1968. – Т. 47. – С. 99–109.
11. Парада С.Г., Давыденко Д.Б., Мохов А.В., Рыбин И.В., Трощенко В.В., Гамбург К.Ю. Металлогенический анализ Донбасса на основе современных геофизических данных. // Труды Южного научного центра Российской академии наук. – 2022. – С. 78–93.
12. Посохов Е.В. Общая гидрохимия. Л.: Недра, 1975. – 208 с.
13. Cao Q., Yang L., Qian Ya., Chen S. Dissolution of harmful trace elements from coal and the environmental risk to mine water utilization. // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Vol. 30. Issue 3. – pp. 7786–7800. DOI: 10.1007/s11356-022-22530-x.
14. Cao Q., Yang L., Ren W. et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coalfields: an application of WebGIS technology. // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 755. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.
15. Dai S., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R. et al. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review. // International Journal of Coal Geology. – 2019. – Vol. 185. Issue 1. DOI:10.1016/j.coal.2019.
16. Finkelman R.B., Plamer C.A., Wang P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. // International Journal of Coal Geology. – 2018. – Vol. 185. – pp. 138–160. DOI: 10.1016/j.coal.2017.09.005.

17. Han Z., Zhang F., Yao H. et al. Change of regional water chemistry driven by group coal mining in Changzhi basin, Shanxi, China. // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199809001.
18. Kursun I., Terzi M. Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review. // *Journal of Mining & Environment*. – 2018. – Vol. 9. No. 3. – pp. 641–655. DOI: 10.22044/jme.2018.6855.1518.
19. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia). // *Mine Water and the Environment*. – 2020. – Vol. 39. – pp. 464–472. DOI: 10.1007/s10230-020-00691-w.
20. Sun Y., Xiao K., Wang X. et al. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 28. Issue 15. – pp. 18604–18615. DOI: 10.1007/s11356-020-11055-w.
21. Zhu Y., Zheng L., Chen X., Chen Y. Speciation characteristics and contamination degree of trace elements in coal gangue hill of a mining area in Huainan Coalfield, China. // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2024. – Vol. 33. No. 2. – pp. 1981–1989. DOI: 10.15244/pjoes/174397.

References

1. Gavrishin A.I. Mine waters and groundwater quality management in 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.)
2. Gamov M.I., Levchenko S.V. Metal content of coals of the Eastern Donbass. In: *Proceedings State of the mineral resource base of the South of Russia and prospects for its development*. Rostov-on-Don. NOK. 2009. pp. 121–124. (In Russ.)
3. Gamov M.I., Levchenko S.V., Rylov V.G., Rybin I.V., Trufanov A.V. Metal-containing coals of the East Donetsk basin: regularities of formation and integrated-use prospects. *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No. 8. pp. 1477–1487. DOI: 10.15372/GiG20160804. (In Russ.)
4. *Hydrogeology of the USSR. Vol. VI. Donbass*. Moscow. Nedra. 1971. 480 p. (In Russ.)
5. Gorshkov V.A. Purification and use of wastewater from coal industry enterprises. Moscow. Nedra. 1981. 269 p. (In Russ.)
6. Dokukin A.V., Dokukina L.S. The occurrence of acidic mine waters and their control. Moscow. Leningrad. Ugletekhizdat. 1950. 332 p. (In Russ.)
7. Kizilshtein L.Ya. Ecogeochemistry of impurity elements in coals. Rostov-on-Don. SKNC VSh. 2002. 296 p. (In Russ.)
8. Kravtsov A.I. Geological conditions of gas content of coal, ore and non-metallic mineral deposits. Moscow. Nedra. 1968. 330 p. (In Russ.)
9. Mokhov A.V. Mineragenic aspect of the accumulation of sulfate and hydrocarbonate ions in mine waters (on the example of Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 188–197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015. (In Russ.)
10. Nazarova L.N. Mine waters of the eastern part of Donbass and some questions of the origin of their chemical composition. *Hydrochemical materials*. 1968. Vol. 47. pp. 99–109. (In Russ.)
11. Parada S.G., Davydenko D.B., Mokhov A.V., Rybin I.V., Troshchenko V.V., Hamburg K.Yu. Metallogenic analysis of Donbass based on modern geophysical data. In: *Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022. pp. 78–93. (In Russ.)
12. Posokhov E.V. General hydrochemistry. Leningrad. Nedra. 1975. 208 p. (In Russ.)
13. Cao Q., Yang L., Ren W. et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coalfields: an application of WebGIS technology. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 755. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.
14. Cao Q., Yang L., Qian Ya., Chen S. Dissolution of harmful trace elements from coal and the environmental risk to mine water utilization. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Issue 3. pp. 7786–7800. DOI: 10.1007/s11356-022-22530-x.

15. Dai S., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R. et al. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review. *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 185. Issue 1. DOI: 10.1016/j.coal.2019.
16. Finkelman R.B., Plamer C.A, Wang P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. *International Journal of Coal Geology*. 2018. Vol. 185. pp. 138–160. DOI: 10.1016/j.coal.2017.09.005.
17. Han Z., Zhang F., Yao H. et al. Change of regional water chemistry driven by group coal mining in Changzhi basin, Shanxi, China. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 98. Art. No. 09001. DOI: 10.1051/e3sconf/20199809001.
18. Kursun I., Terzi M. Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review. *Journal of Mining & Environment*. 2018. Vol. 9. No. 3. pp. 641–655. DOI: 10.22044/jme.2018.6855.1518.
19. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia). *Mine Water and the Environment*. 2020. Vol. 39. pp. 464–472. DOI: 10.1007/s10230-020-00691-w.
20. Sun Y., Xiao K., Wang X. et al. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 28. Issue 15. pp. 18604–18615. DOI: 10.1007/s11356-020-11055-w.
21. Zhu Y., Zheng L., Chen X., Chen Y. Speciation characteristics and contamination degree of trace elements in coal gangue hill of a mining area in Huainan Coalfield, China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 33. No. 2. pp. 1981–1989. DOI: 10.15244/pjoes/174397.

УДК 550.34.06

DOI: 10.46698/VNC.2024.61.35.003

Оригинальная статья

Сейсмичность азово-черноморского сегмента зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты

Ю.М. Вольфман^{ID}, М.Н. Бондарь^{ID}, Е.Я. Колесникова^{ID}

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

Статья поступила: 01.11.2024, доработана: 02.12.2024, принята к публикации: 07.12.2024

Резюме: Землетрясения в пределах Равнинного Крыма и северных акваторий Черного и Азовского морей регистрировались инструментальными методами с конца прошлого века. Количество и интенсивность этих землетрясений были гораздо ниже, чем в пределах основной Южнорезной зоны Крымско-Черноморского региона. Поэтому сейсмичность этого района не учитывалась при оценке сейсмической опасности территории Крыма. По мере развития Крымской сети сейсмического мониторинга стало возможным регистрировать слабые землетрясения и значительно пополнить каталог событий Равнинного Крыма и прилегающих акваторий. Кроме этого, 10 лет тому назад в Крыму были проведены фундаментальные исследования по изучению глубинного строения региона вдоль профиля глубинного сейсмического зондирования DOBRE-5. В результате этих работ уточнено пространственное положение границы Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. Получение новой сейсмологической и геолого-геофизической информации обусловило **актуальность исследований**, направленных на выявление связи местной сейсмичности с особенностями глубинного строения и основной тектонической структурой региона – границей Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. **Целью исследований** являлось определение структурной позиции местных землетрясений и выявление связи регионального сейсмогенеза с особенностями строения и активизации зоны сочленения разновозрастных платформ. **Методы исследования** базировались на положениях сопоставительного анализа сейсмичности и пространственно-кинематических особенностей основных разрывных геоструктур региона. **Фактологической основой** исследований послужили данные сейсмических наблюдений из архива Института сейсмологии и геодинамики «Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского» о землетрясениях Северного Крыма и смежных акваторий Черного и Азовского морей. **В результате исследований** установлено, что очаги землетрясений, локализованные в пределах данной территории, приурочены к основной геоструктуре региона – зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. Значительное количество и позиция этих землетрясений обусловили возможность выделения проявлений местной сейсмичности в виде обособленной – Северокрымской сейсмогенной зоны.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмогенная зона, граница платформ, Восточно-Европейская платформа, Скифская плита.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной темы FZEG-2024-0016 Министерства науки и высшего образования РФ.

Для цитирования: Вольфман Ю.М., Бондарь М.Н., Колесникова Е.Я. Сейсмичность азово-черноморского сегмента зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 16-27. DOI: 10.46698/VNC.2024.61.35.003

DOI: 10.46698/VNC.2024.61.35.003

Original paper

Seismicity of the Azov-Black Sea segment of the junction zone of the East European platform and the Scythian plate

Yu.M. Volfman^{id}, M.N. Bondar^{id}, E.Ya. Kolesnikova^{id}

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

Received: 01.11.2024, revised: 02.12.2024, accepted: 07.12.2024

Abstract: Earthquakes within the Plain Crimea and the northern waters of the Black and Azov Seas have been recorded by instrumental methods since the end of the last century. The number and intensity of these earthquakes were much lower than within the main South Coast zone of the Crimean-Black Sea region. Therefore, the seismicity of this area was not taken into account when assessing the seismic hazard of the Crimean territory. With the development of the Crimean seismic monitoring network, it became possible to record weak earthquakes and significantly expand the catalog of events in the Plain Crimea and adjacent waters. In addition, 10 years ago, fundamental research was conducted in Crimea to study the deep structure of the region along the DOBRE-5 deep seismic sounding profile. As a result of these studies, the spatial position of the boundary of the East European Platform and the Scythian Plate was clarified. Obtaining new seismological and geological-geophysical information determined the **relevance of research** aimed at identifying the relationship of local seismicity with the features of the deep structure and the main tectonic structure of the region - the boundary of the East European platform and the Scythian plate. **The aim of the research** was to determine the structural position of local earthquakes and identify the relationship of regional seismogenesis with the structural features and activation of the junction zone of platforms of different ages. **The research methods** were based on the provisions of a comparative analysis of seismicity and spatial-kinematic features of the main rupture geostructures of the region. **The factual basis of the research** was seismic observation data from the archive of the Institute of Seismology and Geodynamics of the "V.I. Vernadsky Crimean Federal University" on earthquakes in Northern Crimea and adjacent areas of the Black and Azov Seas. As a **result of the research** it was established that earthquake sources localized within the given territory are confined to one of the main geostructures of the region – to the junction zone of the East European platform and the Scythian plate. A significant number and position of these earthquakes determined the possibility of identifying manifestations of local seismicity in the form of a separate – North Crimean seismogenic zone.

Keywords: earthquake, seismogenic zone, platform boundary, East European platform, Scythian plate.

Acknowledgments: *The work was carried out within the framework of the scientific topic FZEG-2024-0016 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.*

For citation: Volfman Yu.M., Bondar M.N., Kolesnikova E.Ya. Seismicity of the Azov-Black Sea segment of the junction zone of the East European platform and the Scythian plate. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 16-27. DOI: 10.46698/VNC.2024.61.35.003

Введение

Землетрясения Равнинного Крыма и северных акваторий Черного и Азовского морей, локализованные в тылу зоны сочленения Восточно-Европейской платфор-

мы (ВЕР) и Скифской плиты (СП), регистрировались Крымской сетью инструментальных наблюдений с 1980-х годов [Свидлова, 1989]. Но эти события, будучи слабыми в энергетическом отношении (энергетический класс $K_p=6-8$), как бы «терялись» на фоне интенсивной сейсмичности основной Южнобережной зоны Крыма. К тому же конфигурация крымской сети изначально (после катастрофического Ялтинского землетрясения 11.09.1927 г.) формировалась для регистрации событий, происходящих, главным образом, к югу от Крымского полуострова – в пределах его континентального склона.

Вследствие этого сейсмичность Равнинного Крыма и прилегающих акваторий в работах по сейсмотектонике и оценке сейсмической опасности Крымско-Черноморского региона практически не рассматривалась. При исследованиях по общему сейсмическому районированию (ОСР) территории СССР и Крыма совокупность землетрясений этого района не учитывалась в качестве сейсмогенной зоны [Пустовитенко и др., 1999; 2006; 2014a]. По этой же причине позднее, при актуализации карт ОСР территории Российской Федерации – в процессе построения линеаментно-доменно-фокальной (ЛДФ) модели зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) – эта зона не выделялась ни как сейсмолинеамент, ни даже в качестве домена с $M \leq 5,5$ [Уломов и др., 2016; Свод правил..., 2018].

В конце 80-х–начале 90-х годов прошлого века сейсмичность акваторий Азовского и Черного морей (вокруг Керченского полуострова) стала объектом пристального внимания в связи с необходимостью доизучения инженерно-геологических условий и уточнения сейсмической опасности района и площадки размещения Крымской АЭС [Геология ..., 1992]. К этому времени были получены данные о высоком уровне палеосейсмичности региона, проанализированы результаты геолого-геофизических и геодинамических исследований, направленных на изучение тектонической активности основных геоструктур, способных генерировать землетрясения. Прямым подтверждением этой активности явились возникновение острова в Азовском море вследствие извержения грязевого вулкана 26.08-09.09.1988 г. и рой сопутствующих этому извержению землетрясений [Геология ..., 1992]. При этом, учитывая местоположение Крымской АЭС, основное внимание уделялось структурам Керченского полуострова и его непосредственного окружения.

В последнее 20-летие развитие Крымской сети сейсмических наблюдений позволило расширить области представительной регистрации землетрясений разных энергетических уровней и существенно пополнить каталог событий Равнинного Крыма и прилегающих акваторий Черного и Азовского морей. В этот же период были проведены фундаментальные исследования по изучению глубинного строения региона вдоль профиля глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) DOBRE-5, уточнившие пространственное положение границы ВЕР и СП до глубин 50–70 км [Starostenko et al., 2015; Volfman, Kolesnikova, 2020].

Получение новой сейсмологической и геолого-геофизической информации обусловило актуальность исследований, направленных на выявление связи местной сейсмичности с особенностями глубинного строения и основной тектонической структурой региона – границей между ВЕР и СП. Тем более, что в работах по сейсмотектонике последних лет детально освещалась сейсмическая активность глубинных разломов в пределах смежного с Крымом (и во многом сходного с ним в тектоническом отношении) Кавказского региона и его структурного обрамления [Tibaldi

et al., 2020; Vinsent et al., 2020; Mammadli, 2022 и др.]. Соответственно, целью исследований являлось структурирование сейсмичности, локализованной вдоль этой границы, и выявление связи регионального сейсмогенеза с особенностями строения и активизации зоны сочленения разновозрастных платформ. Методы исследования базировались на положениях сопоставительного анализа сейсмичности и пространственно-кинематических особенностей основных разрывных геоструктур региона. Фактологической основой исследований послужили данные из архива Института сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского о землетрясениях Северного Крыма и смежных участков акваторий Черного и Азовского морей, зарегистрированных, главным образом, станциями Крымской сети сейсмических наблюдений.

Тектоника и сейсмичность района исследований

Исследуемая территория расположена на периферии (на северном фланге) Средиземноморско-Гималайского сейсмоактивного пояса и представляет собой область перехода от древней континентальной консолидированной коры ВЕП к коре субокеанического типа Черноморской впадины. Она включает (с севера на юг) разновозрастные структуры (рис. 1):

- Причерноморский склон дорифейской ВЕП;
- эпиварисскую СП, частично перекрытую наложенными альпийскими Каркинитско-Северокрымским и Индоло-Кубанским прогибами;
- альпийско-киммерийское Горно-Крымское сооружение;
- Черноморскую котловину с редуцированной корой субокеанического типа.

Основной сейсмогенной структурой региона является Южнобережная зона, приуроченная к области континентального склона, отделяющего сооружения Крыма и Кавказа от глубоководной части Черноморской впадины (рис. 1).

В пределах Равнинного Крыма и северных акваторий Черного и Азовского морей за 1972–2024 гг. было зарегистрировано 136 землетрясений с энергетическими классами $K_p=4.7-12.7$. Область их локализации имеет вполне выраженный линейный характер, образуя зону, протягивающуюся с запада-юго-запада на восток-северо-восток (рис. 1).

Неравномерность распределения очагов вдоль этой зоны обусловлена, в основном, двумя причинами.

Во-первых, наблюдается увеличение их количества и энергетического уровня в узлах пересечения основных геоструктур региона:

- Змеиноостровском, где южная граница ВЕП меняет свое направление с юго-западного–северо-восточного на юго-восточное–северо-западное; здесь повышенный уровень сейсмичности обусловлен группами землетрясений 1992 г. (20 событий с $K_p=7.5-11.3$) и 2008 г. (6 событий с $K_p=8.7-12.7$), включая самое сильное для этого района землетрясение (07.05.2008 г., $K_p=12.7$), воздействие которого ощущалось в западной части Крымского полуострова с интенсивностью до 3-х баллов [Пустовитенко и др., 2014б];

- Каламитском, в пределах которого происходит причленение западного сегмента Южнобережной сейсмогенной зоны Крыма к границе разновозрастных платформ (рис. 1).

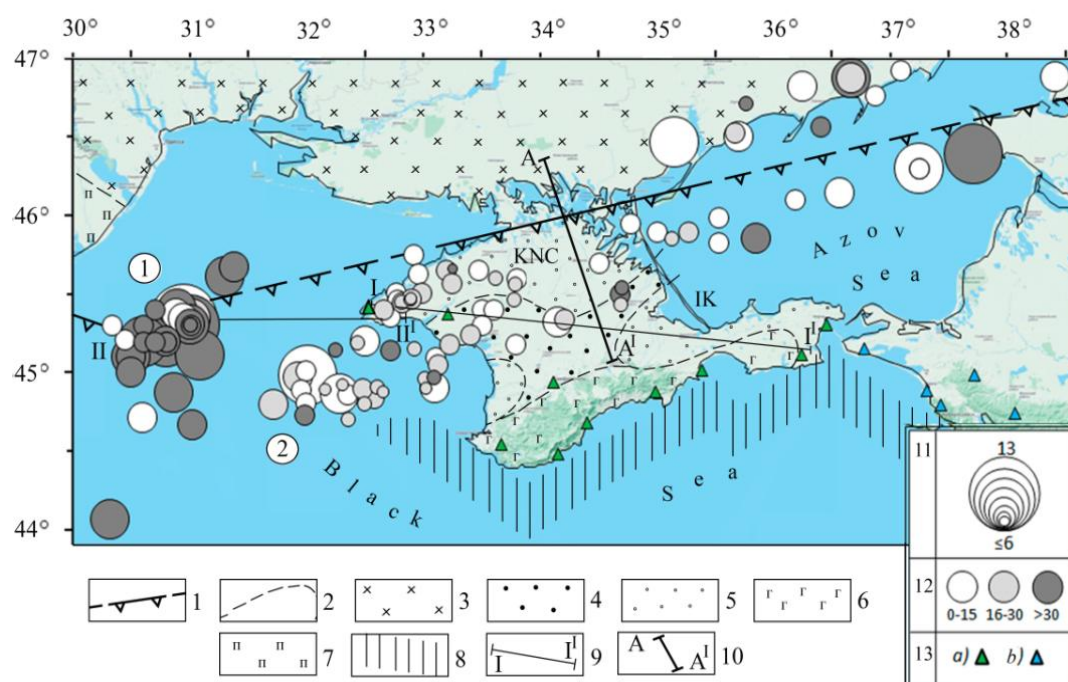


Рис. 1. Схема эпицентров землетрясений в зоне сочленения ВЕП и СП.
 Условные обозначения: 1 – граница ВЕП и СП (по [Starostenko et al., 2015]);
 2 – границы основных структур; 3 – Причерноморский склон ВЕП;
 4 – Центрально-Крымское поднятие СП;
 5 – наложенные альпийские прогибы: Каркинитско-Северокрымский (KNC),
 Индоло-Кубанский (IK); 6 – Горно-Крымское сооружение; 7 – палеозойско-мезозойские
 комплексы Преддобруджского прогиба; 8 – Южнобережная сейсмогенная зона;
 9 – профиль ГСЗ DOBRE-5; 10 – профиль А–А';
 11 – энергетические классы землетрясений; 12 – глубины очагов; 13 – сейсмические
 станции: а) Крымской сети, б) Кавказской сети РАН. Цифры в кружках – узлы
 пересечения сейсмогенных геоструктур: Змеиноостровский (1), Каламитский (2) /

Fig. 1. Diagram of earthquake epicenters in the junction zone of the East European Platform (EEP) and the Scythian Plate (SP). Legend: 1 – boundary of the EEP and the SP (according to [Starostenko et al., 2015]); 2 – boundaries of the main structures; 3 – Black Sea slope of the EEP; 4 – Central-Crimean uplift of the SP; 5 – superimposed Alpine troughs: Karkinit-North-Crimean (KNC), Indolo-Kuban (IK); 6 – Crimean Mountains; 7 – Paleozoic-Mesozoic complexes of the Fore-Dobrudja trough; 8 – South-Coast seismogenic zone; 9 – profile of the DOBRE-5 DSS; 10 – profile A-A'; 11 – energy classes of earthquakes; 12 – focal depths; 13 – seismic stations: a) Crimean network, b) Caucasian network of the Russian Academy of Sciences. The numbers in circles are the intersection nodes of seismogenic geostructures: Zmeinoostrovsky (1), Kalamitsky (2)

Во-вторых, сгущение очагов на юго-западном фланге зоны обусловлено открытием в последнее время пунктов сейсмических наблюдений в западном Крыму и, соответственно, расширением представительной области регистрации землетрясений относительно малых энергетических уровней. Эта закономерность получила отражение и во временном распределении количества землетрясений и их суммарной выделенной энергии (рис. 2).

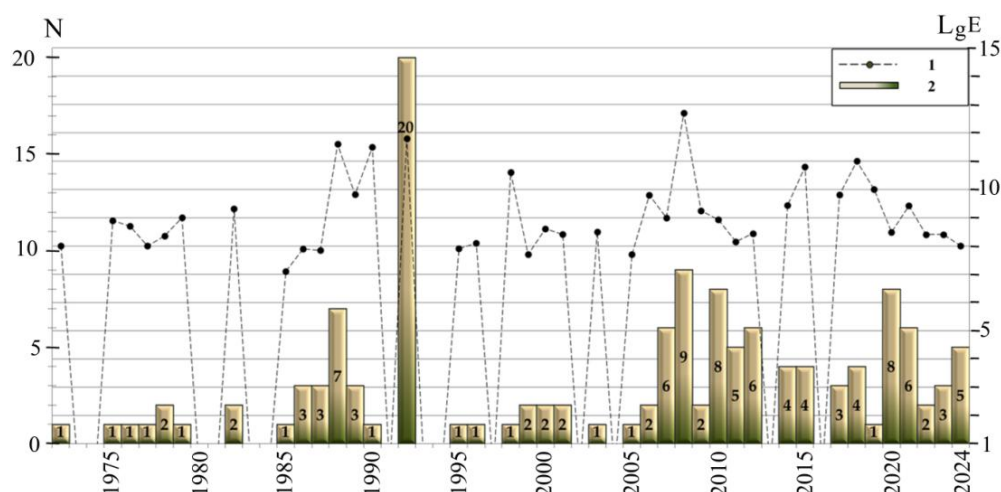


Рис. 2. Распределение (по годам) суммарной выделенной энергии ΣE (1) и количества землетрясений N (2) в области сочленения ВЕП и СП /

Fig. 2. Distribution (by years) of the total released energy ΣE (1) and the number of earthquakes N (2) in the junction area of the EEP and SP

Значительная часть землетрясений является коровыми, возникшими в верхней части коры на глубинах $H \leq 10$ км (39 очагов) и в ее основании, на глубинах $H = 26-30$ км (33 очага) (рис. 3). Не исключено, что некоторая часть приповерхностных событий спровоцирована техногенными причинами – кратковременными перераспределениями напряжений в верхних горизонтах земной коры вследствие периодических изменений режима работы местного подземного газохранилища.

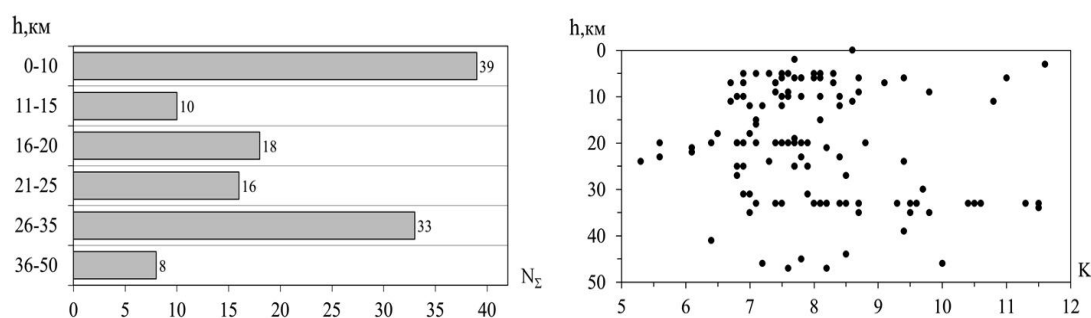


Рис. 3. Диаграмма распределения количества N_s землетрясений (а) и их энергетических классов K (б) по глубинам за период с 1972 г. по 2024 г. /

Fig. 3. Diagram of the distribution of the number N_s of earthquakes (a) and their energy classes K (b) by depths for the period from 1972 to 2024

Таким образом, анализируемая выборка данных о землетрясениях Равнинного Крыма и северных акваторий Черного и Азовского морей представляется весьма репрезентативной, достаточной для выполнения сопоставительного сейсмотектонического анализа местной сейсмичности и основных геоструктур региона.

Результаты исследований и их обсуждение

Пространственное положение очагов землетрясений относительно зоны сочленения ВЕП и СП в полной мере отражает схема эпицентров (рис. 1) и профиль I-I' (ориентированный перпендикулярно к этой зоне), на который вынесены про-

екции очагов и основные границы разновозрастных структур (рис. 4). Из анализа исключены события Змеиноостровской группы, поскольку, как показали результаты построения фокальных механизмов [Пустовитенко, 2002 и др.], возникновение некоторых из них было обусловлено активизацией не только крымского сегмента зоны сочленения платформ, но и ее западного фланга, имеющего северо-западное простирание и разграничивающего ВЕП и сооружения Северной Добруджи.

В работе [Стогний, Стогний, 2023] отмечалось, что региональные напряжения сжатия в зоне межплитного разлома при коллизионном процессе приурочены, в основном, к консолидированной коре. Следует добавить, что характер распределения очагов землетрясений на приведенном разрезе указывает на приуроченность их к северному флангу СП, в то время как примыкающий к плите южный борт ВЕП является практически асейсмичным. Данное обстоятельство вполне объяснимо с геологической точки зрения: прочность гранитно-метаморфических комплексов фундамента древней платформы намного превышает прочностные свойства пород гетерогенного варисско-киммерийского основания и осадочного чехла СП. Поэтому в процессе тектонического взаимодействия смежных участков разновозрастных платформ при достижении критического напряженного состояния геологической среды разрывные деформации с нарушением сплошности (в том числе, землетрясения), возникают преимущественно во фронтальной части СП, сложенной литолого-стратиграфическими комплексами с более низким прочностным порогом.

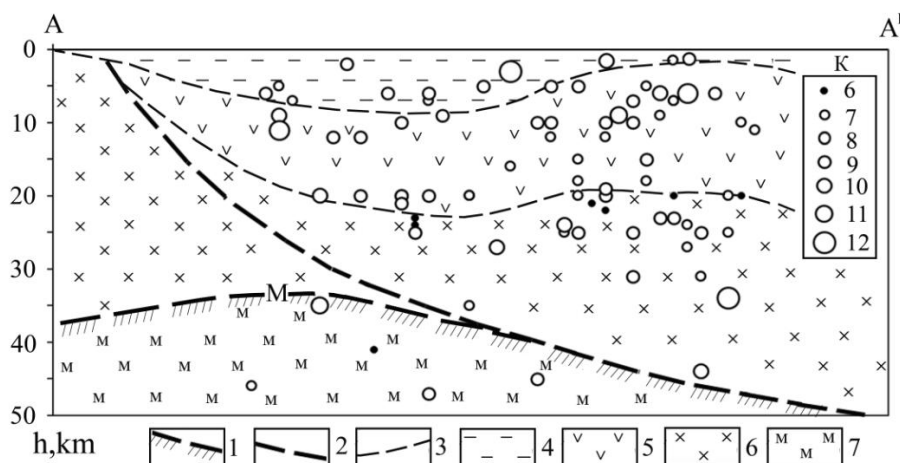


Рис. 4. Схематический разрез земной коры и верхней мантии и проекции на профиль А-А' очагов землетрясений. Условные обозначения: 1 – поверхность Мохо; 2 – граница ВЕП и СП; 3 – предполагаемые границы раздела в земной коре СП; 4 – осадочный чехол; 5 – гетерогенное варисско-киммерийское основание СП; 6 – консолидированная (верхняя, нижняя и средняя) кора кратона; 7 – верхняя мантия. На врезке – энергетические классы землетрясений /

Fig. 4. Schematic section of the earth's crust and upper mantle and projections of earthquake foci onto profile A-A'. Legend: 1 – Moho surface; 2 – boundary of the EEP and SP; 3 – supposed boundaries of the section in the earth's crust of the SP; 4 – sedimentary cover; 5 – heterogeneous Variscan-Cimmerian basement of the SP; 6 – consolidated (upper, lower and middle) crust of the craton; 7 – upper mantle. Inset – energy classes earthquakes

Данный эффект усиливает то обстоятельство, что шовная зона сочленения разновозрастных платформ имеет весьма пологий наклон (17–20° в юго-восточном направлении [Starostenko et al., 2015; Volfman, Kolesnikova, 2020]), вследствие чего СП, практически на протяжении всего разреза налегающая на погружающийся южный фланг ВЕП, имеет одну свободную (дневную) поверхность. Это существен-

ным образом облегчает возникновение в верхней части земной коры пластических и разрывных деформаций в случаях, когда давление, вызванное горизонтальными сжимающими напряжениями, превышает величину литостатического давления, обусловленного весом налегающих породных комплексов. Этим же объясняется и преобладание землетрясений в интервале глубин от земной поверхности до 10 км.

Также обоснован неравномерный характер интенсивности сейсмических событий в пределах разных сегментов разреза исследуемой зоны. Результаты анализа распределения значений логарифма суммарной выделенной энергии (ΣE , Дж) в очагах землетрясений, проецируемых на профиль А-А' (рис. 4), позволяют не только соотнести энергетический потенциал территории с положением зоны сочленения ВЕП и СП, но и выделить сегменты разреза, предположительно трассирующие крупные разрывные структуры внутри варисско-киммерийского основания СП.

Установлено, что в зоне, непосредственно прилегающей к шву сочленения разновозрастных платформ, практически отсутствуют сколько-нибудь значительные проявления сейсмичности (рис. 5). Причиной этому являются многочисленные акты тектонической активизации этой структуры, которые происходили на протяжении длительной истории ее геологического развития.

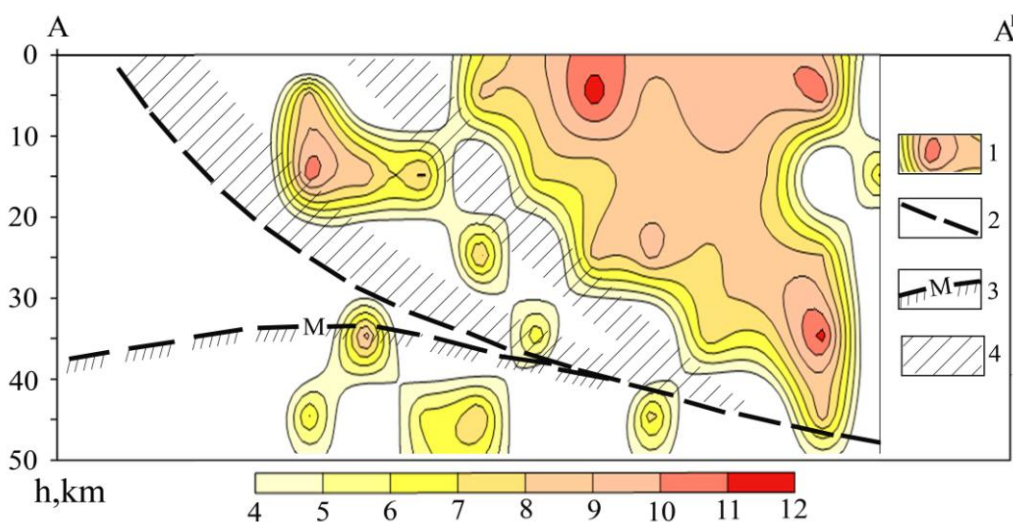


Рис. 5. Распределение вдоль профиля А-А' значений логарифма суммарной выделенной энергии (шкала значений – под рисунком). Условные обозначения: 1 – линии равных значений логарифма суммарной выделенной энергии; 2 – граница ВЕП и СП; 3 – поверхность Мохо; 4 – участки интенсивной деструкции пород в зонах динамического влияния основных разрывных структур региона /

Fig. 5. Distribution along profile A-A' of the values of the logarithm of the total released energy (the scale of values - is under the figure). Legend: 1 – lines of equal values of the logarithm of the total released energy; 2 – boundary of the EEP and SP; 3 – Moho surface; 4 – areas of intensive destruction of rocks in the zones of dynamic influence of the main fault structures of the region

В работе [Volfman, Kolesnikova, 2020] было показано, что циклический характер изменения кинематических обстановок продольного сжатия и растяжения земной коры в регионе обусловил периодически и многократно повторяющуюся активизацию зоны сочленения как по сбросовому, так и по надвиговому типу. Эти процессы привели к интенсивной деструкции пород непосредственно в зоне динамического влияния этой структуры, вследствие чего их реакция на воздействие тектонических напряжений проявилась не в виде хрупких деформаций (в том числе, землетрясе-

ний), а в виде деформаций пластического характера без существенного нарушения сплошности геологической среды.

При этом в разрезе (внутри земной коры в пределах СП) вполне явственно проявилась еще одна зона с пониженным сейсмическим потенциалом, расположенная выше и южнее шва сочленения ВЕП и СП (рис. 5). Есть основания полагать, что в структурном отношении эта зона разграничивает основные сегменты СП, а именно – Каркинитско–Северокрымский прогиб и Центрально-Крымское поднятие, различающиеся составом, строением и мощностью слагающих их литолого-стратиграфических комплексов. Как и в первом случае, циклический характер изменения кинематических обстановок в регионе [Volfman, Kolesnikova, 2020] также обусловил инверсионный (противоположный) характер тектонической активизации этой зоны по взбросо-надвиговому и, в меньшей мере, по сбросовому типу. Реалистичность подобного геодинамического сценария обосновывается наличием полого падающих надвиговых и сбросовых структур, установленных по данным глубокого бурения и по результатам геофизических исследований в отложениях Северо-Азовского бассейна и в основании Каркинитско-Северокрымского прогиба [Афанасенков и др., 2007; Гинтов и др., 2014; Рогожников, 1997; Sydorenko et al., 2017; Khriachtchevskaya et al., 2010 и др.]. Соответственно, эти процессы привели к интенсивной деструкции пород непосредственно в зоне динамического влияния самой структуры, обусловив возможность реализации тектонических напряжений вдоль нее, главным образом, в виде пластических деформаций.

Выводы

Таким образом, результаты изучения сейсмичности Равнинного Крыма и северных акваторий Черного и Азовского морей позволяют обосновать следующие выводы:

1. Особенности пространственного распределения очагов землетрясений, локализованных в пределах исследуемой территории, указывают на их приуроченность к одной из основных геоструктур региона – к зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. Значительное количество, особенности локализации и сеймотектоническая позиция этих землетрясений позволили объединить все проявления местной сейсмичности в одну обособленную – Северокрымскую сейсмогенную зону.

2. Энергетический потенциал Северокрымской зоны существенно ниже, чем у основных сейсмогенных зон (Южнобережной, Туапсинско-Анапской) Крымско-Черноморского региона. Тем не менее, учет ее возможного влияния на уровень сейсмической опасности площадок размещения стратегических и потенциально опасных объектов в пределах данного района представляется необходимым и целесообразным.

3. Неравномерная интенсивность землетрясений в разных сегментах разреза земной коры, получившая отражение в распределении значений логарифма суммарной выделенной энергии, позволяет выделить линейную область низких значений этого параметра, предположительно трассирующую крупную разрывную структуру внутри вариско-киммерийского основания Скифской плиты, вдоль которой происходило надвигание Центрально-Крымского поднятия на зону Каркинитско-Северокрымского прогиба.

Литература

1. Афанасенков А.П., Никишин А.М., Обухов А.Н. Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона. М.: Научный мир, – 2007. 172 с.
2. Геология и геодинамика района Крымской АЭС. / Отв. редакторы Н.М. Гавриленко, А.В. Чекунов / АН Украины. Ин-т геофизики им. С.И. Субботина; Госгеолком Украины. – Киев: Наукова думка, – 1992. 188 с.
3. Гинтов О.Б., Егорова Т.П., Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Муровская А.В. Геодинамические особенности зоны сочленения Евразийской плиты и Альпийско-Гималайского пояса в пределах Украины и прилегающих территорий. // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. №4. – С. 26–63.
4. Пустовитенко Б.Г., Лущик А.В., Боборыкина О.В., Кульчицкий В.Е., Можжерина А.В., Насонкин В.А., Панков Ф.Н., Поречнова Е.И., Пустовитенко А.А., Тихоненков Э.П., Швырло Н.И. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-ГИДРОФИЗИКА», – 2014а. 264 с.
5. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Скляр А.М., Князева В.С. Змеиное землетрясение 7 мая 2008 г. с $K_n=12.7$, $M_c=5.1$, $M_w=4.8$, $I_0^p=5-6$. // Землетрясения Северной Евразии. – 2014б. – Вып. 17. – С. 313–325.
6. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Поречнова Е.И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98). // Геофизический журнал. – 1999. – Т. 21. №6. – С. 3–15.
7. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности. // Геофизический журнал. – 2006. – Т. 28. №3. – С. 54–77.
8. Пустовитенко Б.Г. Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-ГИДРОФИЗИКА», 2002. – С. 59–64.
9. Рогожников В.Д. Дислокации Сарыбашского гребня в равнинном Крыму // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. // Материалы конференции «Геодинамика Крымско-Черноморского региона», 22-28 сентября 1996 г. Симферополь: НАН Украины, – 1997. С. 77–80.
10. Свидлова В.А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1986 г. // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР. 1986 г. – Киев: Наукова думка, – 1989. С. 4–38.
11. Свод правил СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*». – М.: Стандартинформ. – 2018. – 117 с.
12. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №3. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001.
13. Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С., Акатова К.Н., Аптикаев Ф.Ф., Данилова Т.И., Кожурин А.И., Медведева Н.С., Никонов А.А., Перетокин С.А., Пустовитенко Б.Г., Стром А.Л. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. // Инженерные изыскания. – 2016. – № 7. – С. 49–121.
14. Khriachtchevskaia O., Stovba S., Stephenson R. Cretaceous-Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. // Geological Society London Special Publications. – 2010. – Vol. 340. Issue 1. – pp. 137–157.
15. Mammadli T.Ya. Determination of seismogenic zones for analysis of seismotectonic activity of deep faults: seismic hazard assessment for the territory of Azerbaijan. // Geotectonics. – 2022. – Vol. 56. No 2. – pp. 191–199.

16. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Sroda P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Y. et al. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and Crimean peninsula. // *Geophysical Journal International*. – 2015. – Vol. 201. Issue 1. – pp. 406–428. DOI: 10.1093/gji/ggv018.
17. Sydorenko G., Stephenson R., Yegorova T., Starostenko V., Tolkunov A., Janik T., Majdanski M., Voitsitskiy Z., Rusakov O., Omelchenko V. Geological structure of the northern part of the Eastern Black Sea from regional seismic reflection data including the DOBRE-2 CDP profile. // *Geological Society, London, Special Publications*. – 2017. – Vol. 428. Issue 1. – pp. 307–321.
18. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
19. Vinsent S.J., Somin M.L., Carter A., Vezzolini G., Fox M., Vautravers B. Testing models of Cenozoic Exhumation in the Western Greater Caucasus. // *Tectonics*. – 2020. – Vol. 39. Issue 2. DOI: 10.1029/2018TC005451.
20. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Discontinuous Fault Structures in the Junction Zone of the East European Platform and the Crimean Segment of the Scythian Plate along the DOBRE-5 DSS Profile. // *Geotectonics*. – 2020. – Vol. 54. No 6. – pp. 754–770. DOI: 10.1134/S001685212006014X.

References

1. Afanasenkov A.P., Nikishin A.M., Obuhov A.N. Geological structure and hydrocarbon potential of the East Black Sea region. Moscow. Nauchnyi Mir. 2007. 172 p. (In Russ.)
2. Geology and geodynamics of the Crimean NPP region. Eds. N.M. Gavrilenko, A.V. Chekunov. Kiev. Naukova Dumka. 1992. 188 p. (In Russ.)
3. Gintov O.B., Egorova T.P., Tsvetkova T.A., Bugaenko I.V., Murovskaya A.V. Geodynamic peculiarities of the Eurasian plate junction zone and the Alpine-Himalayan belt within Ukraine and adjacent territories. Alpine-Himalayan belt within Ukraine and adjacent territories. *Geophysical Journal*. 2014. Vol. 36. No. 4. pp. 26–63. (In Russ.)
4. Pustovitenko B.G., Lushchik A.V., Boborykina O.V., Kulchitsky V.E., Mozherina A.V., Nasonkin V.A., Pankov F.N., Porechnova E.I., Pustovitenko A.A., Tikhonenkov E.P., Shvyrlu N.I. Monitoring of seismic processes in the Crimean-Black Sea region. Sevastopol. SPC “ECOSI-HYDROPHYSICS”. 2014a. 264 p. (In Russ.)
5. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Sklyar A.M., Knyazeva V.S. Snake earthquake on 7 May 2008 with $K_p=12.7$, $M_c=5.1$, $M_w=4.8$, $I_0^p=5-6$. Earthquakes of Northern Eurasia. 2014b. Issue 17. pp. 313–325. (In Russ.)
6. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Borisenko L.S., Porechnova E.I. General seismic zoning of the territory of Crimea (GSZ-98). *Geophysical Journal*. 1999. Vol. 21. No. 6. pp. 3–15. (In Russ.)
7. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Pustovitenko A.A. New maps of general seismic zoning of the territory of Ukraine. Features of long-term seismic hazard model. *Geophysical Journal*. 2006. Vol. 28. No. 3. pp. 54–77. (In Russ.)
8. Pustovitenko B.G. Focal mechanism of felt earthquakes in the Crimean-Black Sea region for the last 20 years. *Seismological Bulletin of Ukraine for 2000*. Sevastopol. SPC “ECOSI-HYDROPHYSICS”. 2002. pp. 59–64. (In Russ.)
9. Rogozhnikov V.D. Dislocations of the Sarybash ridge in the plain Crimea. Geodynamics of the Crimean-Black Sea region. In: *Proceedings of the Conference “Geodynamics of the Crimean-Black Sea Region”*, September 22-28. 1996. Simferopol. National Academy of Sciences of Ukraine. 1997. pp. 77–80. (In Russ.)
10. Svidlova V.A. Catalog and detailed data on earthquakes of the Crimean-Black Sea region for 1986. *Seismological Bulletin of the Western territorial zone of the USSR ESSN*. 1989. Kiev. Naukova Dumka. 1989. pp. 4–38. (In Russ.)

11. Code of Regulations SP 14.13330.2018 “Construction in seismic areas. Updated edition of SNiP II-7-81*”. Moscow. Standartinform. 2018. 117 p. (In Russ.)
12. Stogny G.A., Stogny V.V. The Scythian plate southern boundary in the system of block divisibility consolidated crust of the Greater Caucasus Central and Eastern segments. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6-18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001. (In Russ.)
13. Ulomov V.I., Bogdanov M.I., Trifonov V.G., Gusev A.A., Gusev G.S., Akatova K.N., Aptikaev F.F., Danilova T.I., Kozhurin A.I., Medvedeva N.S., Nikonov A.A., Peretokin S.A., Pustovitenco B.G., Strom A.L. General seismic zoning of the territory of the Russian Federation. Explanatory note to the set of GSZ-2016 maps and the list of settlements located in seismic active zones. *Engineering Surveys*. 2016. No. 7. pp. 49–121. (In Russ.)
14. Khriachtchevskaya O., Stovba S., Stephenson R. Cretaceous-Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. *Geological Society London Special Publications*. 2010. Vol. 340. Issue 1. pp. 137–157.
15. Mammadli T.Ya. Determination of seismogenic zones for analysis of seismotectonic activity of deep faults: seismic hazard assessment for the territory of Azerbaijan. *Geotectonics*. 2022. Vol. 56. No. 2. pp. 191–199.
16. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfaliak L., Czuba W., Sroda P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Y. et al. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and Crimean peninsula. *Geophysical Journal International*. 2015. Vol. 201. Issue 1. pp. 406–428. DOI: 10.1093/gji/ggv018.
17. Sydorenko G., Stephenson R., Yegorova T., Starostenko V., Tolkunov A., Janik T., Majdanski M., Voitsitskiy Z., Rusakov O., Omelchenko V. Geological structure of the northern part of the Eastern Black Sea from regional seismic reflection data including the DOBRE-2 CDP profile. *Geological Society, London, Special Publications*. 2017. Vol. 428. Issue 1. pp. 307–321.
18. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.
19. Vinsent S.J., Somin M.L., Carter A., Vezzolini G., Fox M., Vautravers B. Testing models of Cenozoic Exhumation in the Western Greater Caucasus. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. Issue 2. DOI: 10.1029/2018TC005451.
20. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Discontinuous Fault Structures in the Junction Zone of the East European Platform and the Crimean Segment of the Scythian Plate along the DOBRE-5 DSS Profile. *Geotectonics*. 2020. Vol. 54. No. 6. pp. 754–770. DOI: 10.1134/S001685212006014X.

УДК 551.24: 550.3

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.93.004

Оригинальная статья

Глубинное строение зоны сочленения Донецкой складчатой системы и Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным

Д.Б. Давыденко^{id}, К.Ю. Гамбург^{id}

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: maurmar@yandex.ru

Статья поступила: 24.09.2024, доработана: 04.11.2024, принята к публикации: 06.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Выделение крупных тектонических элементов, подобных Южному склону Воронежской антеклизы (ЮСВА) и Донецкому складчатому сооружению (ДСС), обычно основывается на данных региональных сейсморазведочных работ в комплексе с грави- и магниторазведкой. Самым информативным являлся XIV профиль КМПВ-ГСЗ. Однако, трассирование выявленных на нем глубинных разломов по площади региона, в условиях отсутствия сети подобных профилей, является неоднозначным и привело к созданию целой серии вариантов (в значительной мере субъективных). Вместе с тем, выявление особенностей глубинного строения зоны сочленения крупных структурных элементов земной коры, в частности ДСС и ЮСВА, имеет важное значение для познания геологической истории и прогноза полезных ископаемых. **Цель.** Выделить однородные тектонические блоки и глубинные разломы в зоне сочленения ДСС и ЮСВА. **Методы.** Выделение и прослеживание глубинных разломов, и выявление тектонических блоков осуществлялось на основе оценки их геодинамической однородности. Для этого был осуществлен анализ современных данных высокоточной аэрогеофизической съемки масштаба 1:50 000 (аэромагнитометрия) и масштаба 1:100 000 (аэрогравиметрия), полученных ЗАО ГНПП «Аэрогеофизика» в 2008–2011 гг., результатов глубокого бурения и материалов профиля глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). **Результаты.** В зоне сочленения южного склона Воронежского кристаллического массива и Донецкой складчатой системы выделены геодинамически однородные сегменты в пределах Курского и Калачско-Эртильского мегаблоков. Предложена новая концептуальная модель глубинного строения, в соответствии с которой эти сегменты располагаются вдоль Прадонецкого рифта и испытали существенную рифтогенную переработку в рифейское время. Прадонецкому рифту соответствует зона линейной складчатости Донбасса, а площадям южной части Курского мегаблока соответствует область мелкой складчатости каменноугольной толщи (складчато-надвиговый тип покровной складчатости). Прогнозируемые образования рифейского возраста могут быть отнесены к доплитному (переходному) комплексу.

Ключевые слова: тектонические мегаблоки, рифейские образования, глубинные разломы, потенциальные поля, Донбасс.

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

Для цитирования: Давыденко Д.Б., Гамбург К.Ю. Глубинное строение зоны сочленения Донецкой складчатой системы и Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 28–38. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.93.004

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.93.004

Original paper

The deep structure of the junction zone of the Donetsk folded system and the Voronezh crystalline massif according to geophysical data

D.B. Davydenko , K.Y. Hamburg 

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

Received: 24.09.2024, revised: 04.11.2024, accepted: 06.11.2024

Abstract: Relevance. The identification of large tectonic elements, such as the Southern Slope of the Voronezh Anticline (SSVA) and the Donetsk Folded Structure (DFS), is usually based on data from regional seismic surveys in combination with gravity and magnetic exploration. The most informative was the XIV profile of the RCM-DSS. However, tracing the deep faults identified on it over the area of the region, in the absence of a network of such profiles, is ambiguous and has led to the creation of a whole series of options (largely subjective). At the same time, the identification of the features of the deep structure of the junction zone of large structural elements of the Earth's crust, in particular DFS and SSVA, is important for the knowledge of the geological history and mineral prospectivity prediction. **Aim.** To identify homogeneous tectonic blocks and deep faults in the junction zone of the DFS and the SSVA. **Methods.** The identification and tracing of deep faults and the identification of tectonic blocks were carried out on the basis of an assessment of their geodynamic homogeneity. For this purpose, the analysis of modern data of high-precision aerogeophysical survey of 1:50.000 scale (aeromagnetometry) and 1:100.000 scale (aerogravimetry) obtained by JSC GNPP Aerogeophysics in 2008–2011, the results of deep drilling and materials of the profile of deep seismic sounding ((DSS) was carried out. **Results.** Geodynamically homogeneous segments within the Kursk and Kalachsko-Ertlsky megablocks have been identified in the junction zone of the southern slope of the Voronezh crystalline massif and the Donetsk folded system. A new conceptual model of the deep structure is proposed, according to which these segments are located along the Great Donets Rift and experienced significant rifting during the Riphean period. The Pradonetsky rift corresponds to the zone of linear folding of Donbass, and the areas of the southern part of the Kursk megablock correspond to the area of shallow folding of the carboniferous strata (folded-thrust type of cover folding). The predicted formations of the Riphean age can be attributed to an additional (transitional) complex.

Keywords: tectonic megablocks, riphean formations, deep faults, potential fields, Donbass.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the implementation of the state assignment of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, state registration No. 122020100345-8.

For citation: Davydenko D.B., Hamburg K.Y. The deep structure of the junction zone of the Donetsk folded system and the Voronezh crystalline massif according to geophysical data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 28-38. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.93.004

Введение

Большинство исследователей придерживается мнения о влиянии блоковой тектоники фундамента на процессы седиментогенеза осадочной толщи, формирование ее структуры, особенности проявления магматизма и, как следствие, на нефтегазонасность и рудоносность площадей [Аплонov, Лебедев, 2010; Матишов и др., 2011 и др.]. В то же время выявление и изучение как блокового строения, так и этих закономерностей является достаточно сложной проблемой. Практически, все предпринимаемые попытки изучения глубинного строения южного склона Воронежской антеклизы (ЮСВА) и ее сопряжения с Донецким складчатым сооружением (ДСС) сводились к прогнозированию по геофизическим данным крупных разломных зон (глубинных разломов) и выделению участков между разломами в качестве блоков кристаллического фундамента. Разумеется, глубинные разломы являются значимым элементом геологического строения региона и могут служить важным критерием для выявления зон нефтегазонакопления и оруденения [Davydenko, 2020; Парада, 2023 и др.].

Выделение крупных тектонических элементов, подобных ЮСВА и ДСС, основывается на данных региональных сейсморазведочных работ в комплексе с гравиметрической и магниторазведкой. Самым информативным до настоящего времени являлся XIV профиль КМПВ-ГСЗ (**корреляционный метод преломлённых волн – глубинное сейсмическое зондирование**) [Бородулин, 1973]. Однако, трассирование выявленных на нем глубинных разломов по площади региона, в условиях отсутствия сети подобных профилей, привело к созданию целой серии вариантов (в значительной мере субъективных). В настоящее время наиболее признанными и уверенно трассируемыми являются Глубокинский и Каменский надвиги. При этом предполагается, что на глубоких горизонтах углы наклона плоскостей их сместителей увеличиваются и переходят в крутопадающие зоны глубинных разломов.

Таким образом, выявление особенностей глубинного строения зон сочленения крупных структурных элементов земной коры, в частности ДСС и ЮСВА, имеет важное значение, как для познания геологической истории, так и для прогноза полезных ископаемых.

Материал и методы

Задача выделения и прослеживания глубинных разломов и выявление тектонических блоков осуществлялась, прежде всего, на основе оценки их геодинамической однородности в соответствующие временные периоды, а не просто как геологическое пространство между глубинными разломами. Так, в начале 2000-х годов появилась работа [Zaitsev et al., 2003], в которой для рассматриваемого региона была предпринята попытка выделения в кристаллическом фундаменте платформы мегаблоков, являющихся вещественно-структурными и геодинамически однородными мегаобразованиями. Авторы указанной работы опирались, в основном, на результаты исследований, выполненных в более северных районах [Chernyshov et al., 1997]. Так как севернее анализируемого региона были получены значительно большие объемы геологической информации о составе и структуре кристаллического фундамента (мощности осадочной толщи здесь значительно меньше, чем в анализируемом регионе), что обеспечивало большую надежность создаваемых там мо-

делей глубинного строения. При трассировании блоков фундамента, выделенных в более северных регионах, авторами работы [Zaitsev et al., 2003] привлекались к анализу данные о магнитном и гравитационном полях, а также результаты бурения скважин глубокого бурения и материалы профиля глубинного сейсмозондирования (ГСЗ). Для достижения поставленной нами цели использован аналогичный подход. При этом использованы материалы, полученные Закрытым акционерным обществом «Геофизическое научно-производственное предприятие «Аэрогеофизика»» (ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика»») в 2008–2011 гг. по объекту «Комплексные аэрогеофизические исследования (аэрогравиметрия, аэромагниторазведка) масштаба 1:50 000 – 1:100 000».

Результаты и обсуждение

Согласно существующим представлениям фундаментом для осадочной толщи в пределах Воронежской антеклизы являются докембрийские образования [Лёвин и др., 2011; Буш, 2014; Granovsky, 2018; Грановский, Грановская, 2019]. Породы докембрия в пределах анализируемого региона не обнажаются. Минимальные глубины его залегания установлены на севере, в пределах свода Воронежского кристаллического массива. Максимальные глубины кровли фундамента порядка 17 км предполагаются по данным геофизических исследований под Донецким складчатым сооружением (ДСС) [Saintot et al., 2003]. В соответствии с принятой в рассматриваемой работе схемой глубинного строения региона южный склон Воронежского кристаллического массива подразделяется на Курский, Калачско-Эртильский мегаблоки и разделяющую их Лосевскую шовную зону [Чернышов и др., 1996; Brunet et al., 1999]. Границы выделяемых структур ориентированы субмеридионально и под крутым углом пересекаются с ДСС. Согласно описываемой схеме предпринята попытка протрассировать выделяемые на севере мегаблоки через площади Сарматско-Суаркырской рифтовой системы [Антипов и др., 2010] в пределы Скифской плиты. Так ими предлагается рассматривать Приазовский мегаблок (его восточным сегментом является Ростовский выступ кристаллического фундамента (Структурно-формационная карта кристаллического основания юго-западной части Восточно-Европейской платформы (масштаб 1:1000000). Гл. ред. А.И. Зарицкий. Киев: Госкомгеология Украины, 1992) [Парада, 2019; Хераскова и др., 2023] как южное продолжение Курского мегаблока. К востоку от Приазовского мегаблока предлагается выделять Зерноградско-Мечётинскую шовную зону (аналог Лосевской шовной зоны), а в качестве аналога Калачско-Эртильского мегаблока – Сальско-Ремонтненский блок. Подобные предположения о возможности трассирования мегаблоков Воронежского кристаллического массива (ВКМ) в пределы Скифской плиты представляются, весьма дискуссионными. Конкретных сведений об особенностях физических полей, характеризующих тот или иной мегаблок авторами практически не приводится.

Магнитное поле анализируемого региона явно подразделяется на 3 площадных типа, различающиеся особенностями структуры поля. Первый из них занимает северную часть территории, характеризуется изрезанным знакопеременным полем, преобладанием линейно вытянутых аномалий, значительными горизонтальными градиентами в соответствии с рис. 1.

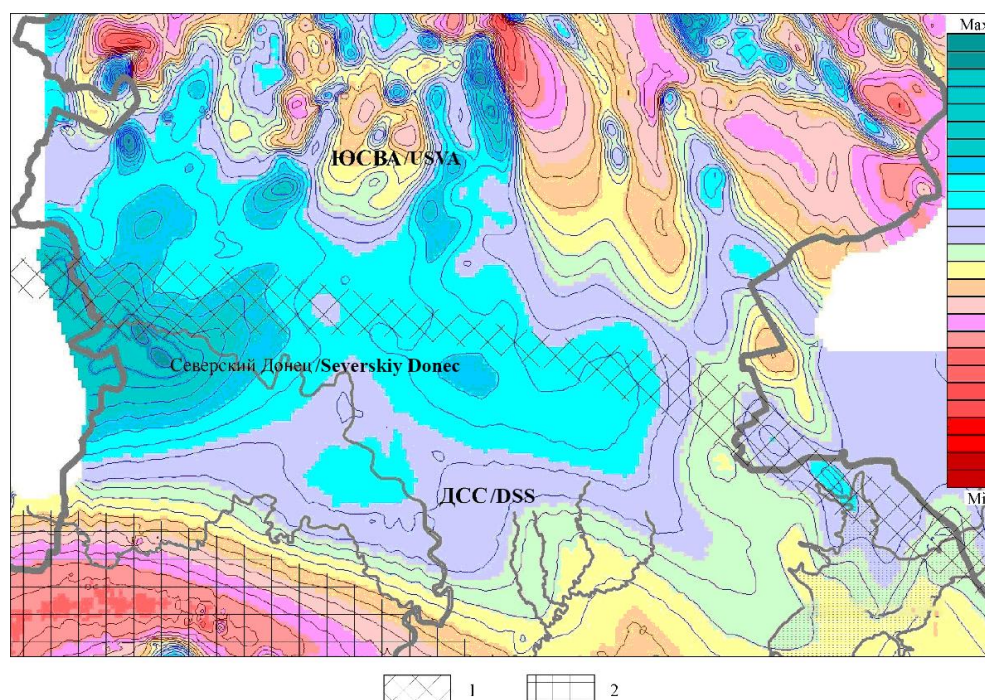


Рис. 1. Схематическая карта изолиний магнитного поля зоны сочленения южного склона Воронежской антеклизы (ЮСВА) и Донецкой складчатой системы (ДСС), а также прилегающих площадей: 1 – зона сочленения двух структур (ЮСВА и ДСС); 2 – площади Прадонецкого авлакогена рифейского возраста /

Fig. 1. Schematic map of the magnetic field isolines of the junction zone of the southern slope of the Voronezh antecline (SSVA) and the Donetsk folded system (DFS), as well as adjacent areas. 1 – the zone of articulation of two structures (SSVA and DFS); 2 – the areas of the Proto-Donets Avlakogen of the Riphean age

Второй тип приурочен к центральной части площади исследуемого региона. Это слабо дифференцированные аномалии положительного знака, постепенно затухающие с запада на восток, с небольшими горизонтальными градиентами. Третий тип выделяется в юго-западной части площади, характеризуется отрицательными значениями поля, наличием многочисленных мелких (и по площади, и по интенсивности) осложнений.

Поле силы тяжести, в соответствии с рис. 2, по своей структуре также подразделяется на три типа (однако они пространственно не совпадают с типами магнитного поля). На юге рассматриваемого региона и в северо-восточной его части выделяются площади с повышенными значениями поля силы тяжести. Разделены они зоной пониженных значений гравитационного поля. Положительные аномалии северо-восточной части площади малоамплитудны и слабоградиентны. В центральной зоне с пониженными значениями остаточных аномалий четко выделяются три изометричных по форме аномалии, наиболее интенсивной и градиентной из которых является средняя. От более южной зоны повышенного гравитационного поля центральная отделяется четкой полосой высоких значений горизонтального градиента.

Выделение двух мегаблоков (Курского и Калачско-Эртильского), а также разделяющего их Лосевского вулканотектонического пояса на площадях, прилегающих с

севера и северо-востока к анализируемому региону [Zaitsev et al., 2003], принимаем как достаточно обоснованное.

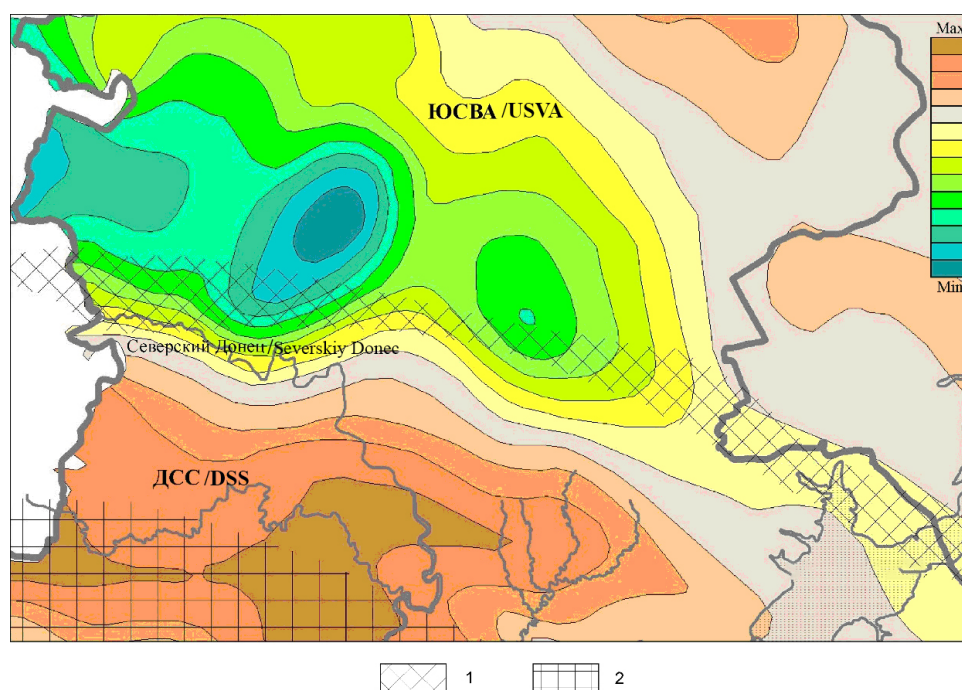


Рис. 2. Схематическая карта остаточных аномалий поля силы тяжести зоны сочленения южного склона Воронежской антеклизы (ЮСВА) и Донецкой складчатой системы (ДСС) с прилегающими землями: 1 – зона сочленения двух надпорядковых структур (ЮСВА и ДСС); 2 – площади Прадонецкого авлакогена рифейского возраста /

Fig. 2. Schematic map of residual anomalies of the gravity field of the zone of articulation of the southern slope of the Voronezh anticline (SSVA) and the Donetsk folded system (DFS) with adjacent lands: 1 – the zone of articulation of two superorder structures (SSVA and DFS); 2 – the area of the Pradonetsky avlakogen of the Riphean age

С целью прослеживания Курского мегаблока в пределах исследуемых площадей нами выполнен анализ структуры аномального магнитного поля вдоль этого вещественно-структурного образования, начиная от районов Курской магнитной аномалии (КМА), где он перекрыт небольшими мощностями рыхлых отложений. Следует отметить, что в строении Курского мегаблока существенную роль играют наложенные рифтогенные впадины, выполненные железисто-кремнисто-сланцевой и железисто-карбонатно-сланцевой формациями. Породы указанных формаций интенсивно намагничены [Крутиховская и др., 1964] и поэтому площадям неглубокого залегания кристаллических образований этого блока соответствуют высокоинтенсивные магнитные аномалии (области КМА). Последовательное погружение на юго-восток этих образований сопровождается сглаживанием аномального магнитного поля и превращением сближенных разрозненных аномалий в единую, уверенно прослеживаемую, площадную аномалию значительной протяженности. Дополнительное привлечение к анализу магнитного поля региональных сейсморазведочных профилей позволило связать поперечные понижения в пределах рассматриваемой положительной аномалии от глубинного объекта с па-

леорифтами (прогнозируется рифейский возраст этих структур), в пределах которых происходит погружение образований Курского блока на еще более значительные глубины. В целом рассматриваемая аномалия от глубинного положительно намагниченного объекта прослеживается на восток до площадей Прикаспийской впадины. Связывая эту аномалию с образованиями Курского мегаблока, приходим к выводу, что этот блок не рассекается Донецким рифтом, а прослеживается вдоль последнего на восток (возможно южный сегмент мегаблока частично отсечен рифтом).

В гравитационном поле отображение рассматриваемого мегаблока более сложное. Северной половине его (до междвиговой зоны) соответствует в целом пониженное поле силы тяжести, что связано с пониженными плотностями кремнисто-сланцевых образований в составе мегаблока. Наиболее яркая аномалия (средняя из трех изометричных) в значительной мере связана с агломератами Каменской астроблемы, характеристика которой приведена в работе [Мовшович, Милявский, 1975]. Природа поперечных повышений поля силы тяжести, осложняющих эту зону, видимо, обусловлена поперечными палеорифтами, в пределах которых образования Курского блока погружены на значительные глубины, а породы, слагающие рифтовые структуры, являются более плотными. Повышенные значения поля силы тяжести, увеличивающиеся при приближении к Прадонецкому рифту, соответствуют той части мегаблока, которая расположена южнее междвиговой зоны. Подобное увеличение поля силы тяжести связываем с тем обстоятельством, что породы каменноугольного возраста в пределах ДСС являются, хотя и слабо, но метаморфизованными и поэтому их плотность выше, чем у неметаморфизованных пород того же возраста в составе осадочного чехла склона Воронежской антеклизы. Увеличение мощности складчатого карбона в южном направлении, естественно сопровождается увеличением аномалий поля силы тяжести. В то же время, в магнитном поле смена платформенного карбона складчатым фактически не отразилась. Прослеживается лишь общее снижение интенсивности аномального поля в южном направлении в связи с погружением поверхности мегаблока.

Знакопеременное магнитное поле в северной части региона (первый тип) обусловлено породами Лосевского вулcano-плутонического пояса. Соответствующее этим площадям гравитационное поле слабоповышенное, малоамплитудное. Резкое понижение магнитного поля в юго-западной части анализируемого региона интерпретируется как результат погружения образований Курского мегаблока на большие глубины в пределах Прадонецкого рифта. Возможно аномалиеобразующие объекты, содержащие ферромагнетики, оказались в условиях температур, превышающих точку Кюри (в Донбассе по изотерме 580 °С [Гордиенко и др., 2015]).

Основываясь на изложенной выше схеме интерпретации гравитационного и магнитного полей, а также дополнительно привлекая к потенциальным полям имеющиеся сейсморазведочные профили, сформирована концептуальная модель глубинного строения анализируемого региона. В графическом виде она представлена на рис. 3, в текстовом варианте изложена в Заключение.

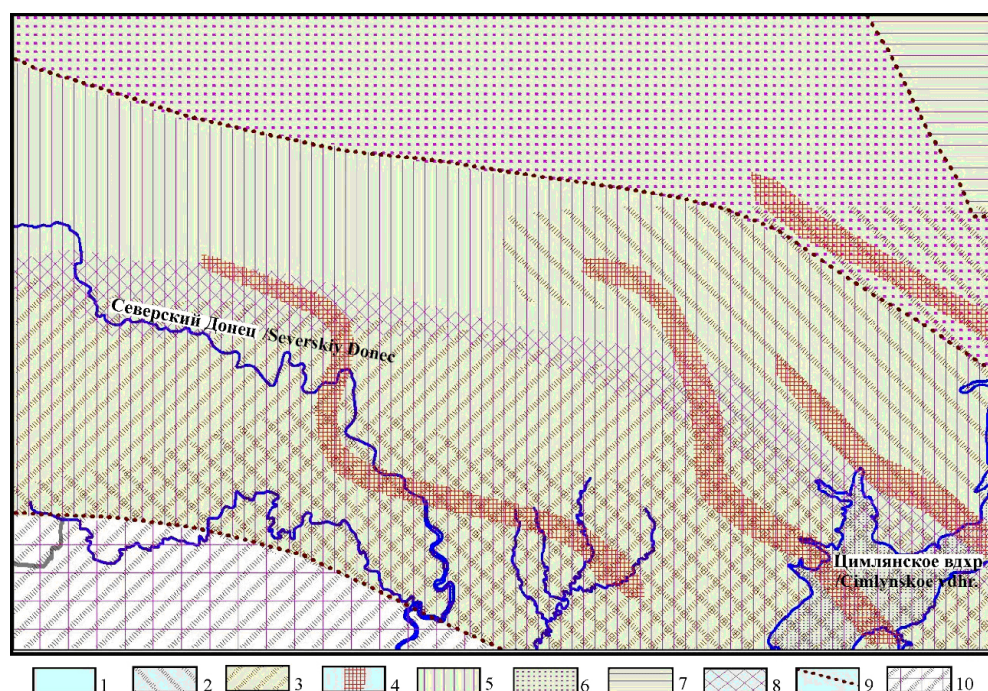


Рис. 3. Схема глубинного строения зоны сочленения южного склона Воронежского кристаллического массива и Донецкой складчатой системы (концептуальная модель):

- 1 – области с дорифейской консолидированной корой; 2 – то же с рифтогенной переработкой в рифее; 3 – то же с рифтогенной переработкой в позднем палеозое;
- 4 – прогнозируемые осевые зоны отдельных рифтов рифейского возраста;
- 5–7 надпорядковые элементы дорифейского фундамента: 5 – Курский мегаблок; 6 – Лосевская шовная зона; 7 – Калачско-Эртильский мегаблок; 8 – межнадвиговая зона в осадочном чехле (рассматривается как зона сочленения южного склона антеклизы и Донецкой складчатой системы); 9 – границы мегаблоков; 10 – область байкальской консолидации с переработкой в позднем палеозое /

Fig. 3. Diagram of the deep structure of the junction zone of the southern slope of the Voronezh crystalline massif and the Donetsk folded system (conceptual model):

- 1 – areas with pre-Riphean consolidated crust; 2 – the same with riftogenic processing in the Riphean; 3 – the same with riftogenic processing in the Late Paleozoic; 4 – predicted axial zones of individual rifts of Riphean age; 5-7 superorder elements of the pre-Riphean basement: 5 – Kursk megablock; 6 – Losev seam zone; 7 – Kalachsko-Ertitsky megablock; 8 – the inter-thrust zone in the sedimentary cover (considered as the junction zone of the southern slope of the antecline and the Donetsk folded system); 9 – the boundaries of megablocks; 10 – the area of Baikal consolidation with processing in the Late Paleozoic /

Закключение

Основные положения концептуальной модели глубинного строения зоны сочленения Донецкой складчатой системы и Воронежского кристаллического массива, основанные на геофизических данных, сводятся к следующему.

В зоне сочленения Донецкой складчатой системы и Воронежского кристаллического массива по результатам интерпретации геофизических данных выделены геодинамически однородные сегменты в пределах Курского, Калачско-Эртильского мегаблоков. Сегмент Курского мегаблока в пределах южного склона Воронежского кристаллического массива прослеживается вдоль Прадонецкого рифта рифейского

возраста к площадям Прикаспийской впадины. Площади юго-восточной части этого сегмента Курского мегаблока, а также самой южной части Лосевской шовной зоны рассматриваются как претерпевшие существенную рифтогенную переработку в рифейское время (на рис. 3 показаны осевые зоны прогнозируемых рифтов). Западная и южная границы Калачско-Эртильского мегаблока, представленного в пределах рассматриваемого региона Воронцовской впадиной (выполнена флишоидной углеродисто-терригенно-сланцевой формацией), оконтуривают слабопониженное магнитное и гравитационное поле (прослеживается в основном уже за пределами рассматриваемых площадей). Лосевская шовная зона соответствует площади развития знакопеременного магнитного поля (первый тип) между Курским и Калачско-Эртильским мегаблоками. Прадонецкому рифту соответствует зона линейной складчатости Донецкого складчатого сооружения, а площадям южной части Курского мегаблока соответствует область мелкой складчатости каменноугольной толщи (складчато-надвиговый тип покровной складчатости). Прогнозируемые образования рифейского возраста могут быть отнесены к доплитному (переходному) комплексу.

Литература

1. Антипов М.П., Быкадоров В.А., Волож Ю.А., Леонов Ю.Г., Хераскова Т.Н. Консолидированная кора Каспийского региона. Опыт районирования. – Труды Геологического института. Вып. 593. М.: ГЕОС, 2010. – 64 с.
2. Аплонов С.В., Лебедев Б.А. Нафторудогенез: пространственные и временные соотношения гигантских месторождений. М.: Научный мир, 2010. – 224 с.
3. Бородулин Н.И. Геофизический сборник. Киев: Наукова Думка, 1973. Вып. 56. – С. 20–28.
4. Буш В.А. Глубинное строение фундамента Скифской плиты. // Геотектоника. – 2014. – № 6. – С. 39–54. DOI: 10.7868/S0016853X14060022.
5. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. Тепловое поле Донбасса. // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37. № 6. – С. 3–23. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111169.
6. Грановский А.Г., Грановская Н.В. Тектоническое строение зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты (территория Ростовской области). // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2019. – № 1. – С. 16–23. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-1-16-23.
7. Крутиховская З.А., Завойский В.Н., Подолянко С.М., Савенко Б.Я. Намагниченность пород железорудных формаций Большого Кривого Рога и КМА. Киев: Наукова Думка, 1964. – 179 с.
8. Лёвин Ф.Д., Буш В.А., Павлов С.А., Могилевский В.Е. Современная активность глубинных тектонических границ земной коры. // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 7. – С. 60–64.
9. Матишов Г.Г., Парада С.Г., Давыденко Д.Б. Технологии прогнозирования залежей углеводородов и минеральных месторождений будущей России (на примере Южного региона). // Геология и геофизика Юга России. – 2011. – № 1. – С. 20–31.
10. Мовшович Е.В., Милявский А.Е. Проблемы происхождения северодонецкого «агломерата». // Геотектоника. – 1975. – № 2. – С. 114–124.
11. Парада С.Г. О литогенной природе золотоносной минерализации в докембрийских псефитах Ростовского выступа Украинского щита. // Руды и металлы. – 2019. – № 4. – С. 53–57. DOI: 10.24411/0869-5997-2019-10031.
12. Парада С.Г. Геодинамические обстановки формирования рудно-магматических систем Восточного Донбасса по петрохимическим данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 120–130. DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009.

13. Хераскова Т.Н., Волож Ю.А., Антипов М.П., Быкадоров В.А., Пати́на И.С., Сапожников Р.Б. Строение зоны сочленения микроконтинентов сарматия, волгоуралия и фенно-скандия в составе фундамента Восточно-Европейской платформы. // Литосфера. – 2023. – Т. 23. № 3. – С. 309–324. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-3-309-324.
14. Чернышов Н.М., Сиротин В.И., Ненахов В.М. Геодинамика и металлогения европейской части центральной России. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 1996. – № 2. – С. 201–204.
15. Brunet M.-F., Volozh Y.A., Antipov M.P., Lobkovsky L.I. The geodynamic evolution of the Precaspian Basin (Kazakhstan) along a north-south section. // Tectonophysics. – 1999. – Vol. 313. No. 1-2. – pp. 85–106. DOI: 10.1016/S0040-1951(99)00191-2.
16. Chernyshov N.M., Nenakhov V.M., Lebedev I.P., Strik Yu.N. A model of geodynamic history of the Voronezh massif in the early Precambrian. // Geotectonics. – 1997. – Vol. 31. No. 3. – pp. 186–194.
17. Davydenko D.B. Activation of formation of hydrocarbon fluidizites under the conditions of shear geodynamic regime of the Caspian region (Russian–Kazakh sector, Russia). // Geotectonics. – 2020. – Vol. 54. No. 5. – pp. 665–678. DOI: 10.1134/S0016852120050039.
18. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. // Geotectonics. – 2018. – Vol. 52. No. 4. – pp. 485–498. DOI: 10.1134/S0016852118040039.
19. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia). // Tectonophysics. – 2003. – Vol. 373. – pp. 181–207. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00290-7.
20. Zaitsev A.V., Zelenshchikov G.V., Granovskii A.G., Ryshkov M.M. Geology and geodynamics of precambrian structures at the junction of the Voronezh crystalline massif and Rostov tectonic inlier. // Doklady Earth Sciences. – 2003. – Vol. 392. No. 7. – pp. 925–927.

Reference

1. Antipov M.P., Bykadorov Y.A., Volozh Yu.A., Leonov Yu.G., Kheraskova T.N. Consolidate crust of Caspian Region. Experience of zoning. Proceedings of the Geological Institute. Issue 593. Moscow. GEOS. 2010. 64 p. (In Russ.)
2. Aplonov S.V., Lebedev B.A. Naphtha-oregenesis: spatial and temporal relations of giant deposits. Moscow. Nauchnyi Mir. 2010. 224 p. (In Russ.)
3. Borodulin N.I. Geophysical Collection. Kiev. Naukova Dumka. 1973. Issue 56. pp. 20–28. (In Russ.)
4. Bush V.A. Deep structure of the basement of the Scythian plate. Geotectonics. 2014. No. 6. pp. 39–54. DOI: 10.7868/S0016853X14060022. (In Russ.)
5. Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnyaya O.V. Thermal field of Donbass. Geophysical Journal. 2015. Vol. 37. No. 6. pp. 3–23. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111169. (In Russ.)
6. Granovsky A.G., Granovskaya N.V. Tectonic structure of the junction zone of the East European platform and Scythian plate (territory of Rostov region). In: Proceedings of higher educational institutions. Geology and exploration. 2019. No. 1. pp. 16–23. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-1-16-23. (In Russ.)
7. Krutikhovskaya Z.A., Zavoysky V.N., Podolyanko S.M., Savenko B.Ya. Magnetization of rocks of iron ore formations of Bolshoy Krivoy Rog and KMA. Kiev. Naukova Dumka. 1964. 179 p. (In Russ.)
8. Levin F.D., Bush V.A., Pavlov S.A., Mogilevskii V.E. Modern activity of deep tectonic boundaries of the Earth's crust. Exploration and protection of mineral resources. 2011. No. 7. pp. 60–64. (In Russ.) (In Russ.)
9. Matishov G.G., Parada S.G., Davydenko D.B. The technologies of forecasting carbohydrate fields and mineral deposits of the future Russia (on example of the Southern region). Geology and Geophysics of Russian South. 2011. No. 1. pp. 20–31. (In Russ.)

10. Movshovich E.V., Miliavsky A.E. Problems of the origin of the North Donetsk “agglomerate”. *Geotectonics*. 1975. No. 2. pp. 114–124. (In Russ.)
11. Parada S.G. Lithogenic nature of gold-bearing mineralization in Pre-cambrian psephites of the Rostov ledge, Ukrainian shield. *Ores and Metals*. 2019. No. 4. pp. 53–57. DOI: 10.24411/0869-5997-2019-10031. (In Russ.)
12. Parada S.G. Geodynamic conditions of formation of ore-magmatic systems of Eastern Donbass according to petrochemical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 122–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.87.15.009. (In Russ.)
13. Kheraskova T.N., Volozh Yu.A., Antipov M.P., Bykadorov V.A., Patina I.S., Sapozhnikov R.B. Junction zone structure of the Sarmatia, Volgaurlia and Fennoscandia microcontinents as part of the East European Platform basement. *Lithosphere*. 2023. Vol. 23. No. 3. pp. 309–324. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-3-309-324. (In Russ.)
14. Chernyshov N.M., Sirotin V.I., Nenakhov V.M. Geodynamics and metallogeny of the European part of central Russia. *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 1996. No. 2. pp. 201–204. (In Russ.)
15. Brunet M.-F., Volozh Y.A., Antipov M.P., Lobkovsky L.I. The geodynamic evolution of the Precaspian Basin (Kazakhstan) along a north-south section. *Tectonophysics*. 1999. Vol. 313. No. 1-2. pp. 85–106. DOI: 10.1016/S0040-1951(99)00191-2.
16. Chernyshov N.M., Nenakhov V.M., Lebedev I.P., Strik Yu.N. A model of geodynamic history of the Voronezh massif in the early Precambrian. *Geotectonics*. 1997. Vol. 31. No. 3. pp. 186–194.
17. Davydenko D.B. Activation of formation of hydrocarbon fluidizites under the conditions of shear geodynamic regime of the Caspian region (Russian–Kazakh sector, Russia). *Geotectonics*. 2020. Vol. 54. No. 5. pp. 665–678. DOI: 10.1134/S0016852120050039.
18. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No. 4. pp. 485–498. DOI: 10.1134/S0016852118040039.
19. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia). *Tectonophysics*. 2003. Vol. 373. pp. 181–207. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00290-7.
20. Zaitsev A.V., Zelenshchikov G.V., Granovskii A.G., Ryshkov M.M. Geology and geodynamics of Precambrian structures at the junction of the Voronezh crystalline massif and Rostov tectonic inlier. *Doklady Earth Sciences*. 2003. Vol. 392. No. 7. pp. 925–927.

УДК 551.248.2

DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005

Оригинальная статья

Структуры альпийского орогенеза южного склона Западного сегмента Большого Кавказа в связи с обеспечением безопасности площадок инженерных сооружений

В.М. Макеев¹, М.О. Ревазов¹, Е.А. Пикулик², Е.А. Фикри²

¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: r.m.o.1998@mail.ru;

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., 13, стр. 2

Статья поступила: 27.09.2024, доработана: 05.12.2024, принята к публикации: 06.12.2024

Резюме: Актуальность работ связана с решением научных задач относительно происхождения новейших структур, механизмов их развития и обеспечения геодинамической безопасности площадок инженерных объектов. Активные разломы, зоны высокоградиентных деформаций и сейсмотектонические процессы могут быть связаны не только с хорошо изученными блоковыми структурами, но и с менее исследованными изгибными структурами, которые выявляются в рельефе как поднятия и прогибы. **Цель исследований** – выявление и оценка разнотипных по происхождению структур южного склона Западного сегмента Большого Кавказа альпийской стадии орогенеза для обеспечения безопасности площадок инженерных объектов повышенного уровня ответственности. **Методы.** Исследования проводились структурно-геодинамическим, структурно-геоморфологическим, структурно-кинематическим и структурно-вещественными методами с использованием данных буровых, геофизических и полевых маршрутных наблюдений. **Результаты работ.** На южном склоне Западного Кавказа в альпийскую стадию орогенеза формируется два типа структур разного простирания: 1) общекавказского и 2) антикавказского. Для первых характерно образование поднятий и прогибов, для вторых – развитие относительно узких грабенообразных понижений и горстов со сдвиговой составляющей. Глубоководная Восточно-Черноморская впадина и горно-складчатое сводовое поднятие Большого Кавказа – источники современных напряжений. На южном склоне под их влиянием образуются общекавказские и антикавказские структуры, которые пересекаются и формируют перекрестно-структурный план, способствующий проявлению сейсмической активности на глубинах 10-15 км. Площадка инженерных сооружений ОСК «Бзугу», расположенная в районе Большого Сочи Туапсинско-Адлерской новейшей депрессии, представлена позднеолигоценowymi складчатыми структурами, перекрытыми голоценовыми аллювиальными отложениями. Подошва голоценовых отложений плавно изгибается в виде структурных террас, структурных заливов и флексур общекавказского простирания. Изгибы соответствуют малоградиентным современным деформациям платформенного типа. Это указывает на отсутствие активных разрывных нарушений и нахождение площадки в безопасных условиях.

Ключевые слова: изгибные структуры, орогенез, неотектоника, складки, разрывы, напряжения сжатия и растяжения, безопасность, сейсмичность.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, код: FMSM-2022-0013 и госзаданию Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, № 122022400105-9.

Для цитирования: Макеев В.М., Ревазов М.О., Пикулик Е.А., Фикри Е.А. Структуры альпийского орогенеза южного склона Западного сегмента Большого Кавказа в связи с обеспечением безопасности площадок инженерных сооружений. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 39-53. DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005

DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005

Original paper

Alpine orogenesis structures of southern slope of the Greater Caucasus Western segment related to the ensuring safety of engineering sites

V.M. Makeev¹, M.O. Revazov¹, E.A. Pikulik², E.A. Fikri²

¹ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: r.m.o.1998@mail.ru;

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
13 Ulansky Lane, 2 p., Moscow 101000, Russian Federation

Received: 27.09.2024, revised: 05.12.2024, accepted: 06.12.2024

Abstract: Relevance of the paper is associated with the solution of scientific problems regarding the origin of the recent structures, mechanisms for their development and ensuring the geodynamic safety for engineering sites. Active faults, high-gradient deformation zones and seismotectonic processes can be associated not only with well-studied block structures but also with less studied flexible structures that are revealed in relief as uplifts and depressions. **Aim of the research** is to identify and evaluate the origin for different types structures of the southern slope of the Greater Caucasus Western segment of the alpine stage orogenesis for ensuring safety of engineering sites with a high importance level. **Methods.** The studies were conducted by structural-geodynamic, structural-geomorphological, structural-kinematic and structural-substance methods using data of boring, geophysical and field route observations. **Results.** On the southern slope of the Western Caucasus in alpine stage orogenesis two structures types of different orientation are formed: 1) General-Caucasian and 2) Anti-Caucasian. The former are characterized by uplifts and depressions, while the latter is characterized by grabens and horsts with a shear component. The East-Black-Sea depression and the Greater Caucasus mountain-folded arched uplift are the sources of modern tension. General-Caucasian and Anti-Caucasian structures intersect and form a cross-structural plan. It contributes to the manifestation of seismicity at depths of 10-15 km. The Bzugu sewage treatment facilities site is located in the Greater Sochi region of the Tuapse-Adler recent depression, and it is represented by late Oligocene folded structures covered by Holocene alluvial deposits. The Holocene sediments bottom bends smoothly in the form of structural terraces, structural bays and flexures of the General-Caucasian orientations. The curves correspond to small-gradient recent deformations of the platform type. This indicates no active rupture and site safety.

Keywords: flexural structures, orogenesis, neotectonics, folds, faults, compression and extension stresses, safety, seismicity.

Acknowledgments: The research was carried out according to the state assignment of Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center RAS, code: FMSM-2022-0013 and the state assignment of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, No. 22022400105-9.

For citation: Makeev V.M., Revazov M.O., Pikulik E.A., Fikri E.A. Alpine orogenesis structures of southern slope of the Greater Caucasus Western segment related to the ensuring safety of engineering sites. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 39-53. DOI: 10.46698/VNC.2024.83.53.005

Введение

Район исследований Большой Сочи расположен в широкой зоне сопряжения южного склона Западного сегмента Большого Кавказа с Туапсинским прогибом Восточно-Черноморской впадины. В альпийском тектоно-магматическом цикле выделяются две новейшие стадии орогенеза, отчетливо выраженные в структурах и рельефе: раннеорогенная и позднеорогенная [Несмеянов, Воейкова, 2020; Шолпо

и др., 1993; Милановский, 1968]. Раннеальпийская стадия орогенеза (раннеорогенная) проявилась в образовании позднеолигоценовых (эоценовых?) складчато-надвиговых структур, которые являются основанием для формирования разнотипных по морфологии структур позднеальпийской стадии, начиная с миоценового времени. Для этих стадий характерно развитие изгибных структур, которые являются предметом наших исследований.

Формирование новейших структур обычно связывается с тектоникой литосферных плит [Nikishin et al., 2021; Рогожин, 2009; Mozar et al., 2010]. В качестве основного источника тектонических напряжений и деформаций рассматривается конвергенция Скифского и Закавказского литосферных блоков. При этом воздействие со стороны Восточно-Черноморского глубинного прогиба Закавказской плиты на южный склон Западного сегмента Большого Кавказа до сих пор остается малоизученной проблемой. Исследования последних лет показывают, что динамическое воздействие от разных источников тектонических напряжений на менее активные объемы земной коры приводит к суперпозиции разнородных напряжений и формированию геодинамически активных зон (ГДАЗ), как концентраторов напряжений и повышенных деформаций. Для их изучения разработана концепция современных геодинамических систем [Юдахин и др., 2003].

ГДАЗ – это пространственно локализованные линейные или изометричные зоны земной коры, в которых в силу различных причин имеются или могут возникать условия для концентрации и разрядки тектонических напряжений и повышенных градиентов деформаций горных пород. По этой причине они могут стать опасными для площадок инженерных объектов повышенного уровня ответственности наравне с активными разломами [Макеев и др., 2023]. Под активным разломом понимается, прежде всего, глубинная протяженная дислокация, подвижность (скорость) которой относится к текущему времени (up-to-date) [Макеев и др., 2023; Макеев и др., 2022]. Разломы, как правило, проявляются в деформациях четвертичных отложений и в рельефе в виде уступа или сгущения линеаментов и сопровождаются сейсмичностью (База данных активных разломов Евразии. М 1:1 000 000. <http://neotec.ginras.ru/database.html>. ГИН РАН. – 2018). В Центральной части Кавказа были проведены подобного типа геоэкологические исследования относительно сейсмической опасности [Заалишвили, Невская, 2014].

Методы исследования

Работа основана на применении структурно-геоморфологического, структурно-кинематического, вещественно-структурного и структурно-геодинамического методов. Структурно-геоморфологический метод позволяет определить тип рельефа и выделить новейшие и современные структуры, которые являются показателями современных тектонических процессов. Структурно-кинематический метод связан с реконструкцией полей напряжения на основе анализа закономерностей распространения структур; вещественно-структурный (литологический) метод нацелен на изучение вещественного состава, строения и генезиса пород. Структурно-геодинамический метод направлен на рассмотрение полей напряжений и их происхождения с целью выделения геодинамических систем. Исследования проведены с учетом данных полевых маршрутных наблюдений, фондовых буровых и геофизических материалов, топографических карт и цифровых моделей рельефа. В результате анализа геологического строения альпийских ранне- и позднеорогенных структур и

их зональности, а также детальных исследований на площадке ОСК «Бзугу», были получены данные, имеющие теоретическое и практическое значение.

Геологическое строение

Район Большого Сочи расположен на южном склоне Западного сегмента Большого Кавказа на сопряжении с Туапсинским прогибом Восточно-Черноморской глубоководной впадины [Овсюченко и др., 2013; Шолпо и др., 1993; Лаврищев и др., 2000] (рис. 1).

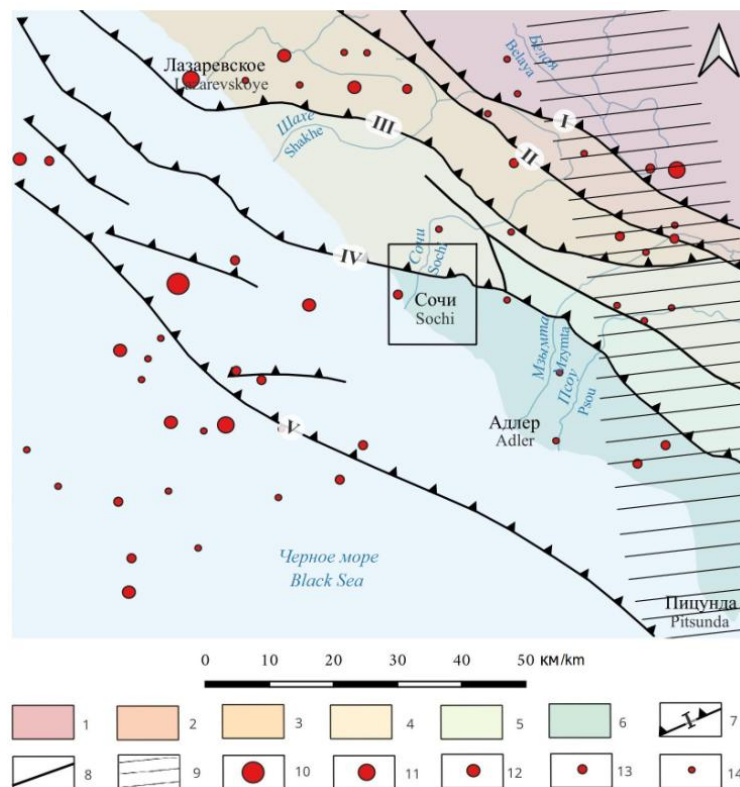


Рис. 1. Тектоническое строение зоны сочленения Западного сегмента Большого Кавказа и Восточно-Черноморской глубоководной впадины с эпицентрами землетрясений [Овсюченко и др., 2013; Шолпо и др., 1993; Лаврищев и др., 2000]

Альпийские структуры: 1-2 – центральный антиклинорий: 1 – Чугушское поднятие (зона Главного хребта), 2 – Гойтхский антиклинорий; 3-5 – Новороссийский синклиний: 3 – Лазаревская зона, 4 – Чвежипсинская синклиальная зона, 5 – Ахцу-Кацирха шовная (антиклинальная) зона; 6 – Адлерская депрессия. 7 – крупные разрывные нарушения: I – Главный Кавказский надвиг, II – Бекишейский надвиг, III – Краснополянский надвиг, IV – Воронцовский надвиг, V – Черноморский взброс, 8 – разрывы неясного генезиса, 9 – Пшехско-Адлерская поперечная флексурно-разломная зона. Эпицентры землетрясений и их энергетический класс: 10 – 13,0; 11 – 12,0; 12 – 11,5-10,5; 13 – 10,5-9,5; 14 – 9,5-8,5. Положение района детальных исследований обозначено прямоугольником /

Fig. 1. Tectonic structure of the junction zone of the Greater Caucasus Western segment and the East Black Sea deep-sea basin with earthquake epicenters [Ovsyuchenko et al., 2013; Sholpo et al., 1993; Lavrishchev et al., 2000]

Alpine structures: 1-2 – central anticlinorium: 1 – Chugush Uplift (Main Range zone), 2 – Goytkh anticlinorium; 3-5 – Novorossiysky synclinorium: 3 – Lazarevskaya zone, 4 – Chvezhipsinskaya synclinal zone, 5 – Akhtsu-Katsirkha suture (anticlinal) zone; 6 – Adler depression. 7 – large faults: I – Main Caucasian Thrust, II – Bekishei Thrust, III – Krasnopolyansky Thrust, IV – Vorontsovsky Thrust, V – Black Sea Reverse Fault, 8 – Ruptures of unknown origin, 9 – Pshekh-Adler transverse flexural-fault zone. Earthquake epicenters and their energy class: 10 – 13.0; 11 – 12.0; 12 – 11.5-10.5; 13 – 10.5-9.5; 14 – 9.5-8.5. The location of detailed research is showed by a rectangle

Во время конвергенции Скифского и Закавказского блоков (соответственно Евроазиатской и Аравийской литосферных плит) в позднем олигоцене-раннем миоцене ($P_3^{mv} + N_1^{kd}$) эти отложения подверглись складчато-надвиговым деформациям с образованием серии надвигов чешуйчатого строения и структур с перевернутым залеганием [Дотдугев, 1989; Mosar et al., 2022] (рис. 2). Это время соответствует раннеальпийскому орогенезу с закрытием краевых (передовых) прогибов. Адлерская депрессия с расположенным в ее пределах районом Большой Сочи относится к подобному типу прогибов.



Рис. 2. Наклонные складки с подворотом крыльев в отложениях позднего олигоцена в районе н.п. Семеновка /

Fig. 2. Inclined folds with wing folds in late Oligocene deposits in the area of the Semenovka village

Позднеальпийский орогенез начался в миоцене – раннем-среднем сармате. С этого времени отмечается поднятие территории и закрытие раннеорогенных краевых прогибов, в т.ч. Адлерского на юге (Гагро-Джавской структурно-формационной зоны) и Майкопского на севере Кавказа (Терско-Самурской зоны). В позднем сармате начинают формироваться горно-складчатое сооружение Большого Кавказа, Терско-Каспийская и Туапсинская предгорные впадины. Последняя находится в акватории Черного моря. Заложение впадин происходит в несколько иных границах, отличающихся от предыдущих краевых прогибов, поскольку их отложения несогласно залегают на подстилающих отложениях серравальского яруса [Лаврищев и др., 2000; Adamia, 2011]. В плиоцен-четвертичное время произошло окончательное оформление сводового поднятия Большого Кавказа и предгорных впадин в том виде, в каком наблюдаются ныне.

Структуры альпийского орогенеза и условия их формирования

Новейший этап, начавшийся с олигоцена (P_3), а некоторыми исследователями начало этапа принимается с эоцена, делится на две стадии орогенеза: раннеальпийскую и позднеальпийскую [Милановский, 1968; Mikhailov, 1999].

Структуры раннеальпийского орогенеза. К раннеальпийскому орогенезу относятся складчато-надвиговые структуры Гагро-Джавской структурно-формационной зоны, развитые по палеоген-ранне-неогеновым отложениям. В рельефе их наследуют протяженные поднятия и прогибы – изгибные деформации СЗ простирания (рис. 3). Интенсивность развития изгибных форм в пространстве неравномерная. На севере, где на поверхность выходят породы палеозойского возраста и древнее, поднятия широкие и протяженные. К югу, к побережью Черного моря, где распространены менее консолидированные палеоген-четвертичные отложения, они

становятся более узкими и протяженными. При этом ширина прогибов увеличивается. Это может быть связано с изменением возраста, состава и строения подстилающих пород в условиях однородных напряжений или снижения их активности по латерали с юга на север [Яковлев и др., 2008].

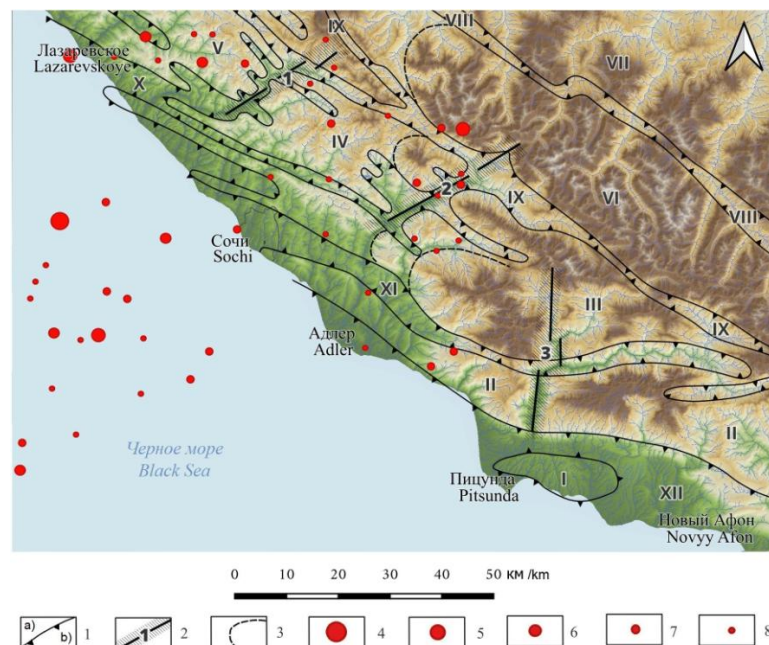


Рис. 3. Альпийские структуры изгибного типа южного склона Западного сегмента Большого Кавказа поздней стадии орогенеза

1 – структуры изгибной формы: а) поднятия, б) прогибы; 2 – трансзональные структурные линии (линеаменты) и их номер; 3 – предполагаемые периклинальные замыкания поднятий.

Поднятия: Пицундинское (I), Бзыбское (II), Дзюу-Пластунское (III), Большечуринское (IV), Аутлинское (V), Аксаутское (VI), Урупское (VII). Прогибы: Архыз-Умпырский (VIII), Верхне-Мзымта-Баусзский (IX), Кепшаский (X), Хашупса-Бзыбский (XI), Гудаута-Адлерский (XII).

Эпицентры землетрясений и их энергетический класс:

4 – 13,0; 5 – 12,0; 6 – 11,5-10,5; 7 – 10,5-9,5; 8 – 9,5-8,5 /

Fig. 3. Alpine structures of the flexural type of the southern slope Western segment Greater Caucasus the late stage of orogenesis

1 – flexural form structures: a) uplifts, b) downlifts; 2 – transzonal structural lines (lineaments) and their numbers; 3 – supposed periclinal closures of uplifts. Uplifts: Pitsundinskoye (I), Bzybskoye (II), Dzou-Plastunskoye (III), Bolshechurinskoye (IV), Autlinskoye (V), Aksautskoye (VI), Urupskoye (VII).

Downlifts: Arkhyz-Umpyrsky (VIII), Verkhne-Mzymta-Bauszky (IX), Kephshasky (X), Khashupsa-Bzybsky (XI), Gudauta-Adlersky (XII). Earthquakes epicenters and their energy class:

4 – 13.0; 5 – 12.0; 6 – 11.5-10.5; 7 – 10.5-9.5; 8 – 9.5-8.5.

Оси структурных форм не согласуются с простираением береговой полосы Черного моря. У берега развитие складок как бы «обрывается», что выражается в виде периклинальных замыканий. Южнее, где заканчивается континентальный шельф – в Туапсинской впадине, сопряженном с валом Шатского, сейсмическая активность не снижается, а происходит увеличение плотности сейсмичности [Горячев, 1985; Овсяченко и др., 2013; Рогожин, 2009]. Подобного типа активность приурочена к южному склону, сопряженному с опускающейся Восточно-Черноморской впадиной и поднятием Большого Кавказа. В сопряжении формируются морские террасы и эрозионно-денудационные ступени, наклоненные в сторону впадины, т.е. развивается черноморская эрозионно-денудационная зональность. Изгибные формы,

деформирующие эти поверхности, по-видимому, отражают процессы активности двух крупных форм земной коры – Восточно-Черноморской впадины, у которой отмечается сильно редуцированная земная кора, и Большекавказского поднятия с увеличенной мощностью коры.

Структурный рисунок изгибных форм СЗ простирания разбивается поперечными трансзональными линеаментами, пересекающими сразу несколько поднятий и прогибов. Возможно, они отражают зоны разрывных нарушений предположительно сбросового характера. В зонах линеаментов поднятия испытывают виргацию с образованием ряда локальных складок. Например, у Дзоу-Пластунского поднятия отмечается периклинальное замыкание и опускание шарнира в зоне линеамента. Это приводит к расщеплению поднятия на ряд складок. К поперечным линеаментам приурочены речные долины с антецедентным характером развития, пересекающие также несколько поднятий. Такое строение линеаментов указывает на формирование их в условиях более глубинных полей напряжений, чем у полей напряжений более приповерхностных поднятий и прогибов. Очевидно, что глубинный и приповерхностный структурные планы развиваются в разных геодинамических обстановках, отвечающих сжатию и растяжению соответственно [Макеев и др., 2023; Макеев и др., 2022; Борукаев и др. 1981].

Разнотипные напряжения вследствие интерференции могут складываться и усиливаться и, наоборот, вычитаться и ослабляться, что является отражением глубинной расслоенности литосферы по геодинамическим и тектоническим условиям. Результатом такой расслоенности является сейсмическая активность, локализованная преимущественно на глубинах 10-15 км [Чотчаев и др., 2021].

Структуры позднеальпийского орогенеза. В ходе детальных структурно-геоморфологических исследований выделены относительно широкие эрозионно-денудационные ступени позднеплиоцен-раннечетвертичного возраста, снижающиеся от высокогорья Главного Кавказского хребта в сторону морского побережья. На рассматриваемой территории установлено три эрозионно-денудационные ступени: первая относительно высокая с абс. отм. ~400-500 м; вторая средняя ~300-400 м и третья низкая ~200-300 м и менее. Согласно датировкам, их возраст определен как позднеплиоценовый, эоплейстоценовый и раннечетвертичный соответственно [Несмеянов, Воейкова, 2020]. Все они относятся к Навагинской ступени южного склона Западного Кавказа, превышения которой варьируют по высоте по причине деформаций, продолжающихся поныне.

По морфологии и простиранию различаются общекавказские и антикавказские структуры.

1) Общекавказские структуры (продольные) СЗ простирания представлены изгибными формами (поднятиями и прогибами), разрывными нарушениями и флексурами (рис. 4). В прибрежной зоне общекавказские поднятия сопряжены с прогибами. К юго-востоку от Сочи прибрежное поднятие согласуется с антиклиналью СЗ простирания, развитой в позднепалеогеновых отложениях. Сопряженный с ним прогиб – с синклиналью. Поднятия часто приурочены к границе двух эрозионно-денудационных ступеней, расположенных на разных высотах. Такие поднятия, как правило, являются валообразными, не протяженными, прерывистыми по простиранию и часто приуроченными к поднятому крылу раннеорогенного взброса или надвига. Граница двух разновысотных ступеней может являться выражением флексур, у которых коленообразный изгиб падает в сторону Черного моря. Морфологиче-

ские особенности изгибных форм, включая их асимметрию, указывает на образование их в условиях напряжений растяжения, наведенных со стороны моря.

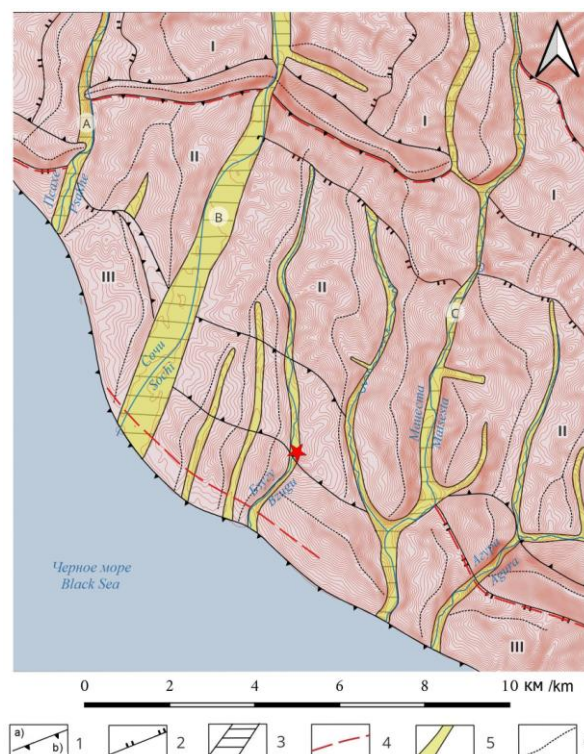


Рис. 4. Разнотипные структуры Большого Сочи и его окрестностей
(изогипсы рельефа построены по ЦМР)

1 – изгибные формы общекавказского простирания: а) поднятия, б) прогибы; 2 – тыловой шов эрозионно-денудационных ступеней и их номер: I (низкая), II (средняя) и III (высокая), часто соответствующий флексурам; 3 – структуры антикавказского простирания. Геодинамически активные зоны, выраженные прогибами: Псахеским (А), Сочинским (В) и Мацестинским (С); 4 – зоны разрывных нарушений (надвигов и взбросов), 5 – структуры, соответствующие отрицательным формам рельефа (долинам рек); 6 – структурные линии, отвечающие положительным формам рельефа (водоразделам). Красной звездочкой отмечен инженерный объект ОСК «Бзугу» /

Fig. 4. Different types of Greater Sochi structures and environs (Relief using DEM)

1 – flexural forms of the Pan-Caucasian orientation: a) uplifts, b) downlifts;
2 – back suture of erosion-denudation steps and their number: I (low), II (medium) and III (high), often corresponding to flexures;
3 – structures of the Anti-Caucasian orientation. Geodynamically active zones expressed by downlifts: Psakhetskym (A), Sochinskim (B) and Matsestinskim (C);
4 – zones of faults (thrusts and reverse faults), 5 – structures corresponding to negative relief forms (river valleys); 6 – structural lines corresponding to positive relief forms (watersheds).
The engineering object of the Bzugu OSC is marked a red star

2) Антикавказские структуры (поперечные) представлены узкими грабенообразными понижениями и широкими горстовыми поднятиями антикавказского (поперечного) С-СВ простирания. Они формируются поперек простирания общекавказских структур и, возможно, отражают строение трансзональных поперечных зон линейментов, охарактеризованных выше (см. рис. 3)

Антикавказские структуры не везде одинаково отчетливо проявлены в рельефе. Наиболее яркие – это грабенообразные прогибы. Менее выражены горсты. Первые

устанавливаются по характерным долинам рек Сочи, Псахе и Мацеста, наследующим грабены. Вторые – по простиранию пологих водоразделов, сопряженных с грабенами (см. рис. 4). В правом борту Сочинского грабена установлено сбросовое нарушение, по которому этот борт максимально приподнят относительно поймы (Мамайский горст) [Несмеянов, Воейкова, 2020]. На пересечении грабена с валом общекавказского простирания у последнего отмечается выгиб в северном направлении. На этом участке прогиб сужается, а долина реки приобретает antecedentное строение.

Субпараллельно Сочинскому грабену простираются Псахеское и Мацестинское узкие понижения, сопряженные с горстами, которые также относятся к структурам растяжения. При пересечении их валами общекавказского простирания строение последних изменяется. В Псахеском и Мацестинском понижениях развитие валов прерывается. При этом происходит подворот периклинальных замыканий против часовой стрелки. Это рассматривается как проявление деформаций левостороннего сдвига. На правобережьях речных долин установлены горстовые поднятия с отчетливо выраженными протяженными плоскими водоразделами. В предгорной и прибрежной частях они пересекают валы СЗ простирания, у которых могут увеличиваться поперечные размеры. Динамическое воздействие грабенообразных понижений на смежную с ними территорию позволяет рассматривать Сочинское, Псахеское и Мацестинское понижения в качестве геодинамически активных зон (ГДАЗ).

Таким образом, для района Большой Сочи характерно развитие двух типов структур: 1) общекавказских и 2) антикавказских. Для первых характерно развитие поднятий и прогибов, включая валы, наследующих раннеорогенное складчатое основание (антиклинали, взбросы и надвиги). Их формирование происходит в условиях латеральных приповерхностных субмеридиональных напряжений растяжения, вызванных со стороны прогибающейся Восточно-Черноморской впадины. Напряжения растяжения действуют по геодинамическому принципу «тяги». Для вторых характерно образование узких грабенообразных понижений со сдвиговой составляющей и горстовых поднятий. Эти структуры – более глубинные трансзональные, формирующиеся в условиях субширотных напряжений растяжения. Их активность вызвана глубинными напряжениями сжатия, действующими по принципу «толкай» со стороны Восточно-Черноморской впадины.

Согласно концепции разнородности и разнотипности источников напряжений и деформаций, выделяется Восточно-Черноморская геодинамическая система, связанная с особенностями эволюции тектоники литосферных плит и блоков [Макеев и др., 2023]. Суперпозиция разнородных напряжений вызывает расслоенность литосферы на разных глубинных уровнях, что приводит к образованию общекавказских и антикавказских структур и формированию перекрестно-структурного плана на южном склоне Западного сегмента Большого Кавказа. Согласно сейсмотектоническим исследованиям очаги землетрясений приурочены преимущественно к глубинам 10-15 км.

Современные деформации площадки ОСК «Бзугу» и их оценка

Для выявления и оценки современных деформаций, включая разрывные нарушения площадки ОСК «Бзугу» впервые исследовано ее геолого-геоморфологическое строение на основе инженерно-геологических, литологических и геолого-геофизи-

ческих данных, скважинной документации, с использованием цифровых моделей рельефа и опубликованных материалов [Горячев, 1985; Чотчаев и др., 2021] (рис. 5).

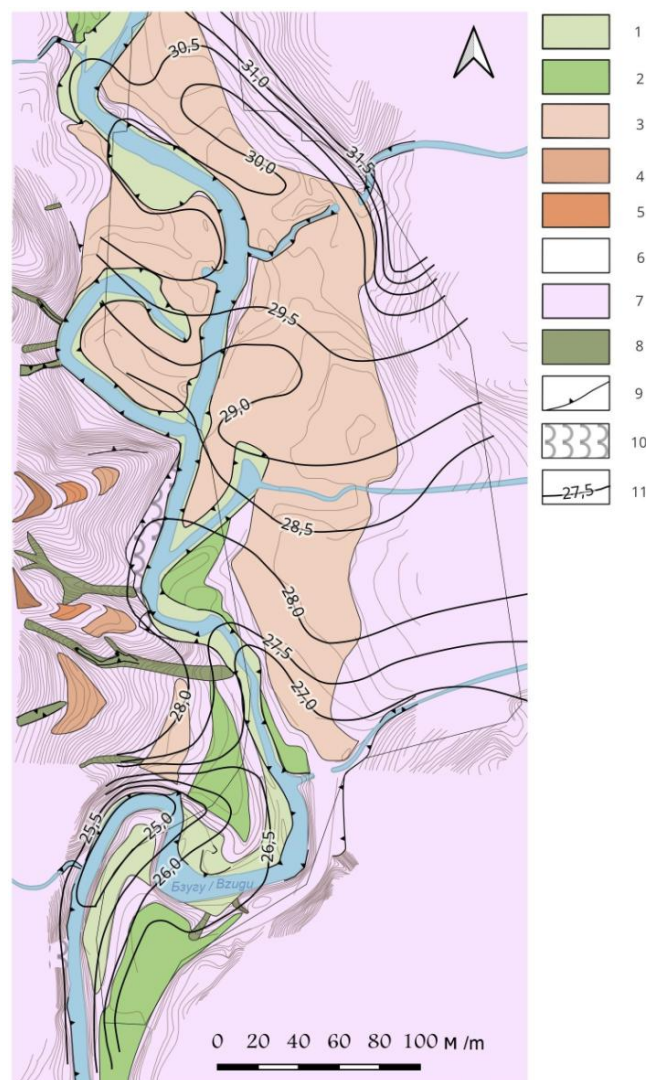


Рис. 5. Геолого-геоморфологическое строение площадки ОСК «Бзугу» и его окрестностей
Геоморфологические ступени, продатированные снизу-вверх от более молодых к более древним.

Пойменные отложения (Q_{IV}). Низкий уровень – Q_{IV}^2 (1, 2): 1 – абс. отм. <29 м
2 – абс. отм. 29-32 м. Высокий уровень – Q_{IV}^1 : 3 – абс. отм. 31-37 м. Ступени неясного генезиса, перекрытые делювием (предполагаемого возраста).
Верхний неоплейстоцен (Q_{III}) (4, 5): 4 – абс. отм. 40-45 м (Q_{III}^2); 5 – абс. отм. 45-48 м (Q_{III}^1). Средний неоплейстоцен (Q_{II}^2): 6 – абс. отм. >50 м. Эрозионные формы рельефа:
7 – склоны, 8 – ложбины, 9 – обрывы, 10 – оползневые склоны, 11 – изолинии погребенной поверхности коренных пород сочинской свиты верхнего палеогена по данным горных выработок и инженерно-геологических и геолого-литологических разрезов (абс. отм. изолиний с сечением 0.5 м) /

Fig. 5. Geological and geomorphological structure of the Bzugu OSC site and its environs
Geomorphological steps, dated from bottom to top from younger to more ancient. Floodplain deposits (Q_{IV}).

Low level – Q_{IV}^2 (1, 2): 1 – abs. marks <29 m 2 – abs. marks 29-32 m.

High level – Q_{IV}^1 : 3 – abs. marks 31-37 m. Steps of unknown genesis, covered by deluvium (of inferred age). Upper Neopleistocene (Q_{III}) (4, 5):

4 – abs. marks 40-45 m (Q_{III}^2); 5 – abs. marks 45-48 m (Q_{III}^1). Middle Neopleistocene (Q_{II}^2):

6 – abs. marks >50 m. Erosion relief forms: 7 – slopes, 8 – hollows, 9 – cliffs, 10 – landslide slopes, 11 – the buried surface isolines of the Upper Paleogene Sochi suite bedrocks (isolines abs. marks. section – 0.5 m)

Поскольку к настоящему времени рельеф и отложения претерпели значительные техногенные изменения, для оценки геолого-геоморфологического строения использованы топографические и др. карты, изготовленные до начала проведения планировочных работ на площадке, т.е. до 1975 г.

В пределах площадки распространены коренные породы сочинской свиты позднего олигоцена. На них лежат исключительно голоценовые пойменные отложения мощностью до 5 м. Поверхность коренных пород в течение последних 10-11 тыс. лет не подвергалась воздействию эрозионных процессов. Деформации, которые произошли за этот период, усиливались и сохранялись не измененными эрозией и денудацией. В этом отношении подошва голоцена является исключительной для выявления и оценки современных тектонических деформаций.

Структурно-геоморфологические, геолого-геофизические и полевые исследования позволили выявить аккумулятивные ступени голоценовой поймы и средне- и неоплейстоценовые речные террасы в долине р. Бзугу, перекрытые мощным слоем делювиальных отложений (3-5 м). Установлено три голоценовых уровня. Чем выше уровень, тем больше он деформирован. Первый – практически горизонтальный, второй – деформирован с вертикальной амплитудой 3 м. Третий уровень находится на разных высотах, амплитуда превышения которого составляет максимум 6 м. Исследования на площадке и маршрутные наблюдения в ее окрестностях не выявили разрывных нарушений в их классическом понимании со смещениями пород и ступенями в рельефе.

По буровым данным установлено, что подошва голоценовых отложений имеет изгибное строение в виде понижений и повышений (возвышений). Они интерпретируются как структурные заливы, структурные террасы и флексурные перегибы СЗ простирания. Вертикальные амплитуды изгибов подошвы голоцена (11 тыс. лет) составляют 5-10 м на базе (расстоянии) 90 м [Стратиграфический ..., 2019]. Градиент современных деформаций составляет 0,04-0,09 см/год, что сопоставимо с градиентами платформенного типа. Учитывая срок службы инженерных сооружений равный 100 годам, суммарный изгиб в зоне сопряжения понижения и возвышения составит от 4 до 9-10 см на базе 90-100 м.

Предыдущими исследователями были установлены зоны неотектонических нарушений субширотного и СЗ простирания на основании данных геолого-геофизических профилей, пересекающих площадку Бзугу [Горячев, 1985]. Однако строение подошвы голоценовых отложений над этими зонами не изменяется – отсутствуют смещения отложений. В окрестностях площадки не обнаружены деформации форм рельефа, характерные для активных разрывов. Поэтому, даже в случае их наличия, они не являются активными в голоценовое время. Следовательно, тектоническая и морфометрическая оценка разрывов не представляется возможной для определения критичности смещений под блоками инженерных сооружений [Свод ..., 2016].

В то же время следует отметить, что река Бзугу, протекающая с севера на юг, на выходе с площадки пересекает пологое поднятие общекавказского простирания (см. рис. 4). При пересечении поднятия долина реки сужается и изменяет свое простирание на ЮЗ, что указывает на то, что этот участок является antecedentным, приуроченным к растущему поднятию. На этом участке находится крайняя южная часть площадки. По данным скважин здесь отмечаются сдвиговые деформации и зеркала скольжения по границе сочинской и хостинской свит позднего олигоцена, принимаемой за разрывное нарушение.

Таким образом, деформации подошвы голоценовых отложений площадки ОСК «Бзугу» представлены изгибными формами СВ простирания, не имеющими отношения к разрывным нарушениям. Они согласуются со складками общекавказского простирания, развивающимися под влиянием напряжений растяжения субмеридиональной ориентации.

Выводы

Район Большого Сочи и прилегающие территории расположены в Туапсинско-Адлерской новейшей депрессии, сложенной олигоцен-нижнемиоценовыми отложениями, смятыми в раннеорогенные складчато-надвиговые структуры. Закрытие депрессии и частичное погружение ее западной части под акваторию Черного моря произошло в позднеорогенную стадию. Это время ознаменовалось преимущественным поднятием территории и формированием Навагинской эрозионно-денудационных ступени. К настоящему времени она претерпела деформации с образованием разнотипных поднятий, прогибов и разрывных нарушений общекавказского (СЗ) и антикавказского (С-СВ) простираний.

Для общекавказских структур характерно развитие прогибов и прерывистых по простиранию валообразных поднятий (изгибных форм), наследующих раннеорогенные складчато-разрывные структуры (синклинали, антиклинали и надвиги). Прогибы по форме часто согласуются с синклиналями, а валы – с надвигами и взбросами (например, с Воронцовскими). Для антикавказских структур закономерным является развитие относительно узких грабенообразных и широких горстообразных поднятий, несогласно наложенных на структуры складчато-разрывного основания. Геодинамические условия формирования разнотипных по простиранию структур различаются. Предполагается, что развитие первых происходит в условиях воздействия субмеридиональных напряжений растяжения, вызванных опусканием Восточно-Черноморской впадины. Вторые развиваются под влиянием глубинных напряжений сжатия, генерируемых в условиях конвергенции литосферных плит и активности впадины как очага, который является источником дополнительных напряжений.

Напряжения и деформации общекавказского и антикавказского простираний создают перекрестно-структурный план с образованием зон интерференций и геодинамически активных зон (ГДАЗ). Разнотипные структуры формируются в условиях сопряжения Восточно-Черноморского глубинного прогиба и сводового поднятия Большого Кавказа при активности литосферных плит и блоков. Такие условия вызывают расслоенность литосферы и сейсмическую активность на глубинах 10-15 км. Причинно-следственная связь разнородных факторов и геодинамических условий подтверждает выделение Восточно-Черноморской структурно-геодинамической системы как дополнительного источника напряжений и деформаций.

На площадке инженерных сооружений ОСК «Бзугу» голоценовые отложения, несогласно залегающие на смятых в складки породах позднего олигоцена, деформированы с образованием изгибных форм. Учитывая срок службы инженерных сооружений, равный 100 годам, суммарный изгиб в зоне сопряжения понижений и поднятий составит не более 10 см на базе 90-100 м. Такой градиент соизмерим с градиентом платформенных деформаций и не является опасным для площадок инженерных сооружений.

Литература

1. Борукаев Ч.Б., Расцветаев Л.М., Щерба И.Г. Мезозойские и кайнозойские олисто-стромы на южном склоне Западного Кавказа. // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 1981. – Т. 56. – Вып. 6. – С. 32–44.
2. Горячев М.И. Карта сейсмического микрорайонирования территории первоочередной застройки г. Большие Сочи. Пояснительная записка. СевКавТИСИЗ, фонды АПУ. Краснодар, 1985. – 37 с.
3. Дотдугев С.И. Мезозойско-кайнозойская геодинамика Большого Кавказа. Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. – С. 82–92.
4. Заалишвили В.Б., Невская Н.И. Геоэкологические аспекты эволюции природных и урбанизированных систем в условиях высокой сейсмической опасности (на примере Центральной части Кавказа). Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН, 2014. – 137 с.
5. Лаврищев В.А., Греков И.И., Башкиров А.Н. Геологическая карта РФ. М 1:200 000. Изд. 2е. Серия Кавказская. Лист К-37-IV (Сочи). СПб: ВСЕГЕИ, 2000. – 135 с.
6. Макеев В.М., Камболов Д.А., Ревазов М.О., Пикулик Е.А. Неотектоника и геодинамика зоны сочленения Северо-Западного Кавказа и Черноморской впадины (район г. Геленджик). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. №4(58). – С. 995–1007.
7. Макеев В.М., Ревазов М.О., Болотаева А.Г. Структурно-геодинамические исследования южного склона Большого Кавказа в районе Двалетского поднятия в связи с оценкой зон нарушений. // Геология и геофизика юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 32–43.
8. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. – 484 с.
9. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. Неотектоника Воронцовской зоны и проблема молодых надвигов на Западном Кавказе. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2020. – №4. – С. 3–20.
10. Овсяченко А.Н., Хилько А.В., Шварев С.В., Костенко К.А., Мараханов А.В., Рогожин Е.А., Новиков С.С., Ларьков А.С. Комплексные геолого-геофизические исследования активных разломов в Сочи–Краснополянском районе. // Физика Земли. – 2013. – №6. – С. 116–138.
11. Рогожин Е.А. Сейсмотектоника центрального сегмента Большого Кавказа для сейсмического мониторинга и оценки сейсмической опасности (Республика Южная Осетия: перспективы инновационного развития). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2009. – Т. 9. №4. – С. 16–22.
12. Свод правил СП 22. 13330.2016 «Основание зданий и сооружений». Приложение Е – Предельные дополнительные деформации основания фундаментов реконструируемых сооружений. – 2016. – 55 с.
13. Стратиграфический кодекс России (МСК – международный стратиграфический кодекс). Изд. 3е. Исправленное и дополненное. СПб: ВСЕГЕИ, 2019. – 96 с.
14. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 75–88.
15. Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. – 192 с.
16. Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 299 с.
17. Яковлев Ф.Л., Маринин А.В., Сим Л.А., Гордеев П.П. Поля тектонических напряжений и поля деформаций Воронцовского покрова (Северо-Западный Кавказ). // В сборнике: Проблемы тектонофизики. М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 319–333.
18. Adamia Sh., Zakariadze G., Chkhotua T., Sadradze N. et al. Geology of the Caucasus: a Review. // Turkish Journal of Earth Sciences. – 2011. – Vol. 20. – pp. 489–544.

19. Gamkrelidze I.P. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time. // *Tectonophysics*. – 1986. – Vol. 127. – pp. 261–277.
20. Mikhailov V.O. Evolution of the North Caucasus foredeep: Constraints based on the analysis of subsidence curves. // *Tectonophysics*. – 1999. – Vol. 307. No. 3-4. – pp. 361–379.
21. Mosar J., Kangarli T., Bochud M., Glasmacher U.A. et al. Cenozoic-Recent tectonics and uplift in the Greater Caucasus: a perspective from Azerbaijan. // *Geological Society of London, Special Publications*. – 2010. – Vol. 340. No. 1. – pp. 261–280.
22. Mosar J., Lavrishev M.V., Koiava K., Kalberguenova V.R. Tectonics in the Greater Caucasus (Georgia–Russia): from an intracontinental rifted basin to a doubly verging fold-and-thrust belt. // *Marine and Petroleum Geology*. – 2022. – Vol. 140. Art. No. 105630.
23. Nikishin A.M., Okay A.I., Tüysüz O., Demirel A. et al. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 1: Basins structure and fill. // *Marine and Petroleum Geology*. – 2015. – Vol. 59. – pp. 638–655.

References

1. Borukaev Ch.B., Rastsvetaev L.M., Shcherba I.G. Mesozoic and Cenozoic olistostromes on the southern slope Western Caucasus. *Bulletin of MOIP. Geological Department*. 1981. Vol. 56. Issue 6. pp. 32–44. (In Russ.)
2. Goryachev M.I. Map of seismic microzonation of the territory of primary development in Bolshye Sochi. Explanatory note. SevKav-TISIZ. APU funds. Krasnodar. 1985. 37 p. (In Russ.)
3. Dotduduev S.I. Mesozoic-Cenozoic geodynamics of the Greater Caucasus. *Geodynamics of the Caucasus*. Moscow. Nauka. 1989. pp. 82–92. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I. Geocological aspects of the evolution of natural and urbanized systems in conditions of high seismic hazard (on the example of the Central part of the Caucasus). Vladikavkaz. CGI VSC RAS. 2014. 137 p. (In Russ.)
5. Lavrishchev V.A., Grekov I.I., Bashkirov A.N. Geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Ed. 2nd edition. Caucasian series. Sheet K-37-IV (Sochi). Saint-Petersburg. VSEGEI. 2000. 135 p. (In Russ.)
6. Makeev V.M., Kambolov D.A., Revazov M.O., Pikulik E.A. Neotectonics and geodynamics of the junction zone of the Northwestern Caucasus and the Black Sea basin (Gelendzhik region). *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2023. Vol. 15. No. 4(58). pp. 995–1007. (In Russ.)
7. Makeev V.M., Revazov M.O., Bolotaeva A.G. Structural and geodynamic studies of the southern slope of the Greater Caucasus in the area of the Dvalet uplift in connection with the assessment of disturbance zones. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 32–43. (In Russ.)
8. Milanovsky E.E. The newest tectonics of the Caucasus. Moscow. Nedra. 1968. 484 p. (In Russ.)
9. Nesmeyanov S.A., Voeikova O.A. Neotectonics of the Vorontsov zone and the problem of young thrusts in the Western Caucasus. *Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2020. No. 4. pp. 3–20. (In Russ.)
10. Ovsyuchenko A.N., Khilko A.V., Shvarev S.V., Kostenko K.A., Marakhanov A.V., Rogozhin E.A., Novikov S.S., Larkov A.S. Complex geological and geophysical studies of active faults in Sochi–Krasnopolyansky district. *Physics of the Earth*. 2013. No. 6. pp. 116–138. (In Russ.)
11. Rogozhin E.A. Seismotectonics of the central segment of the Greater Caucasus for seismic monitoring and seismic hazard assessment (Republic of South Ossetia: prospects for innovative development) *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2009. Vol. 9. No. 4. pp. 16–22. (In Russ.)
12. Code of Rules SP 22. 13330.2016 Foundation of buildings and structures. Application E – Maximum additional deformations of the foundations of reconstructed structures. 2016. 55 p. (In Russ.)

13. The Stratigraphic Code of Russia (MSC – International Stratigraphic Code). Ed. 3rd edition. Revised and expanded. Saint-Petersburg. VSEGEI. 2019. 96 p. (In Russ.)
14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high-altitude territories according to geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 75–88. (In Russ.)
15. Sholpo V.N., Rogozhin E.A., Goncharov M.A. Folding of the Greater Caucasus. Moscow. Nauka. 1993. 192 p. (In Russ.)
16. Yudakhin F.N., Shukin Yu.K., Makarov V.I. Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European Platform. Yekaterinburg. Ural Branch of the RAS. 2003. 299 p. (In Russ.)
17. Yakovlev F.L., Marinin A.V., Sim L.A., Gordeev P.P. Fields of tectonic stresses and deformation fields of the Vorontsov cover (Northwestern Caucasus). In: *Proceedings Problems of tectonophysics*. Moscow. IPE RAS. 2008. pp. 319–333. (In Russ.)
18. Adamia Sh., Zakariadze G., Chkhotua T., Sadradze N. et al. Geology of the Caucasus: a Review. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2011. Vol. 20. pp. 489–544.
19. Gamkrelidze I.P. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time. *Tectonophysics*. 1986. Vol. 127. pp. 261–277.
20. Mikhailov V.O. Evolution of the North Caucasus foredeep: Constraints based on the analysis of subsidence curves. *Tectonophysics*. 1999. Vol. 307. No. 3-4. pp. 361–379.
21. Mosar J., Kangarli T., Bochud M., Glasmacher U.A. et al. Cenozoic-Recent tectonics and uplift in the Greater Caucasus: a perspective from Azerbaijan. *Geological Society of London, Special Publications*. 2010. Vol. 340. No. 1. pp. 261–280.
22. Mosar J., Lavrishev M.V., Koiava K., Kalberguenova V.R. Tectonics in the Greater Caucasus (Georgia–Russia): from an intracontinental rifted basin to a doubly verging fold-and-thrust belt. *Marine and Petroleum Geology*. 2022. Vol. 140. Art. No. 105630.
23. Nikishin A.M., Okay A.I., Tüysüz O., Demirer A. et al. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 1: Basins structure and fill. *Marine and Petroleum Geology*. 2015. Vol. 59. pp. 638–655.

УДК 551.24:550.343.4(479)

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

Оригинальная статья

Структура консолидированной земной коры и сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа

В.В. Стогний¹, Г.А. Стогний¹, Н.Л. Пономарева², С.С. Гросс¹¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия,
362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: stogny_vv@mail.ru;² Единая геофизическая служба РАН, Сейсмическая станция «Махачкала», Россия,
367010, г. Махачкала, ул. Ахундова, 136

Статья поступила: 21.10.2024, доработана: 22.11.2024, принята к публикации: 25.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Большой Кавказ является сейсмоактивным регионом, при этом гипоцентры сильных землетрясений, как правило, локализируются в пределах консолидированной земной коры, что определяет актуальность исследований связи особенностей ее строения с закономерностями сейсмического процесса. **Цель работы** – изучение связи структур консолидированной коры Центрального сегмента Большого Кавказа, выявленных по материалам анализа и синтеза геолого-геофизических материалов, с характером его сейсмичности. **Методы исследования.** Проведен анализ локализации эпицентров землетрясений Центрального сегмента Большого Кавказа по отношению к разломам и блокам консолидированной коры. По результатам обработки данных каталогов ФИЦ ЕГС РАН за период 2001–2021 гг. Центрального сегмента мегантиклинория Большого Кавказа и близлежащих территорий на основе применения системы ArcGIS построены схемы распределения плотности эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и выполнен их анализ. Изучены также особенности плотности распределения гипоцентров землетрясений в полосе профиля, пересекающего Центральный сегмент в его восточной части. **Результаты работы.** В результате проведенного анализа установлено, что наиболее активными сейсмогенерирующими структурами Центрального сегмента Большого Кавказа являются высокоплотные блоки консолидированной коры и ограничивающие их межблоковые разломы. При анализе изменений плотности распределения гипоцентров землетрясений в полосе профиля восточной части Центрального сегмента по 5-летним периодам отмечено значительное расхождение в характере этих изменений южной части профиля, представляющей северный фланг Закавказской плиты, и его северной части, представляющей южный фланг Скифской плиты. Зона Сването-Алазанского межплитного разлома на этом участке практически асейсмична.

Ключевые слова: Большой Кавказ, сейсмичность, землетрясение, консолидированная кора, тектонический блок, сейсмогенерирующие структуры, сейсмогенный разлом.

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

Для цитирования: Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л., Гросс С.С. Структура консолидированной земной коры и сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 54-65. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

Original paper

Structure of Earth's consolidated crust and seismicity of the Greater Caucasus Central segment

V.V. Stogny¹, G.A. Stogny¹, N.L. Ponomareva², S.S. Gross¹

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

² Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Seismic station "Makhachkala",
136 Akhundova Str., Makhachkala 367010, Russian Federation

Received: 21.10.2024, revised: 22.11.2024, accepted: 25.11.2024

Abstract: Relevance. The Greater Caucasus is a seismically active region, and the hypocenters of strong earthquakes are usually localized within the consolidated Earth's crust, which determines the relevance of the relationship studies between the features of its structure and the patterns of the seismic process. **Aim.** The aim of the work is to study the relationship between the structures of the consolidated crust of the Greater Caucasus Central segment, identified based on the analysis and synthesis of geological and geophysical materials, and the nature of its seismicity. **Methods.** The analysis of the earthquake epicenters localization in the Greater Caucasus Central segment in relation to faults and blocks of the consolidated crust was carried out. Based on the processing of data from the catalogs of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences for the period 2001–2021 of the Greater Caucasus meganticlinorium Central segment and adjacent territories, using the ArcGIS system, the distribution schemes of the density of earthquake epicenters with $M_s \geq 2.5$ were constructed and analyzed. The features of the distribution density of earthquake hypocenters in the profile strip which is crossing the Central segment in its eastern part were also studied. **Results.** As a result of the analysis, it was established that the most active seismogenic structures of the Greater Caucasus are high-density blocks of consolidated crust and interblock faults that limit them. When analyzing the changes in the density of distribution of earthquake hypocenters in the profile strip of the eastern part of the Central segment over 5-year periods, a significant discrepancy was noted in the nature of these changes in the southern part of the profile, representing the northern flank of the Transcaucasian plate, and its northern part, representing the southern flank of the Scythian plate. The Svaneti-Alazani interplate fault zone in this area is practically aseismic.

Keywords: Greater Caucasus, seismicity, earthquake, consolidated crust, tectonic block, seismogenic structures, seismogenic fault.

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

For citation: Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L., Gross S.S. Structure of Earth's consolidated crust and seismicity of the Greater Caucasus Central segment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 54-65. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.34.006

Введение

Большой Кавказ обладает высокой эндогенной активностью, изучению которой посвящены многочисленные работы [Ананьин, 1977; Заалишвили, Чотчаев, 2022; Лукк, Шевченко, 2019; Рогожин и др., 2014; McClusky et al., 2000; Sosson et al., 2017; Tibaldi et al., 2018; Triep et al., 1995]. В качестве сейсмогенерирующих структур при этом обычно рассматриваются тектонические нарушения [Кафтан и др., 2023;

Маммадли, 2022; Gamkrelidze et al., 1998; Tibaldi et al., 2020; Tseng et al., 2016]. Отмечено, что около 95% гипоцентров землетрясений Большого Кавказа приходится на глубины до 20 км [Tibaldi et al., 2020], а сильные землетрясения обычно происходят в интервале глубин 10–15 км [Габсатарова, 2015] и локализованы в пределах консолидированной земной коры.

Цель проведенных исследований заключалась в выявлении особенностей локализации эпицентров сильных землетрясений Центрального сегмента Большого Кавказа в блоково-разломной структуре консолидированной земной коры региона с оценкой пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса.

Методология и методы исследований

Типизация сейсмогенерирующих структур зависит как от региона исследований, так и принятой парадигмы [Несмеянов, Воейкова, 2016]. В данной работе, исходя из принятой концепции, в качестве сейсмогенерирующих приняты блоки консолидированной коры различных иерархических уровней и ограничивающие их активные (сейсмогенные) разломы. Тектонические нарушения рассматривались в следующей иерархии: межгеоблоковые, межблоковые, внутриблоковые.

Для изучения закономерностей сейсмичности Центрального сегмента Большого Кавказа и близлежащих территорий на основе системы ArcGIS была выполнена обработка данных по каталогам ФИЦ ЕГС РАН за период 2001–2021 гг. в пределах площади 41° – 45° с.ш., 41° – 47° в.д. с осреднением по площадкам $0.2^{\circ} \times 0.3^{\circ}$. Результатом этой обработки явились схемы плотности распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$, по которым изучались особенности их локализации относительно тектонических элементов консолидированной коры и выделялись сейсмоактивные разломы.

С целью исследования закономерностей распределения гипоцентров землетрясений в полосе профиля С-СВ направления (41° с.ш., 43° в.д. – 45° с.ш., 45° в.д. $\pm 0.5^{\circ}$), расположенного в восточной наиболее сейсмоактивной части Центрального сегмента, построен разрез плотности распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ для периода 2001–2021 гг., на который вынесены гипоцентры землетрясений с $M_s \geq 3.5$ и $M_s \geq 4.5$. Для пятилетних интервалов периода 2001–2020 гг. построены также разрезы плотности распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ с целью оценки пространственно-временной ее изменчивости. При вычислении плотности распределения гипоцентров землетрясений осуществлялось осреднение на площадках 0.2° по широте, 10 км по глубине. В полосе исследуемого профиля расположен профиль ГСЗ Степное-Бакуриани [Павленкова, 2012], по которому на разрезы вынесены контуры (верхняя и нижняя граница) консолидированной коры.

Обоснование сейсмогенерирующих структур и сейсмогенных разломов региона исследований выполнялось на основе анализа и синтеза материалов по структуре кристаллической коры, полученной по результатам интерпретации геофизических полей, с учетом особенностей их проявления в сейсмичности.

Сейсмичность Центрального сегмента Большого Кавказа и характер ее изменчивости

Сейсмическая активность Центрального сегмента Большого Кавказа и близлежащих территорий в первые десятилетия XXI века анализируется на основе схем плотности распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$, совмещен-

ных со схемой блокового строения консолидированной коры (рис. 1). По этим данным можно отметить следующие особенности.

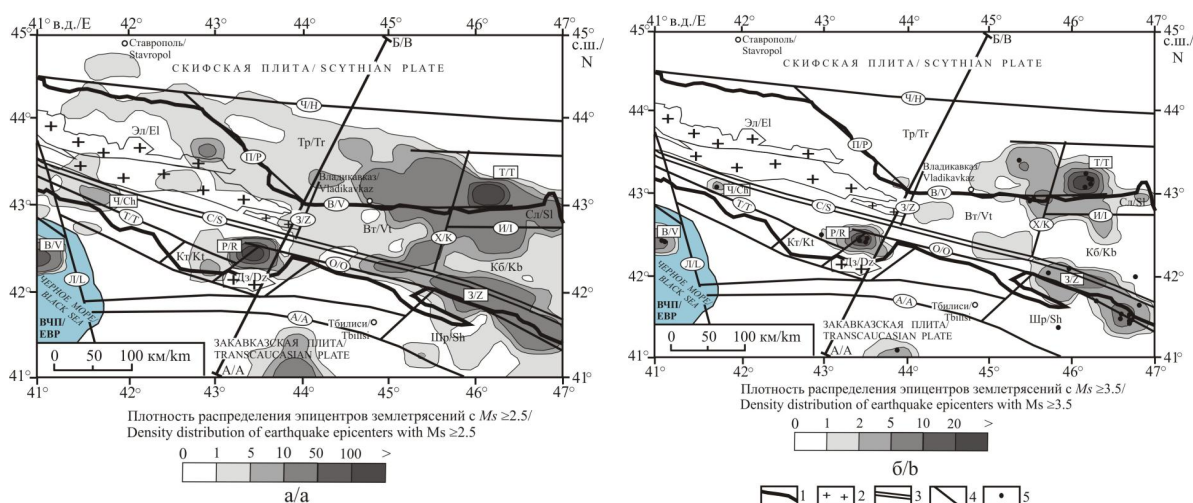


Рис. 1. Схемы сейсмической активности Центрального сегмента за период 2001–2021 гг. для землетрясений с $M_s \geq 2.5$ (а) и с $M_s \geq 3.5$ (б) на схеме блоковой делимости консолидированной коры в соответствии с [Стогний, Стогний, 2023].

1 – границы мегантиклинория Большого Кавказа; 2 – выходы протерозойских метаморфических пород и палеозойских гранитов Центрального сегмента и Дзирульского массива по (Геологическая карта Кавказа. Масштаб 1:500 000. Гл. редактор Д.В. Наливкин. М.: Аэрогеология. 1978);

3 – Сването-Алазанский (С) фрагмент Большекавказского межплитного разлома; 4 – разломы: А – Аджаро-Мингечаурский, Л – Лаба-Батумский,

П – Пятигорский, В – Владикавказский, З – Згитский, И – Известняковый, О – Они-Шекийский, Т – Тиварчелийский, Х – Халкилойский, Ч – Черкесско-Кизлярский; 5 – эпицентры землетрясений с $M_s \geq 4.5$. Блоки консолидированной коры: Дз – Дзирульский, Вт – Верхнетерский, Сл – Сулакский, Кб – Кубачинский, Кт – Кутаисский, Тр – Терский, Шр – Ширакский, Эл – Эльбрусский.

ВЧП – Восточно-Черноморская микроплита. Сейсмически активные зоны: Р – Рача-Джавская, Ч – Чхалта-Тебердинская, В – Восточно-Черноморская, З – Загатальско-Шекинская, Т – Терско-Сулакская. АБ – линия профиля/

Fig. 1. Seismic activity patterns of the Central segment for the period 2001–2021 for earthquakes with $M_s \geq 2.5$ (a); and with $M_s \geq 3.5$ (b) on the block divisibility scheme of the consolidated crust in accordance with [Stogny, Stogny, 2023].

1 – boundaries of the Greater Caucasus meganticlinorium; 2 – outcrops of Proterozoic metamorphic rocks and Paleozoic granites of the Central segment and the Dzirulsky massif according to (Geological map of the Caucasus. Scale 1:500 000. Ch. ed. D.V. Nalivkin. Moscow. Aerogeology. 1978); 3 – Svaneti-Alazani (S) fragment of the Greater Caucasus interplate fault; 4 – faults:

А – Adjara-Mingachevirsky, L – Laba-Batumi, P – Pyatigorsky, V – Vladikavkazsky, Z – Zgitsky, I – Izvestnyakovy, O – Oni-Shekiysky, T – Tivarcheliysky, Kh – Khalkilovsky, Ch – Cherkessko-Kizlyarsky; 5 – epicenters of earthquakes with $M_s \geq 4.5$. Blocks of consolidated crust: Dz – Dzirulsky, Vt – Verkhnetersky, Sl – Sulaksky, Kb – Kubachi, Kt – Kutaisky, Tr – Tersky, Shr – Shiraksky, El – Elbrusky. EBP – East Black Sea microplate. Seismically active zones: R – Racha-Dzhava, Ch – Chkhaltia-Teberda, V – East Black Sea, Z – Zakatalsk-Shekiyskaya, T – Tersko-Sulaksky. AB – profile line

В восточной части Черного моря в анализируемый период активизировалась сейсмичность, обусловленная Восточно-Черноморским землетрясением (23.12.2012). В южной части региона исследования (41.0° – 41.5° с.ш., 43.5° – 44.5° в.д.) сейсмическая активность проявилась в пределах структур кристаллической коры Малого Кавказа, северным ограничением которых, по-видимому, является Аджаро-Мингечаурский разлом.

По результатам анализа схем плотности распределения эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$ за период 2001–2021 гг. Центрального сегмента Большого Кавказа выделены Рача-Джавская и Чхалта-Тебердинская сейсмоактивные зоны.

В очаговой зоне Тебердинского (21.10.1905) и Чхалтинского (16.07.1963) землетрясений были зарегистрированы землетрясения Домбайское-I (26.03.2013, $M_s=4.4$, $H=4$ км) и Домбайское-II (28.05.2013, $M_s=4.4$, $H=5$ км), которые произошли под действием близгоризонтальных напряжений сжатия север-северо-восточного направления, имели близкие параметры и сопровождались афтершоковыми процессами, движение по обоим очагам – взброс с небольшой сдвиговой компонентой [Габсатарова и др., 2019]. Чхалта-Тебердинская сейсмоактивная зона находится в области влияния Сването-Алазанского разлома и с юга контролируется Тиварчеллийским сейсмоактивным разломом.

Сейсмическая активизация Рача-Джавской зоны в начале XXI века связана с разрядкой напряжений, возникших после одного из сильных на Кавказе Рачинского (29.04.1991, $M_w = 6.9$, $H=7$ км) землетрясения. В пределах северной ветви зоны вблизи г. Они 6 февраля 2006 г. произошло землетрясение Онийское-I с $M_s=5.0$, а в нескольких километрах северо-восточнее его эпицентра, примерно в 10 км южнее г. Они 7 сентября 2009 г. зарегистрировано землетрясение Онийское-II с $M_s=5.8$. Рача-Джавская сейсмоактивная зона локализована в пределах северной части Дзирульского высокоплотного массива, северным ее ограничением является Они-Шекский сейсмоактивный разлом, по которому происходит смещение северного контура этой зоны в запад-северо-западном направлении от эпицентра Рачинского землетрясения.

Выходы раннедокембрийских метаморфических пород Дзирульского блока закартированы в его южной части (Грузинская глыба). Локальные тектонические напряжения в области Дзирульского блока имеют сложный характер. В пределах его северной части наблюдается тенденция к вращательному движению блока против часовой стрелки при северо-восточном основном тренде Закавказской плиты [Стогний и др., 2023]. В такой геодинамической обстановке сейсмическая активность Рача-Джавской зоны будет определяться интенсивностью колебательных движений и кинематикой тектонических напряжений Дзирульского блока консолидированной коры, которые во многом формируют как условия накопления энергии очага землетрясения, так и ее рассеивания.

Юго-западнее Рача-Джавской зоны начала формироваться сейсмоактивная зона, приуроченная к Кутаисскому высокоплотному блоку (рис. 1а). Землетрясения с $M_s \geq 3.5$ за исследуемый период здесь не зафиксированы, однако судя по тенденции развития в ближайшие десятилетия в ее пределах возможны землетрясения по интенсивности соизмеримые с Онийскими.

В северной части Эльбрусского и Терского блоков выделяется региональная аномальная зона слабой сейсмичности, субпараллельная Черкесско-Кизлярскому разлому.

В пределах Эльбрусского блока Центрального сегмента Большого Кавказа, ограниченного с юга и севера соответственно Сването-Алазанским и Черкесско-Кизлярским разломами, с запада Лаба-Батумским, а с востока Згитским и Пятигорским разломами, в XX веке произошло порядка 10 землетрясений с $M \geq 5.0$. В первые десятилетия XXI века этот блок характеризуется слабой сейсмичностью,

отмечается лишь один район повышенной сейсмичности в его восточной части в зоне слабой сейсмичности, субпараллельной Пятигорскому разлому.

Верхнетерский блок Центрального сегмента, ограниченный с юга и севера соответственно Сването-Алазанским и Владикавказским разломами, а с запада и востока Згитским и Халкилойским разломами, в первые десятилетия XXI века характеризуется более высокой (по сравнению с Эльбрусским блоком) сейсмической активностью, наиболее интенсивно проявленной в его восточной части. В зоне Владикавказского сейсмогенного разлома произошло Хаталдонское (11.05.2008, $K_p=10,2$, $I_0=4$) землетрясение [Габсатарова и др., 2015], облако афтершоков которого имеет форму эллипса, вытянутого вдоль этого разлома.

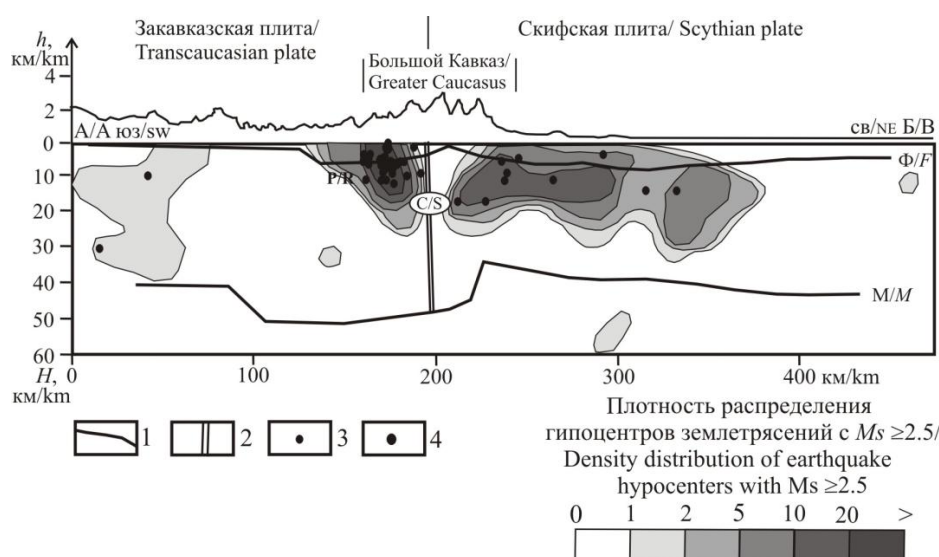


Рис. 2. Плотность распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ по разрезу земной коры профиля А-Б за 2001–2021 гг. 1 – границы консолидированной коры по [Павленкова, 2012]; Ф – кристаллический фундамент, М – Мохо; 2 – Сването-Алазанский (С) межплитный разлом; 3, 4 – гипоцентры землетрясений: 3 – с $M_s \geq 3.5$, 4 – с $M_s \geq 4.5$. Р – Рача-Джавская сейсмически активная зона /

Fig. 2. Distribution density of earthquake hypocenters with $M_s \geq 2.5$ along the A-B crustal section for 2001–2021. 1 – boundaries of the consolidated crust according to [Pavlenkova, 2012]; F – crystalline basement, M – Moho; 2 – Svaneti-Alazani (S) interplate fault; 3, 4 – earthquake hypocenters: 3 – with $M_s \geq 3.5$, 4 – with $M_s \geq 4.5$. R – Racha-Dzhava seismically active zone

На рис. 2 по профилю А-Б (местоположение профиля показано на рис. 1) приведена плотность распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ за период 2001–2021 гг., а на рис. 3 представлены разрезы плотности распределения гипоцентров землетрясений за временные интервалы (года) в пять лет: 2001–2005 (рис. 3а), 2006–2010 (рис. 3б), 2011–2015 (рис. 3в), 2016–2020 (рис. 3г).

В 2021 г. за короткий промежуток времени (с 7 августа по 10 октября) в пределах полосы юго-западной части исследованного профиля АБ (интервал 0–70 км профиля) было зарегистрировано 10 землетрясений с магнитудой $M_s \geq 2.5$, два из которых имели магнитуду $M_s \geq 3.5$ (07.08.2021, $M_s=3.8$, $H=10$ км и 17.08.2021, $M_s=3.5$, $H=30$ км). Следует отметить, что за предшествующий довольно длительный период времени (2001–2020 гг.) землетрясений с магнитудой $M_s \geq 2.5$ в этой части профиля не зафиксировано.

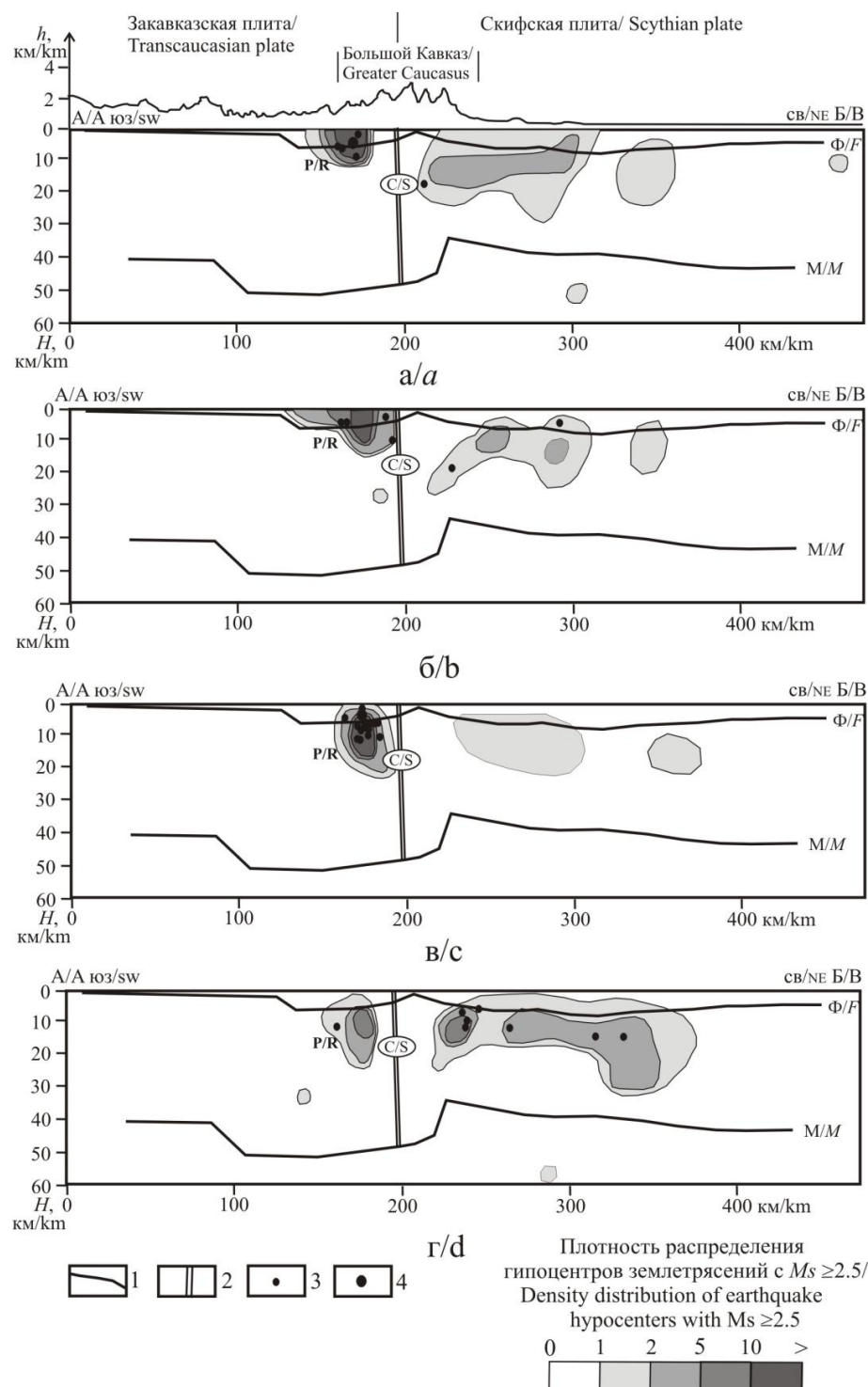


Рис. 3. Плотность распределения гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ по разрезу земной коры профиля А-Б за временные интервалы (годы): а – 2001–2005, б – 2006–2010, в – 2011–2015, г – 2016–2020. 1 – границы консолидированной коры по [Павленкова, 2012]: Ф – кристаллический фундамент, М – Мохо; 2 – Сването-Алазанский (С) межплитный разлом; 3, 4 – гипоцентры землетрясений: 3 – с $M_s \geq 3.5$, 4 – с $M_s \geq 4.5$. Р – Рача-Джавская сейсмически активная зона /

Fig. 3. Distribution density of earthquake hypocenters with $M_s \geq 2.5$ along the earth's crustal section of profile A-B for time intervals (years): a – 2001–2005, b – 2006–2010, c – 2011–2015, d – 2016–2020. 1 – boundaries of the consolidated crust according to [Pavlenkova, 2012]: F – crystalline basement, M – Moho; 2 – Svaneti-Alazani (S) interplate fault; 3, 4 – earthquake hypocenters: 3 – with $M_s \geq 3.5$, 4 – with $M_s \geq 4.5$. R – Racha-Dzhava seismically active zone

Выделенная группа землетрясений (см. рис. 2) довольно растянута по профилю и по глубине гипоцентров (от 1 до 34 км). Данная сейсмическая зона, активизировавшаяся на довольно короткий промежуток времени, имеет северным ограничением, по-видимому, Аджаро-Мингечаурский разлом.

В полосу профиля АБ (интервал 130–190 км профиля) попала восточная часть Рача-Джавской сейсмически активной зоны, глубина гипоцентральной области которой находится в интервале 0–25 км (рис. 2.). За исследуемый период (2001–2021 гг.) в ее пределах произошло 23 сейсмических события с $M_s \geq 3.5$, три из которых имели магнитуду $M_s \geq 4.5$. По характеру изменения плотности гипоцентров (рис. 3) можно отметить увеличение глубины гипоцентральной области с 12 км в период 2001–2005 гг. до 25 км в 2011–2020 гг. Ее расширение в 2006–2010 гг. связано с проявлением землетрясений Онийское-I (06.02.2006) и Онийское-II (07.09.2009), сопровождавшихся большой серией афтершоков. Отмечается также некоторое уменьшение плотности распределения гипоцентров землетрясений в период 2006–2010 гг. по сравнению с предыдущим периодом (2001–2005 гг.), активизация восточной части зоны в период 2011–2015 гг., когда произошло 9 сейсмических событий с $M_s \geq 3.5$ и одно с $M_s \geq 4.5$, и значительное их уменьшение в период 2015–2020 гг. Эти пространственно-временные особенности связаны, по-видимому, с процессами накопления и разрядки напряжений в данной области пространства восточной части Рача-Джавской зоны.

Зона Сването-Алазанского межплитного разлома (интервал 190–210 км профиля АБ) практически асейсмична. Далее в полосу профиля АБ попадают области межблокового Згитского разлома мегантиклинория Большого Кавказа и Терского блока Терско-Каспийского прогиба Скифской плиты, характеризующиеся довольно рассеянной сейсмичностью (интервал 210–380 км профиля АБ), с глубиной ее проявления от 0 до 25–35 км (рис. 2). За исследованный период (2001–2021 гг.) в пределах этой области концентрации гипоцентров произошло 10 землетрясений с $M_s \geq 3.5$, четкой границы в проявлении сейсмичности между структурами Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба нет. Максимальная глубина гипоцентров землетрясений в области межблокового Згитского разлома мегантиклинория до 25 км, в пределах Терского блока – до 35 км. Вместе с тем, при детальном рассмотрении, особенно по пятилетним периодам (рис. 3), отчетливо видно, что эта область концентрации гипоцентров состоит из трех участков, каждый из которых имеет свое автономное развитие. Самый северный из них (интервал 320–380 км профиля АБ), проявляется локальным максимумом плотности распределения гипоцентров землетрясений, а южный (интервал 210–260 км профиля АБ), приурочен к Верхнетерскому блоку с максимумом плотности концентрации гипоцентров в зоне его южного ограничения – Владикавказского сейсмогенного разлома.

При анализе характера изменения сейсмичности можно отметить значительное уменьшение сейсмической активности этой области (севернее Сването-Алазанского разлома) в период 2010–2015 гг. по сравнению с предшествующими периодами (2001–2005 и 2006–2010 гг.) с резким увеличением ее активности в период 2016–2020 гг., когда в ее пределах произошло 7 землетрясений с $M_s \geq 3.5$.

Таким образом, Верхнетерский блок восточной части Центрального сегмента проявляется значительно более высокой сейсмической активностью по сравнению с Эльбрусским блоком. Повышенной сейсмической активностью при этом отмечается Пятигорский разлом северо-западного направления, представляющий со-

бой западное ограничение Эльбрусского блока, и Владикавказский разлом, являющийся северным ограничением Верхнетерского блока, а зона Сването-Алазанского межплитного разлома (в полосе профиля) практически асейсмична. Следует также отметить значительную изменчивость сейсмической активности по пятилетним периодам, которая проявляется специфическим образом в южной (северный фланг Закавказской плиты) и северной (южный фланг Скифской плиты) частях в пределах полосы исследованного профиля.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ плотности распределения эпицентров землетрясений Центрального сегмента Большого Кавказа и близлежащих территорий (за период 2001–2021 гг.) с $M_s \geq 2.5$ (рис. 1а) и $M_s \geq 3.5$ (рис. 1б) позволил выделить Рача-Джавскую, Чхалта-Тебердинскую, Загатальско-Шекинскую и Терско-Сулакскую сейсмоактивные зоны. В Эльбрусском блоке Центрального сегмента в этот период повышенной сейсмической активностью отмечалась зона в его северной части, субпараллельная Черкесско-Кизлярскому сейсмогенному разлому, и в его восточной части, в зоне влияния Пятигорского разлома. Общая сейсмичность Эльбрусского блока была при этом на значительно более низком уровне, чем расположенного восточнее Верхнетерского, что укладывается в общую закономерность – блоки с более высокой плотностью (в данном случае Верхнетерский), как правило, являются более сейсмически активными (при прочих равных условиях). Для Верхнетерского блока в исследованный период сейсмическая активность наиболее отчетливо проявилась в его восточной, северо-восточной и юго-восточной частях, соответственно в зонах влияния Халкилойского, Владикавказского и Сването-Алазанского разломов.

Изучение плотности распределения гипоцентров землетрясений (за период 2001–2021 гг.) в полосе профиля северо-восточного направления, пересекающего Верхнетерский блок в его западной части (в полосе профиля расположен профиль ГСЗ Степное-Бакуриани) позволило установить, что основная часть гипоцентров локализована в пределах консолидированной коры, и только немногие из них находятся в осадочном чехле. Рача-Джавская сейсмоактивная зона, восточная часть которой попадает в полосу профиля, при анализе распределения гипоцентров землетрясений по 5-летним периодам имеет отчетливую тенденцию увеличения ее глубины с 12 км (2001–2005 гг.) до 25 км (2015–2020 гг.). Зона Сването-Алазанского межплитного разлома практически асейсмична. Изменение сейсмической активности в различных частях профиля позволяет предположить возможный их квазипериодический характер с периодом 12-летнего Солнечного цикла [Куликова и др., 2005; Ривин, 1989]. Значительное расхождение в периодах ее наибольшей активности в южной (северный фланг Закавказской плиты) и северной (южный фланг Скифской плиты) частях может объясняться различиями в характере сейсмичности регионального и локального уровня. Их причины можно установить только при проведении специализированных исследований.

Выводы

1. По результатам анализа распределения плотности эпицентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ и $M_s \geq 3.5$ за период 2001–2020 гг. Центрального сегмента Большого Кавказа выделены Рача-Джавская и Чхалта-Тебердинская сейсмоактивные зоны. Сейс-

мическая активность Рача-Джавской зоны определяется интенсивностью колебательных движений и кинематикой тектонических напряжений Дзирульского блока северного фланга Закавказской плиты. Чхалта-Тебердинская сейсмоактивная зона находится в области влияния Сването-Алазанского и Тиварчелийского разломов. Формирование очага сильного землетрясения данной зоны определяется геодинамическими напряжениями, создаваемыми Скифской, Закавказской и Восточно-Черноморской плитами.

2. Рассмотрена динамика 5-летних циклов гипоцентральной области Рача-Джавской сейсмоактивной зоны за период 2001–2020 гг. в полосе профиля ГСЗ Степное-Бакуриани. Максимум плотности гипоцентров землетрясений с $M_s \geq 2.5$ по разрезу земной коры в период 2001–2010 гг. находился в интервале 1–12 км. С 2011 г. происходит увеличение его глубины (10–25 км), что связано с активизацией Рача-Джавской зоны после Онийского-II (07.09.2009, $M_s = 5.8$) землетрясения.

3. При анализе изменений плотности распределения гипоцентров землетрясений в 5-летних циклах за период 2001–2020 гг. в полосе профиля ГСЗ Степное-Бакуриани, пересекающего Центральный сегмент, отмечено значительное расхождение в их характере южной части профиля, представляющей северный фланг Закавказской плиты, и его северной части, представляющей южный фланг Скифской плиты. Для определения их возможной квазипериодичности необходимо проведение специализированных исследований.

Литература

1. Ананьин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. – 148 с.
2. Габсатарова И.П. Современная сейсмичность Северного Кавказа. // В сборнике: Геодинамика, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе. Владикавказ: ВНИЦ РАН, 2015. – С. 11–22.
3. Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Малянова Л.С. Дуплет Домбайских землетрясений 2013 г. в очаговой зоне Чхалтинского землетрясения 1963 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2019. – Вып. 22 (2013 г.). – С. 362–369. DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.32.
4. Габсатарова И.П., Погода Э.В., Головкова Л.В. Хаталдонское землетрясение 11 мая 2008 г. с $K_p=10.2$, $I_0=4$ (Северная Осетия-Алания). // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – 2015. – С. 60–97.
5. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – 263 с.
6. Кафтан В.И., Маневич А.И., Татаринов В.Н. Современные подъемы земной коры, сейсмичность и тектоника Кавказа. // Материалы XXIII Всероссийской международной конференции «Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов». Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2023. – С. 95–99.
7. Куликова В.В., Куликов В.С., Бычкова Я.В., Бычков А.Ю. История Земли в галактических и солнечных циклах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. – 250 с.
8. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99–123.
9. Маммадли Т.Я. Анализ сейсмической активности глубинных разломов с использованием метода определения сейсмогенерирующих зон: оценка зон сейсмической опасности территории Азербайджана. // Геотектоника. – 2022. – № 2. – С. 95–104.
10. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. К проблеме типизации сейсмогенерирующих структур Восточно-Европейской платформы. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический – 2016. – Т. 91. Вып. 4–5. – С. 27–39.

11. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное-Бакуриани и Волгоград-Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных). // Физика Земли. – 2012. – № 5. – С. 16–23.
12. Ривин Ю.Р. Циклы Земли и Солнца. М.: Наука, 1989. – 165 с.
13. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с.
14. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмотектоника южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 76–95. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.
15. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2023.96.83.001.
16. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. // Bulletin of the Georgian Academy of Sciences. – 1998. – Vol. 157. No. 1. – pp. 80–85.
17. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999 JB900351.
18. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus: An introduction. // Geological Society London Special Publication. – 2017. – Vol. 428. No. 1. – 368 p.
19. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2018. – Vol. 156. – pp. 226–245.
20. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.
21. Triep E.G., Abers G.A., Lerner-Lam A.L., Mishatkin V., Zakharchenko N., Starovoi O. Active thrust front of the Greater Caucasus: the April 29, 1991, Racha earthquake sequence and its tectonic implications. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1995. – Vol. 100. Issue B3. – pp. 4011–4033.
22. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. // Tectonophysics. – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.

References

1. Ananyin I.V. Seismicity of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1977. 148 p. (In Russ.)
2. Gabsatarova I.P. Modern seismicity of the North Caucasus. In: Proceedings Geodynamics, seismicity and exogenous geological processes of natural and anthropogenic character in the Caucasus. Vladikavkaz. VSC RAS. 2015. pp. 11–22. (In Russ.)
3. Gabsatarova I.P., Koroletsky L.N., Malyanova L.S. Doublet of the 2013 Dombai earthquakes in the focal zone of the 1963 Chkhalt'a earthquake. Earthquakes of Northern Eurasia. 2019. Issue 22 (2013). pp. 362–369. DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.32. (In Russ.)
4. Gabsatarova I.P., Pogoda E.V., Golovkova L.V. Khatal'don earthquake of 11 May 2008 with $K_p=10.2$, $I_0=4$ (North Ossetia-Alania). Earthquakes of Northern Eurasia, 2008. 2015. pp. 60–97. (In Russ.)
5. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O. Influence of geodynamic processes on the geo-ecological state of high-mountain territories. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. 263 p. (In Russ.)
6. Kaftan V.I., Manevich A.I., Tatarinov V.N. Modern uplifts of the Earth's crust, seismicity and tectonics of the Caucasus. In: Proceedings of the All-Russian International Conference

“Structure, material composition, properties, modern geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions”. Voronezh. VSU. 2023. pp. 95–99. (In Russ.)

7. Kulikova V.V., Kulikov V.S., Bychkova Ya.V., Bychkov A.Ju. Earth history through galactic and solar cycles. Petrozavodsk. Karelian Scientific Center of RAS. 2005. 250 p. (In Russ.)

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

9. Mammadli T.Ya. Determination of seismogenic zones for analysis of seismotectonic activity of deep faults: seismic hazard assessment for the territory of Azerbaijan. *Geotectonics*. 2022. No. 2. pp. 95–104. (In Russ.)

10. Nesmeyanov S.A., Voeikova O.A. On the problem of typification of seismogenic structures of the East European platform. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Department*. 2016. Vol. 91. Issue 4–5. pp. 27–39. (In Russ.)

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

12. Rivin Yu.R. Earth and solar cycles. Moscow. Nauka. 1989. 165 p. (In Russ.)

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

14. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 76–95. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006. (In Russ.)

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

16. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active deep faults map and the catalogue for the territory of Georgia. *Bulletin of the Georgian Academy of Sciences*. 1998. Vol. 157. No. 1. pp. 80–85.

17. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999 JB900351.

18. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus: An introduction. *Geological Society London Special Publication*. 2017. Vol. 428. No. 1. 368 p.

19. Tibaldi A., Bonali F.L., Russo E., Pasquare Mariotto F.A. Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 156. pp. 226–245.

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

21. Triep E.G., Abers G.A., Lerner-Lam A.L., Mishatkin V., Zakharchenko N., Starovoit O. Active thrust front of the Greater Caucasus: the April 29, 1991, Racha earthquake sequence and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1995. Vol. 100. Issue B3. pp. 4011–4033.

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

УДК 550.83

DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

Оригинальная статья

Применение геофизических методов при изучении оползневых процессов

И.А. Керимов , А.С. Эльжаев 

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный,
пр. Х. Исаева, 100, e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Статья поступила: 30.09.2024, доработана: 11.11.2024, принята к публикации: 15.11.2024

Резюме: Актуальность работы. С ростом социально-экономических преобразований в современном обществе во всем мире наблюдается активное освоение территорий под строительство объектов различных видов инфраструктуры (социальной, транспортной, производственной, туристической), зачастую влекущее за собой экзогенные процессы. Такие процессы требуют все большего внимания к исследованию, т.к. негативно сказываются на экосистемах и безопасности населения. **Объектом исследования** в данной статье являются оползни. Оползневые процессы наносят значительный ущерб как хозяйственной деятельности человека, так и его здоровью. Обычно применяемые для изучения оползневых явлений и их прогноза прямые (разрушающие) методы (бурение скважин, сооружение горных выработок) сопряжены с большими затратами средств и времени. **Методы исследования.** В последние годы для изучения оползневых процессов широко применяются геофизические методы, позволяющие с высокой точностью выделять ослабленные зоны (трещиноватые, обводненные), определять глубину поверхности скольжения и положение кровли и подошвы пород повышенной влажности, наблюдать за изменениями физических свойств, выявлять зоны разуплотнения грунтов и др. Наибольшее применение среди всего множества методов инженерной геофизики нашли методы электроразведки и сейсморазведки (в различных их модификациях), которые при их комплексировании дают лучшие результаты. Необходимо отметить экономическую целесообразность их проведения, выраженную в снижении времени и стоимости всего комплекса инженерно-геофизических изысканий. **Результаты.** В статье представлены результаты геофизических исследований при изучении оползневых процессов. **Выводы.** Практическая значимость данной статьи заключается в том, что проведен обзор практик и примеров применения геофизических методов для решения связанных с оползнями проблем, как на территории РФ, так и за ее пределами.

Ключевые слова: геофизические методы, оползень, опасные геологические процессы, электроразведка, сейсморазведка, физические свойства, классификация, прогнозирование.

Благодарности: Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (Соглашение Минобрнауки РФ № 075-15-2024-644).

Для цитирования: Керимов И.А., Эльжаев А.С. Применение геофизических методов при изучении оползневых процессов. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 66-83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

Original paper

Application of geophysical methods in the study of landslide processes

I.A. Kerimov , A.S. Elzhaev 

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 Kh. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Received: 30.09.2024, revised: 11.11.2024, accepted: 15.11.2024

Abstract: Relevance. With the growth of socio-economic transformations in modern society around the world, there is an active development of territories for the construction of various types of infrastructure (social, transport, industrial, tourism), often entailing exogenous processes. Such processes require more and more attention to research, because negatively affect ecosystems and public safety. **The object of study** in this article is landslides. Landslide processes cause significant damage to both human economic activity and human health. Direct (destructive) methods (drilling wells, constructing mine workings) that are usually used to study landslide phenomena and their prediction are associated with large expenditures of money and time. **Research methods.** In recent years, geophysical methods have been widely used to study landslide processes, making it possible to accurately identify weakened zones (fractured, waterlogged), determine the depth of the sliding surface and the position of the roof and base of rocks with high humidity, observe changes in physical properties, identify zones of soil decompression, etc. Among various methods of engineering geophysics, the most widely used are the methods of electrical prospecting and seismic prospecting (in their various modifications), which, when combined, give the best results. It is necessary to note the economic feasibility of their implementation, expressed in reducing the time and cost of the entire complex of engineering and geophysical surveys. **Results.** The article presents the results of geophysical research in the study of landslide processes. **Conclusions.** The practical significance of this article lies in the fact that a review of practices and examples of the successful use of geophysical methods to solve landslide-related problems both in the Russian Federation and abroad was carried out.

Keywords: geophysical methods, landslide, hazardous geological processes, electrical prospecting, seismic prospecting, physical properties, classification, forecasting.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of a large scientific project “Dynamics of the geoeological state of the mountain river basins of the North-East Caucasus, Azerbaijan and Iran in the context of climate change and increasing anthropogenic load” (Agreement of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2024-644).

For citation: Kerimov I.A., Elzhaev A.S. Application of geophysical methods in the study of landslide processes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 66-83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

Введение

В настоящее время в мире наблюдается рост мероприятий, нацеленных на устойчивое развитие территорий, т.е. всё чаще предпринимаются меры обеспечения безопасности и благоприятных условий для общества, в том числе меры, ограничивающие влияние негативных факторов человеческой деятельности (хозяйственной и др.) на окружающую среду. Но не только человеческая деятельность воздействует на окружающую среду. Последняя подвержена воздействию природных процессов,

которые зачастую носят стихийный, катастрофический характер. Одним из таких опасных природных процессов являются оползни. Известно много случаев, когда оползни нанесли значительный ущерб не только инфраструктуре, но и здоровью и жизни человека. В работе [Vorobyov et al., 2022] авторы приводят информацию о том, что по причине оползней ежегодно погибает около 1000 человек и причиняются убытки в размере 4 миллиардов долларов.

Оползни относятся к числу наиболее опасных геологических процессов и, как отмечалось выше, представляют угрозу не только инженерным сооружениям, но и могут повлечь за собой значительные человеческие жертвы. Оползни могут возникать по бортам карьеров, при разработке полезных ископаемых открытым способом. С оползневыми явлениями приходится сталкиваться довольно часто по берегам рек, озер, морей, а также в горной местности [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

В свете вышесказанного становятся очевидными актуальность описываемой проблемы и важность изучения оползневого явления и его прогнозирования.

Характеристика, строение и классификации оползней

Для понимания закономерностей оползневых процессов, а также для их прогнозирования и контроля протекания необходимо знать строение изучаемого объекта (оползня) и иметь достаточное представление о характеристиках и классификациях оползней.

Оползнем называют смещение грунтов, а также горных пород скользящего характера. Скольжение происходит по склонам гор, крутых берегов или оврагов. Оползень может быть вызван рядом причин, основными из которых считаются выпадение большого количества осадков, подмыв или чрезмерное увлажнение склонов, землетрясение, а также антропогенный фактор.

Оползень представляет собой массу горных пород, сползшую или сползающую вниз по склону или откосу. Образование оползня – это геологический экзогенный процесс, проявляющийся в смещении масс горных пород вследствие нарушения их устойчивости, под влиянием силы тяжести, когда касательные напряжения становятся больше сопротивления сдвигу. Оползнем также называют участок смещенных горных пород, включая зоны отрыва, транзита и накопления [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

В работе [Керимов и др., 2024] предложены с позиций системного подхода следующие определения оползня и оползневого процесса:

Оползень – природное тело (динамическая геосистема открытого типа), включающее горные породы и почвенно-растительный покров, ограниченное земной поверхностью и поверхностью смещения.

Оползневой процесс – последовательное изменение состава, состояния и свойств оползня с момента его зарождения и перемещения на другой уровень по поверхности скольжения, как правило, без потери контакта с неподвижным ложем.

Оползневой процесс может возникнуть под воздействием сил, оказывающих даже незначительное влияние на устойчивость грунтовых масс, слагающих оползневой склон. Даже незначительные побудительные причины, такие как обводнение грунта в результате дождей или сотрясение грунта от проезжающей автотехники могут вызвать процесс движения оползневых масс. Вследствие этого происходят изменения в структуре грунта и его состоянии, способствующие началу процесса потери его устойчивости. Оползень может формироваться на протяжении длитель-

ного периода времени. Иногда процесс потери устойчивости незаметен, иногда затихает и прекращается вообще, но это не значит, что под воздействием каких-либо природных или техногенных факторов он не будет возобновлен и не приведет к катастрофическим последствиям [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

На сегодняшний день существует много классификаций оползней, в основу которых положены такие параметры, как строение оползня, его размер, динамика оползневого процесса, причина и условия образования и др. [Саваренский, 1935; Бурлуцкий, Кудашов, 2018; Емельянова, 1972; Кюнтцель, 1980; Петров, 1988].

Отдельные классификации представляют наибольший интерес.

Поповым И.В. была предложена классификация оползней по возрасту, из которой можно сделать вывод, что для молодых и древних оползней характерен разный базис оползания [Попов, 1952]. Выделяют оползни современные и древние.

Современные оползни подразделяются на: движущиеся или активные (процесс равновесия продолжается), приостановившиеся (действие силы, вызывающей нарушение равновесия, временно уравновешено факторами устойчивости), остановившиеся (силы, нарушающие равновесие, временно устранились), закончившиеся (действие нарушающей равновесие силы исчерпано). Древние оползни, не отвечающие современному положению базиса эрозии и уровню абразии, по состоянию равновесия масс горных пород делятся на открытые и погребенные [Ежов, Хорошилов, 2022].

Другой вариант классификации заключается в разделении оползней по характеру движения на деляпсивные (образование оползней происходит на сравнительно ровной поверхности путем скольжения массы пород под действием своего веса и базис оползания находится на уровне или выше подошвы) и детрузивные (возможность образования более крупных оползневых тел, возникающих, как правило, в верхней части склона, базис оползания находится ниже уровня лежащих впереди пород, выталкивающихся при оползании) [Павлов, 1903].

По происхождению выделяют следующие генетические типы оползней: сейсмогенные, гидрогенные, климатогенные, гидрогеологенные и полигенные.

Во многих работах можно найти и другие типы оползней с учетом различных характеристик. Например, Тихвинский И.О. предлагает следующую классификацию: оползни сдвига (скольжения, блоковые, «собственно оползни»), выдавливания (раздавливания), гидродинамического разрушения (выплывания), вязкопластические (вязкопластического течения, консистентные, грязевые), внезапного разжижения [Тихвинский, 1988]. Петровым Н.Ф. выделяются оползни скольжения, выдавливания, проседания, выплывания (суффозионные), течения, оседания и разжижения [Петров, 1988].

Для развития оползневого процесса необходимы факторы и причины. Причины оползневого процесса можно разделить на три группы [Пендин, Фоменко, 2015]:

1. Изменение высоты и формы склона. В эту группу входит срезание склона посредством природной или антропогенной деятельности. В качестве природной деятельности выступает эрозия склона постоянными или временными водотоками, абразивным воздействием водохранилищ и морей. Для антропогенной деятельности характерен искусственный срез склона для инженерно-хозяйственных нужд.

2. Изменение строения, состояния и свойств грунтов, из которых состоит склон. В данную группу объединены процессы, изменяющие свойства грунтов (физические, химические, механические). В частности, физическое и химическое выветри-

вание, воздействие атмосферных осадков и подземных вод, изменяющее влажность грунтов, а также суффозионный и карстовый процессы.

3. Дополнительная нагрузка на склон. К ней относятся сейсмические, гидростатические, гидродинамические, а также антропогенные статическое или динамическое воздействия.

Исходя из этого, оползневой процесс формируется в геологической среде, подготавливается группой факторов и происходит под действием силы тяжести. В качестве признаков, идентифицирующих проявления оползневого процесса, наиболее часто используются следующие: оползневые трещины и цирки; плоскости срыва; образующиеся валы у подножия склона; оползневые уступы; несовпадение положения пластов в разрезе склонов; наличие большого числа водопоявлений на склонах; наличие деформаций в сооружениях, находящихся в области влияния оползневого процесса. Данные признаки имеют разный уровень выраженности в зависимости от активности оползня, стадии его развития и возраста [Ежов, Хорошилов, 2022].

Важным этапом в изучении оползневых процессов является их прогнозирование, т.к. учет вероятного их появления, прогнозных данных о степени активности и продолжительности позволит не только правильно планировать объекты инфраструктуры, проводить защитные мероприятия, но и, что наиболее важно, избегать человеческих жертв.

При инженерно-геологических исследованиях принято разделение прогнозов на глобальные, региональные и локальные, так как в зависимости от того, какой объем геологического пространства вовлекается в сферу прогнозирования, существенно меняется не только вид прогноза, но и задачи и применяемые методы прогнозирования [Шуляков, 2010].

Для проведения оценки оползневой опасности требуется решение ряда вопросов относительно строения склона, условий залегания отдельных слоев и толщ горных пород, состояния и свойств коренных и перекрывающих их более молодых пород, режима подземных вод. Эти вопросы необходимо решить с учетом таких факторов как климат и гидрогеологические условия, история развития оползня, инженерная деятельность человека.

К традиционным методам оценки оползневой опасности относятся инженерно-геологические методы. Каждый оползень имеет определенную подвижность, которая зависит от состояния равновесия слагающих его пород и проявляется в рельефе оползневого участка, в изменении его внутреннего строения и нарушении устойчивости местности и сооружений. Таким образом, инженерно-геологические методы оценки оползневой опасности основываются на изучении морфологии, строения (структуры оползня), обводнённости и физико-механических свойств пород, слагающих оползень, сопутствующих геологических процессов и явлений, динамики развития оползневых явлений, соотношения усилий (сдвигающих и удерживающих), определяющих равновесие масс горных пород, слагающих оползень [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

Для повышения детальности и эффективности инженерно-геологических исследований оползней необходимо привлечение методов, позволяющих оперативно охарактеризовать неоднородную структуру оползневых массивов, осуществить оценку изменения в них физико-механических свойств пород, а также выделить зоны ослабления, приуроченные к основным элементам оползня. Большинство

этих задач может быть решено с привлечением инженерно-геофизических методов исследования [Воронков и др., 2008; Ескин и др., 2016; Заалишвили, Голик, 2024; Караблин, Простов, 2020; Anterrieu et al., 2010; Power et al., 2018].

Обзор геофизических методов, применяемых для изучения оползневых процессов

Дополнительные возможности для всестороннего и более детального изучения оползневых структур, выделения ослабленных (за счет изменения физических свойств) зон и оценки устойчивости массивов горных пород дают геофизические методы.

Применение геофизических методов позволяет обследовать большие площади при детальности наблюдений, недоступной для методов инженерно-геологических изысканий. Поэтому в последние годы для решения указанных задач инженерно-геофизические изыскания получили широкое распространение [Заалишвили, Голик, 2024; Караблин, Простов, 2020; Керимов и др., 2023; Nauck, Kneisel, 2008; Zakaria et al., 2022].

Одно из основных преимуществ методов инженерной геофизики перед другими полевыми методами исследования оползневых процессов заключается в том, что они позволяют изучать физико-механические свойства пород оползневого массива во времени и пространстве, не нарушая целостности объекта исследования.

Наибольшую эффективность при решении инженерно-геологических задач в целом и, в частности, при изучении оползней показали различные методы сейсморазведки [Керимов и др., 2023; Ескин и др., 2016; Sloan et al., 2015; Yang et al., 2023] и электроразведки [Саламов и др., 2010; Чаплыгин, 2021; Power et al., 2018; Sjö Dahl et al., 2005]. Этими методами решаются следующие задачи:

1. Картирование массива оползня (с литологическими и гидрогеологическими особенностями).
2. Определение мощностей и электрических свойств отдельных слоев.
3. Определение глубины залегания подстилающих пород.
4. Изучение ослабленных участков массива и установление поверхности скольжения.
5. Определение поверхностей древних оползней.
6. Определение направления и скорости движения оползня.
7. Установление направления и скорости движения подземных вод.
8. Оценка водно-физических и физико-механических свойств грунтов, степени обводненности пород в естественном залегании.

Ниже приведем обзор применения разных геофизических методов для исследования оползневых процессов на конкретных примерах (по материалам работ [Ескин и др., 2016; Саламов и др., 2010; Чаплыгин, 2021; Давыдов и др., 2018; Воронков и др., 2008; Караблин, Простов, 2020; Оленченко, Кондратьев, 2017]).

1. Определение глубины залегания зеркала скольжения оползня в районе поселка Харанцы на острове Ольхон. Остров Ольхон является одним из самых крупных озерных островов мира, находится на озере Байкал. Оползни в большинстве случаев встречаются в западной части острова, более подверженной нагрузке из-за активного освоения береговой линии для туризма и отдыха.

На данном участке нашли применение методы: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ). Для

определения глубины залегания зеркала скольжения в качестве объекта исследования была выбрана часть оползня в районе поселка Харанцы на острове Ольхон.

ВЭЗ были выполнены четырехэлектродной симметричной установкой АМNB. Всего было выполнено 15 зондирований по трем профилям. В этих же точках была выполнена сейсморазведка. Наблюдения проводились с возможностью регистрации продольных и поперечных волн. Такая методика измерений позволяет получать средние значения скоростей в верхней зоне разреза до глубины 10–20 м.

По результатам совместной интерпретации (ВЭЗ и МПВ) построен сводный геофизический разрез. Пример разреза по профилю ПР2 представлен на рис. 1.

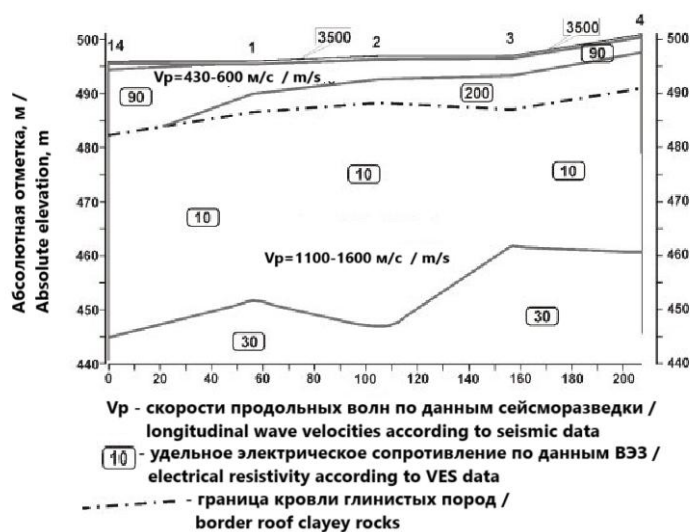


Рис. 1. Сводный геофизический разрез по профилю ПР2. Остров Ольхон, поселок Харанцы
[Ескин и др., 2016] /

Fig. 1. Summary geophysical section along profile PR2. Olkhon Island, Kharantsy village
[Eskin et al., 2016]

По данным сейсморазведки в верхней части разреза выделяется только два горизонта: первый, представленный суглинками и супесями, и второй, сложенный глинистыми породами. Скорость продольных волн V_p в первом составляет 430–600 м/с, а во втором – 1100–1600 м/с. Различие в скоростях определяется типом грунта, а также процентным содержанием воды. Мощность верхнего слоя на протяжении всего профиля колеблется в пределах 6–9 м. Подошву глинистых пород определить по географам не представлялось возможным, поэтому она определена по данным электроразведки.

В результате количественной интерпретации кривых ВЭЗ в пределах профиля выделяется четыре основных горизонта. Самый верхний слой имеет высокое сопротивление (3500 Ом·м) и мощность 0,5–1 м. Ниже расположен горизонт, представленный суглинками и супесями с сопротивлением 90 Ом·м. Его мощность варьирует от 3 м в районе пикета ПК4 до 12 м на пикете ПК14. Под ним находится выклинивающийся слой, сложенный обводненными песками с электрическим сопротивлением 200 Ом·м, средняя мощность которого составляет 5–6 м. Выклинивание происходит по направлению предполагаемой линии движения оползня. Мощность следующего горизонта составляет 30–40 м на ПК4 и ПК14 соответственно. То есть по направлению движения оползня мощность данного слоя, сложенного глинистыми породами,

возрастает. Он характеризуется низким электрическим сопротивлением – 10 Ом·м. Под ним на глубине 40-50 м расположен слой с электрическим сопротивлением 30 Ом·м. Данный горизонт сложен разрушенными, обводненными коренными породами. Его кровля является зеркалом скольжения оползня [Ескин и др., 2016].

2. Прогноз оползня на склоне горы Боздаг. Участок исследования находится на территории Азербайджана в районе Мингечаурского водохранилища. Исследование динамики развития оползневых процессов в данном районе является весьма актуальным, т.к. Мингечаурское водохранилище играет значительную роль в экономике страны.

Задачи, для решения которых были привлечены методы электроразведки (ВЭЗ, ЭП и ЕП), заключались в следующем:

1. Литологическое расчленение разреза;
2. Выявление разрывных нарушений и определение глубины залегания плоскости скольжения оползней;
3. Определение физических свойств грунтов, слагающих исследуемый участок;
4. Прогнозирование оползней и выдача рекомендаций защитных мер.

Полевые работы проводились в два этапа. На первом этапе по всей площади исследования вышеназванными методами проводились по шести профилям. В результате был выявлен предполагаемый участок активизации оползневого процесса. На втором этапе на оползнеопасном участке был налажен геофизический мониторинг и в течение трех лет каждый месяц методами ВЭЗ, ЭП и ЕП проводились измерения по профилям. Метод ВЭЗ применялся с целью литологического расчленения геологического разреза до глубины 40 м, выявления глубины залегания плоскости скольжения и мощности оползневого тела, определения наличия разрывных нарушений, определения предполагаемых физических свойств грунтов. Методом ЭП в двух глубинах изучалось кажущееся электрическое сопротивление грунтов и уточнялось местоположение, направление и падение разрывных нарушений. Метод ЕП на площади исследований применялся для того, чтобы определить направление интеграции инфильтрационных вод, образовавшихся в результате атмосферных осадков и поступающих в геологическую среду по трещинам.

В результате проведения электроразведки в районе исследований впервые была с детальностью высокой точности расчленена литология до глубины 40 м. Кроме того, были выявлены и прослежены разрывные нарушения, в том числе и ранее неизвестные (носящие разнонаправленный характер), а также определены направления движения подземных вод и физические свойства грунтов. Выявленные разнонаправленные разрывные нарушения были (на момент проведения исследований) расценены как бровки будущих оползней, что позже нашло подтверждение [Саламов и др., 2010].

3. Выявление поверхности скольжения оползня в районах трасс магистральных трубопроводов. Для изучения и мониторинга опасных геологических процессов на трассах магистральных трубопроводов, с целью прогноза и предотвращения данных явлений, требуется применение геофизических методов, поскольку бурение скважин на откосах при традиционных методах инженерно-геологических изысканий зачастую невозможно. Геофизические методы позволяют обследовать большой объем площадей с высокой точностью и детальностью наблюдений.

Для оползней характерно разнообразие разноориентированных границ раздела с градиентным изменением физических свойств. Таким образом, физико-геологи-

ческая модель оползневого массива может стать основой для расчета устойчивости откосов. Особенность модели заключается в наличии поверхности скольжения, где естественная структура претерпевает наибольшие изменения.

Одной из ключевых задач является выявление поверхности скольжения оползня: определение её положения, выявления характера её формирования и развития в разрезе. Поскольку поверхности скольжения в верхней части разреза связаны с высокопластичными глинистыми породами, для её выявления и прослеживания наибольшими возможностями обладают методы электроразведки.

С помощью электроразведки определяют положение кровли и подошвы пластичных пород, что позволяет определить вероятность возникновения оползней выдавливания. Однако для изучения гидрогеологической обстановки на участке требуется использовать комплекс методов электроразведки. Таким образом, дополнительно определяются региональные водоносные горизонты и водоупоры.

Для изучения динамики оползневых процессов требуется длительное наблюдение за изменением таких параметров как удельные сопротивления, потенциалы и градиенты потенциалов. Информация о данных параметрах позволит нам спрогнозировать перемещение тела оползня.

Один из примеров такого мониторинга при оценке оползневых явлений представлен на рис. 2.

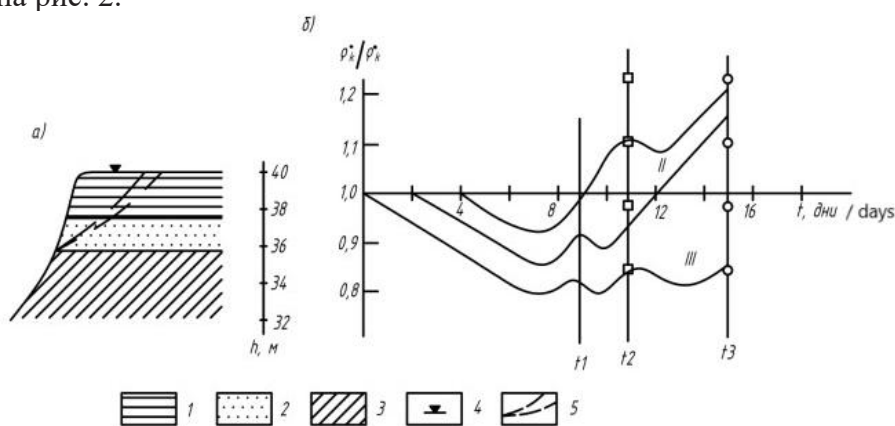


Рис. 2. Режимные наблюдения на оползневом откосе карьера:

a – модель склона; *б* – результаты наблюдений для разносов $AB=2,5$ м, $AB=4,5$ м, $AB=25$ м.

Условные обозначения: 1 – глины, 2 – пески, 3 – сланцы, 4 – точка ВЭЗ, 5 – зона скольжения /

Fig. 2. Routine observations on the nuthatch slope of the quarry: *a* – slope model; *b* – observation results for spacing $AB = 2.5$ m, $AB=4.5$ m, $AB=25$ m. Conventional: 1 – clays, 2 – sands, 3 – shales, 4 – VES point, 5 – slip zone

В данном случае был подрезан откос, в результате чего возник оползень объемом около 10 тыс. м³. Мониторинг проводился методом сопротивлений, для измерения кажущихся сопротивлений использовалась симметричная четырехэлектродная установка.

Были получены графики функций $\rho_k = f(t)$ для трех разносов (глубин). Из данных наблюдений можно выявить, что величины удельного сопротивления изменяются за несколько суток до начального смещения пород.

Отсюда можно сделать вывод, что изменения в структуре начинаются на глубине и развиваются снизу вверх в несколько стадий. Было установлено, что формирование поверхности скольжения в данном случае по скорости составило от 0,2 до 2,2 м/ч [Чаплыгин, 2021].

4. Изучение закрытого карста в г. Кунгур. Одним из опасных геологических процессов является образование карстов, которые достаточно широко распространены на территории Пермского края. Известны случаи возникновения по вине карста оползней и провалов, когда под землю уходили целые селения, мелели озера и изменялись течения рек.

При исследовании всех форм карста (открытые, закрытые) большой популярностью пользуются геофизические методы исследований, являющиеся наиболее оперативными и достаточно информативными.

Геофизические исследования проводились во дворе дома, на котором замечено появление трещин, для уточнения безопасности его дальнейшей эксплуатации. Основной задачей ставилось определение участков, подверженных процессу карстообразования, в непосредственной близости от дома. В состав работ входила комплексная малоглубинная сейсморазведка (МПВ + MASW) и электроразведка методом ВЭЗ. Сейсмический профиль проходил вдоль юго-западной стены, в 3 м от дома. Провести измерения ВЭЗ вблизи дома было невозможно из-за экранирующего влияния стальных канализационных труб, уложенных рядом, поэтому точки зондирования выбирались со смещением. Наличие асфальтированных дорожек и бетонных площадок привело к ограничению некоторых разносов ВЭЗ. Результаты геофизических работ, оформленные в виде сейсмических разрезов и колонок ВЭЗ, представлены на рис. 3.

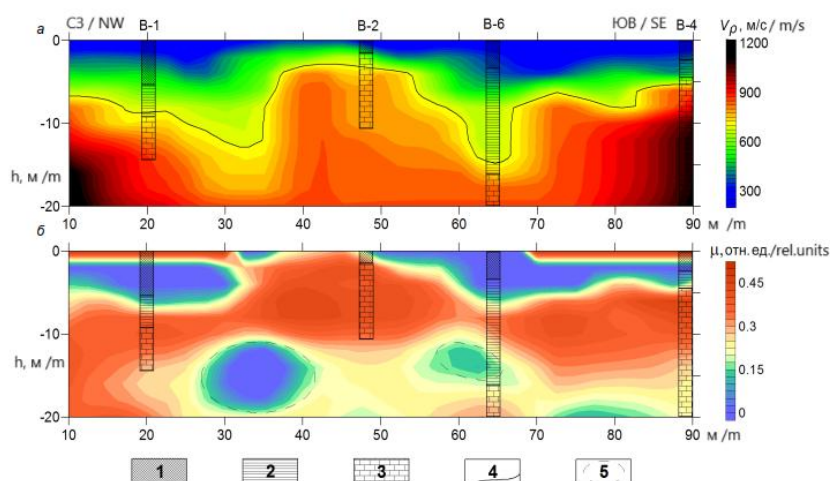


Рис. 3. Результаты геофизических работ на карстоопасном участке (г. Кунгур). а – скоростной сейсмический разрез продольных волн; б – разрез коэффициента Пуассона.

1 – насыпной грунт суглинистого состава ($\rho = 23\text{-}44 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);

2 – глина элювиальная ($\rho = 10\text{-}17 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); 3 – подстилающие породы ($\rho = 280\text{-}2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);

4 – ориентировочное положение кровли карстующихся пород по сейсмическим данным;

5 – зоны предполагаемого развития карста /

Fig. 3. Results of geophysical work in a karst-hazardous area (Kungur mountain).

a – high-speed seismic longitudinal wave section; b – Poisson's ratio section.

1 – bulk soil of loamy composition ($\rho = 23\text{-}44 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); 2 – clay eluvial ($\rho = 10\text{-}17 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);

3 – underlying rocks ($\rho = 280\text{-}2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); 4 – approximate position of the roof

of karst rocks according to seismic data; 5 – zones of proposed karst development

По изменению сейсмических скоростей и коэффициента Пуассона μ удалось проследить три основных структурных элемента разреза. Верхний слой (от 2 до 10 м) относится к рыхлым терригенным грунтам (суглинок, насыпной грунт) с пониженными скоростями продольных волн ($V_p = 250\text{-}600 \text{ м/с}$) и поперечных волн

($V_s = 150-300$ м/с) и низкими значениями коэффициента Пуассона ($\mu < 0,15$). Граница рыхлых отложений приблизительно соответствует скоростной изолинии $V_p = 700$ м/с. Второй и третий горизонты связаны с карбонатно-гипсовыми карстуемыми породами, отличающимися по структурно-прочностным характеристикам. Наиболее показательным упругим параметром для определения кавернозных зон и идентификации подземных пустот является коэффициент Пуассона. Его нормальные значения для монолитных и слабо дислоцированных пород составляют 0,25-0,45. Значения $\mu < 0,15$ свидетельствуют о сильном разуплотнении грунтов, характерном для трещиновато-кавернозных пород, а нулевые и кажущиеся отрицательные значения μ позволяют выделить подземные пустоты.

На полученном разрезе коэффициента Пуассона выделяются две зоны аномально низких значений на глубине 12-18 м (ПК 30-40 м и 60-65 м), говорящие о возможном нарушении структурной целостности грунтов с образованием каверн и подземных пустот. Результаты ВЭЗ на отметке 65 м (В-6) подтверждают наличие здесь карстовой воронки, заполненной глинистыми отложениями до глубины 16 м. О начавшейся просадке грунта свидетельствует появление трещин на стене дома и в одной из квартир. Аномалия в районе ПК 30-40 м указывает на вероятное нахождение еще более объемной карстовой полости [Давыдов и др., 2018].

5. Изучение оползневого склона вблизи эксплуатируемого газопровода. Описываемый участок (газопровод СРТО-Торжок) находится в Архангельской области, в 3 км от южной границы г. Котлас, на правом берегу р. Малая Северная Двина. Газопроводы относятся к особо ответственным сооружениям.

Интересная информация, связанная с оползнями на рассматриваемом участке, получена в результате картирования в плане элементов неоднородности по данным электрозондирования. Были окартурены три грунтовых тела, выявляющие структуру оползня на этом участке (рис. 4):

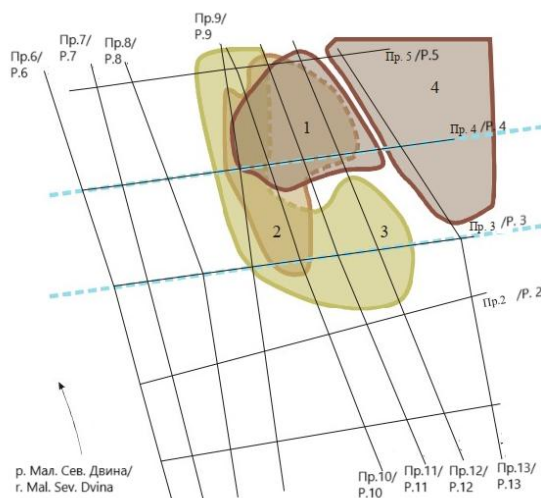


Рис. 4. Расположение элементов строения разреза по данным ВЭЗ, связываемых с оползневыми грунтами (элементы 1-3):

1 – суглинки с гравием и галькой; 2 – пески разуплотненные; 3 – пески с глинами;
4 – суглинки с гравием и галькой, залегающие в ненарушенном состоянии /

Fig. 4. Location of structural elements of the section according to VES data, associated with landslide soils (elements 1-3):

1 – loams with gravel and pebbles; 2 – decompacted sands; 3 – sands with clays;
4 – loams with gravel and pebbles, occurring in an undisturbed state

1) суглинки с гравием и галькой, отмеченные в разрезе скважин № № 004, 006 и 1427, образующие в плане изометричное тело мощностью 1-5,5 м. Минимальные отметки его подошвы около 55 м, в рельефе местности телу соответствует локальное возвышение; 2) пески с пониженной плотностью, тело неправильной формы (в плане), залегает под суглинками; мощность 1-6 м, минимальные отметки подошвы около 52 м, контуры тела тоже находят отражение в положительной форме рельефа местности; 3) грунты существенно глинистого состава слагают нижнее тело, выделенное по пониженным значениям электросопротивления, по гипсометрическим отметкам тело приурочено к подошве ИГЭ-11, эти грунты мощностью ~3 м вскрыты скважиной № 446, минимальная отметка подошвы 50 м.

Схема изогипс поверхности ИГЭ-21 по данным электроразведки говорит о наличии ложбины (переуглубления в поверхности ИГЭ-21) вблизи проектируемой резервной нитки (профиль 4). Это может быть связано как с водной эрозией, так и с древними оползневыми процессами. Полученные материалы геофизических исследований позволили достаточно уверенно выявить и картировать в плане оползневые образования, но не позволили повсеместно определить подошву оползня [Воронков и др., 2008].

6. Диагностирование оползнеопасных зон прибортового массива разреза «Ангренский». Разрез находится в Ташкентской области, г. Ангрен. Методы исследования: сейсмические исследования (методика кругового сейсмического зондирования), электропрофилирование.

В качестве основного результата обработки данных кругового сейсмического зондирования (КСЗ) определена величина коэффициента анизотропии $K_a = V_{p\parallel} / V_{p\perp}$, характеризующая потенциальную опасность оползнеобразования на изучаемом участке. $V_{p\parallel}$ и $V_{p\perp}$ – скорости распространения продольной волны в направлении, параллельном плоскости разуплотнения массива и перпендикулярном к ней соответственно. На рис. 5 графики изменения величины K_a по сейсмопунктам (СП), расположенным примерно параллельно бровке борта, на различных стадиях наблюдения и в зависимости от времени на СП, расположенных вблизи борта (СП 131), в средней (СП 132) и тыловой (СП 134) частях потенциально оползнеопасной зоны.

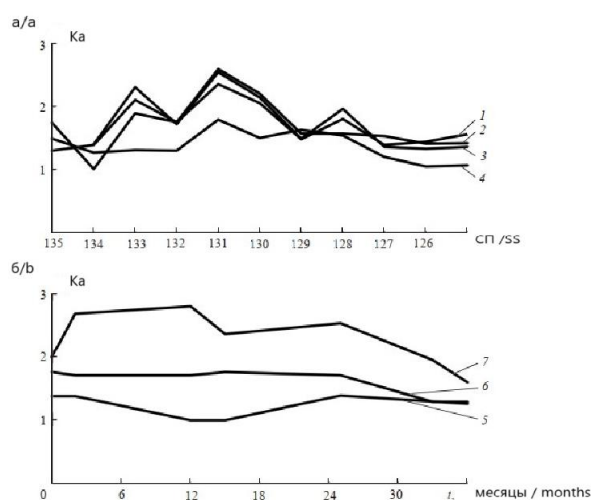


Рис. 5. График изменения величины K_a по номерам СП – а и в зависимости от времени наблюдения – б: 1 – $t = 0$; 2 – $t = 15$ мес.; 3 – $t = 25$ мес.; 4 – $t = 36$ мес.; 5 – СП 134; 6 – СП 132; 7 – СП 131 /

Fig. 3. Graph of change K_a by seismic station number (SN) – а and by time of observation – б: 1 – $t = 0$; 2 – $t = 15$ months; 3 – $t = 25$ months; 4 – $t = 36$ months; 5 – SN 134; 6 – SN 132; 7 – SN 131

Из приведенных результатов следует, что на границах геофизического профиля (СП134-СП135 и СП127-СП125) величина K_a находится в диапазоне $K_a = 1,04\text{--}1,73$, в то время как в центральной части профиля (СП 133-СП 130) она достигает максимальных значений $K_a = 2,00\text{--}2,80$ на интервале $t = 12\text{--}24$ мес. В дальнейшем (при $t > 24$ мес.) с образованием на земной поверхности борта трещин отрыва произошла разгрузка массива, приведшая к снижению анизотропии механических, акустических свойств массива и соответствующему уменьшению уровня $K_a < 1,6$.

Таким образом, экспериментально установлен критерий отнесения состояния участка массива к потенциально оползнеопасному по результатам кругового сейсмического зондирования – $K_a > 1,6$. Результатом электропрофилирования явилось определение границ зон увлажнения изучаемого объекта [Караблин, Простов, 2020].

7. Исследование участка деформации автодороги, построенной на мерзлом основании. Участок исследования, подверженный просадкам и оползневым деформациям, находится между федеральной трассой «Амур» и г. Чита в Забайкальском крае. Ранее здесь уже проводились инженерно-геологические изыскания с привлечением геофизических методов (ВЭЗ, ЭП). Однако сложность объекта и неполнота геофизических исследований не позволили тогда достичь достаточной информативности.

Настоящие же исследования проводились с использованием современной технологии электротомографии, которая показала высокую эффективность в изучении криолитозоны [Nauck, Kneisel, 2008 и др.]. На площади работ была разбита сеть профилей, расположенных вкрест простираения автодороги. Двумерные массивы данных по профилям преобразовывались в трехмерный куб данных, после чего выполнялась трехмерная инверсия. По результатам 3D инверсии строились объемные модели распределения УЭС в среде, по которым выполнялись погоризонтные срезы для построения карт УЭС на разных глубинах. Пример геоэлектрического разреза через претерпевший деформацию участок дороги по одному из профилей (№ V) показан на рис. 6.

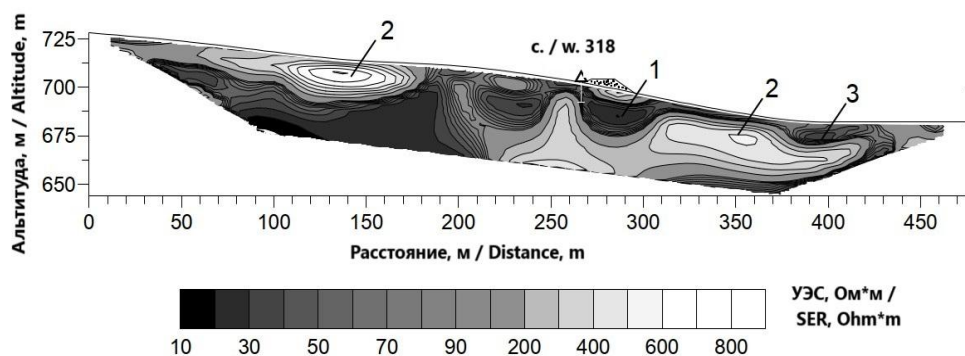


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю V [21]:

1 – чаша протаивания под автодорогой; 2 – многолетнемерзлые породы;
3 – подрусловой талик руч. Песчанка /

Fig. 6. Geoelectric section along profile V:

1 – thawing bowl under the road; 2 – permafrost; 3 – underbed talik of the stream. Peschanka

На разрезе выделяются комплексы пород высокого (более 200 Ом·м) и низкого (менее 50 Ом·м) электросопротивления. Породы с высоким УЭС интерпретируются как многолетнемерзлые. Их мощность оценивается в 25-30 м. Профиль № V прохо-

дит через скважину № 318. В интервале ПК 100-160 профиля № V в разрезе выделяется интенсивная аномалия высокого сопротивления, вызванная многолетнемерзлыми грунтами. Ниже дороги в интервале 300-370 м развиты оползневые ступени. На геоэлектрическом разрезе видно, что поверхностью скольжения является кровля пород высокого УЭС [Оленченко, Кондратьев, 2017]. В итоге, электротомография позволила решить задачи исследования: определение мощности многолетнемерзлых грунтов, установление причин деформации участка автодороги.

Выводы

Обзор геофизических методов, применяемых при изучении оползневых процессов, позволил сделать следующие выводы:

1. Геофизические методы позволяют проследивать изменения физико-механических свойств пород, слагающих оползневые массивы, во времени и пространстве. При этом сохраняется сплошность (целостность) изучаемых объектов.

2. Для изучения оползневых склонов, сложенных глинистыми породами, предпочтительнее применять современные томографические методы инженерной геофизики. Сейсмо- и электротомография позволяют с большой детальностью изучить неоднородные структуры с плохо выраженной дифференциацией глинистых пород, уточнить литологию разреза, а также выделить зоны ослабленных пород.

3. По результатам сейсмо- и электротомографических исследований возможно локализовать участки с повышенной влажностью и недостаточными для сопротивления движению глинистых пород прочностными характеристиками.

4. Комплексирование методов сейсморазведки и электроразведки дает возможность определить глубину залегания зеркала скольжения, с большей точностью оценить мощность глинистых и перекрывающих их пород, уточнить направление движения оползня.

5. При выявлении и оконтуривании оползневых объектов наиболее информативны методы КМПВ (сейсморазведка) и ВЭЗ (электроразведка). В условиях неоднородных песчано-глинистых пород для повышения достоверности интерпретации данных ВЭЗ желательно бурение опорных скважин.

6. Совместная интерпретация данных сейсмо- и электроразведочных исследований дает возможность картирования слоев водонасыщенных пород, которые увязываются с зеркалом скольжения оползня.

7. Электроразведка в модификации электротомографии повышает достоверность изучения элементов оползневого объекта, а также позволяет уверенно прогнозировать оползневые процессы.

8. Геофизические исследования позволяют выявить разнонаправленные разрывные нарушения (результат тектонических движений), которые возможно являются бровками будущих оползней. Такой вывод нашел подтверждение в районе Мингечаурского водохранилища (Азербайджан), где через некоторое время после выявления по результатам геофизического мониторинга ранее неизвестных разрывных нарушений произошел оползень.

9. Больше данных об изменениях физико-механических свойств грунтов, необходимых для выявления участков воздействия ОГП, позволяет получить комплексирование различных геофизических методов.

10. Проведенный обзор свидетельствует о востребованности геофизических исследований при изучении ОГП как природного, так и техногенного происхождения.

Заключение

Анализ и обобщение литературных источников и результатов работ многих исследователей позволил провести обзор существующих эффективных геофизических методов, дающих наибольшую информативность при решении инженерно-геологических, геоэкологических и геокриологических задач. За объект исследования в данной работе взят один из опасных геологических процессов – оползень. Приведена информация о характеристиках оползней, разных их классификациях (по тем или иным признакам) и причинах оползнеобразований. Основная часть работы посвящена обзору применяемых геофизических методов (в основном, сейсмо- и электроразведки) при изучении оползневых процессов и их прогнозировании, а также обзору конкретных примеров их использования.

Отличительной особенностью и основным преимуществом геофизических методов (неразрушительных) является тот факт, что они позволяют наблюдать за изменениями строения и физико-механических свойств слагающих оползневой массив пород в пространстве и времени без нарушения их сплошности. Кроме того, применение неразрушительных методов инженерной геофизики существенно снижает затраты времени и средств, при этом являясь наиболее целесообразным и эффективным способом изучения опасных геологических процессов.

Литература

1. Бурлуцкий С.Б., Кудашов Е.С. Оценка инженерно-геологических условий оползневых склонов: учебно-методическое пособие. – С-Пб.: Лема, 2018. – 35 с.
2. Воронков О.К., Сигачева Н.Н., Моторин Г.А., Ушакова Л.Ф. Геофизические исследования оползневого склона вблизи эксплуатируемого газопровода. // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2008. – Т. 250. – С. 92–99.
3. Давыдов В.А., Щапов В.А., Цай Г.А. Изучение опасных природных и техногенных геологических процессов с помощью геофизических методов. // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – № 2 (50). – С. 65–71.
4. Ежов В.С., Хорошилов В.С. Строение и классификация оползней. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 6. – С. 54–61.
5. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. – 310 с.
6. Ескин А.Ю., Джурик В.И., Серебrenников С.П., Брыжак Е.В., Демин А.А. Геофизические исследования участка оползня в районе поселка Харанцы на острове Ольхон. // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 4 (57). – С. 130–136.
7. Заалишвили В.Б., Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 85–98.
8. Караблин М.М., Простов С.М. Диагностирование оползнеопасных зон прибортового массива разреза «Ангренский» по данным сейсмо- и электроразведки. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 48–59.
9. Керимов И.А., Гакаев Р.А., Батукаев А.А. Изучение оползневых процессов горных территорий Чеченской Республики: системно-методологические основы. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2024. – Т. 9. № 2(36). – С. 34–41.
10. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 49–62.

11. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневой процесса на европейской территории СССР и его региональный прогноз. М.: Недра, 1980. – 210 с.
12. Оленченко В.В., Кондратьев В.Г. Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мерзлом основании. // Вестник Северо-Восточного государственного университета. – 2017. – №27. – С. 116–119.
13. Павлов А.П. Оползни Симбирского и Саратовского Поволжья. М.: Университетская типография, 1903. – 69 с.
14. Пендин В.В. Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. – 316 с.
15. Петров Н.Ф. Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации). Киселев: Штиинца, 1988. – 226 с.
16. Попов И.В. Инженерная геология. М.: МГУ, 1952. – 512 с.
17. Саваренский Ф.П. Опыт построения классификации оползней. // Труды I Всесоюзного оползневой совещания. Л.; Москва: ОНТИ, 1935. – С. 29–37.
18. Саламов А.М., Габибов Ф.Г., Богомолова О.А. Исследование оползневых процессов на правом берегу Мингечаурского водохранилища методами электроразведки. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. – №20 (39). – С. 33–39.
19. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивость оползневых склонов. М.: Наука, 1988. – 144 с.
20. Чаплыгин Д.Е. Использование методов электроразведки для прогноза оползневых процессов на трассе магистральных трубопроводов. // Сборник статей II Международной научно-практической конференции «Развитие современной молодежной науки: опыт теоретического и эмпирического анализа». Петрозаводск: Новая наука. – 2021. – С. 254–260.
21. Шуляков Д.Ю. Прогнозирование оползней: обзор методов. // Сборник статей Географические исследования Краснодарского края. Вып. 5. Краснодар: КГУ, 2010. – С. 55–57.
22. Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2010. – Vol. 69. No. 4. – pp. 533–548.
23. Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511535628.
24. Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M. Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada. // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 150. – pp. 40–51.
25. Sjö Dahl P., Dahlin T., Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. // Environmental Geology. – 2005. – Vol. 49. No. 2. – pp. 267–273.
26. Sloan S.D., Peterie S.L., Miller R.D., Ivanov J., Schwenk J.T., McKenna J. R. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. // Geophysics. – 2015. – Vol. 80. No. 5. – pp. 127–135.
27. Vorobyov A.E., Hovhannisyan A.H., Kozhogulova G.K. Identifying the main features of landslide movement and developing the basic mechanisms. // In: Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering. – 2022. – No. 1. – pp. 97–109.
28. Yang J., Shragge J., Girard A.J., Gonzales E., Ticona Ja., Minaya A., Krahenbuhl R. Seismic characterization of a landslide complex: a case history from Majes, Peru. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. No. 18. – pp. 1–15.
29. Zakaria M.T., Mohd muztaza N., Zabidi H., Salleh A.N., Mahmud N., Rosli F.N. Integrated analysis of geophysical approaches for slope failure characterization. // Environmental Earth Sciences. – 2022. – Vol. 81. No. 10. – pp. 1–21.

References

1. Burlutsky S.B., Kudashov E.S. Assessment of engineering-geological conditions of landslide slopes. Educational manual. Saint Petersburg. Lema. 2018. 35 p. (In Russ.)
2. Voronkov O.K., Sigacheva N.N., Motorin G.A., Ushakova L.F. Geophysical studies of a landslide slope near an operating gas pipeline. Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after. B.E. Vedeneev. 2008. Vol. 250. pp. 92–99. (In Russ.)
3. Davydov V.A., Shchapov V.A., Tsai G.A. Study of hazardous natural and anthropogenic geological processes using geophysical methods. Proceedings of the Ural State Mining University. 2018. No. 2 (50). pp. 65–71. (In Russ.)
4. Ezhov V.S., Khoroshilov V.S. Structure and classification of landslides. Interexpo Geo-Siberia. 2022. Vol. 6. pp. 54–61. (In Russ.)
5. Emelyanova E.P. Basic patterns of landslide processes. Moscow. Nedra. 1972. 310 p. (In Russ.)
6. Eskin A.Yu., Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V., Demin A.A. Geophysical studies of the landslide site near the village of Kharantsy on Olkhon Island. Proceedings of the Siberian Branch of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits. 2016. No. 4 (57). pp. 130–136. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Golik V.I. Geophysical support for mining production. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 85–98. (In Russ.)
8. Karablin M.M., Prostov S.M. Diagnosis of landslide-hazardous zones of the near-edge massif of the Angrensky section based on seismic and electrical survey data. Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining magazine. 2020. No. 1. pp. 48–59. (In Russ.)
9. Kerimov I.A., Gakaev R.A., Batukaev A.A. Study of landslide processes in mountain areas of the Chechen Republic: systemic and methodological foundations. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2024. Vol. 9. No. 2(36). pp. 34–41. (In Russ.)
10. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Geophysical research on the carbon polygon of the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 49–62. (In Russ.)
11. Kuntzel V.V. Regularities of the landslide process on the European territory of the USSR and its regional forecast. Moscow. Nedra. 1980. 210 p. (In Russ.)
12. Olenchenko V.V., Kondratyev V.G. Geophysical research within the deformation area of a road built on a frozen foundation. *Bulletin of the North-Eastern State University*. 2017. No. 27. pp. 116–119. (In Russ.)
13. Pavlov A.P. Landslides of the Simbirsk and Saratov Volga regions. Moscow. University Printing House. 1903. 69 p. (In Russ.)
14. Pendin V.V., Fomenko I.K. Methodology for assessing and forecasting landslide hazard. Moscow. LENAND. 2015. 316 p. (In Russ.)
15. Petrov N.F. Landslide systems. Simple landslides (classification aspects). Chisinau. Shtiintsa. 1988. 226 p. (In Russ.)
16. Popov I.V. Engineering geology. Moscow. MSU. 1952. 512 p. (In Russ.)
17. Savarensky F.P. Experience in constructing a classification of landslides. In: Proceedings of the I All-Union landslide Meeting. Leningrad. Moscow. ONTI. 1935. pp. 29–37. (In Russ.)
18. Salamov A.M., Gabibov F.G., Bogomolova O.A. Study of landslide processes on the lower bank of the Mingachevir reservoir using electrical prospecting methods. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series. Construction and architecture*. 2010. No. 20 (39). pp. 33–39. (In Russ.)
19. Tikhvinsky I.O. Assessment and forecast of stability of landslide slopes. Moscow. Nauka. 1988. 144 p. (In Russ.)
20. Chaplygin D.E. Using electrical prospecting methods to predict landslide processes along the route of main pipelines. In: Proceedings of the II International Scientific and Practical

Conference “Development of modern youth science: experience of theoretical and empirical analysis”. Petrozavodsk. Novaya nauka. 2021. pp. 254–260. (In Russ.)

21. Shulyakov D.Yu. Landslide forecasting: a review of methods. In: Proceedings of the Geographical studies of the Krasnodar region. Issue 5. Krasnodar. KSU. 2010. pp. 55–57. (In Russ.)

22. Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2010. Vol. 69. No. 4. pp. 533–548.

23. Hauck C., Kneisel C. *Applied geophysics in periglacial environments*. Cambridge. Cambridge University Press. 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511535628.

24. Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M. Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada. *Journal of Applied Geophysics*. 2018. Vol. 150. pp. 40–51.

25. Sjö Dahl P., Dahlin T., Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. *Environmental Geology*. 2005. Vol. 49. No. 2. pp. 267–273.

26. Sloan S.D., Peterie S.L., Miller R.D., Ivanov J., Schwenk J.T., McKenna J.R. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. *Geophysics*. 2015. Vol. 80. No. 5. pp. 127–135.

27. Vorobyov A.E., Hovhannisyan A.H., Kozhogulova G.K. Identifying the main features of landslide movement and developing the basic mechanisms. In: Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering. 2022. No. 1. pp. 97–109.

28. Yang J., Shragge J., Girard A.J., Gonzales E., Ticona Ja., Minaya A., Krahenbuhl R. Seismic characterization of a landslide complex: a case history from Majes. Peru. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 18. pp. 1–15.

29. Zakaria M.T., Mohd muztaza N., Zabidi H., Salleh A.N., Mahmud N., Rosli F.N. Integrated analysis of geophysical approaches for slope failure characterization. *Environmental Earth Sciences*. 2022. Vol. 81. No. 10. pp. 1–21.

УДК 550.361

DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

Оригинальная статья

Тепловое поле Воронежского кристаллического массива

Д.С. Никитин^{id}, Е.Л. Прикащикова^{id}, М.Д. Хуторской^{id}

Геологический институт РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1,
e-mail: ndsnomination@mail.ru

Статья поступила: 03.09.2024, доработана: 31.10.2024, принята к публикации: 03.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Исследование теплового потока дает основную и достоверную информацию о глубинных температурах в земной коре, о фазовом состоянии вещества, что, в конечном итоге, позволяет судить о природе движущих сил тектогенеза. Детальный анализ распределения теплового потока (ТП) в разных структурно-формационных зонах Восточно-Европейской платформы (ВЕП) показывает, что его величина связана со многими геологическими неоднородностями строения фундамента и осадочного чехла платформы, а также обуславливается особенностями истории становления современной структуры регионов. **Цель работы.** В этом аспекте ставилась задача проанализировать распределение теплового потока и его радиогенной компоненты в районе Воронежского кристаллического массива (ВКМ). **Методы.** Исследованы теплопроводность образцов керн из скважины «Воронежская параметрическая» методом оптического сканирования и величина радиогенной теплогенерации за счет спонтанного распада долгоживущих изотопов урана, тория и калия рентгеноспектральным флуоресцентным методом на рентгеновском вакуумном спектрометре. Рассчитанный редуцированный тепловой поток задан как нижнее граничное условие при численном моделировании глубинных температур по профилю, секущему ВКМ. **Результаты.** Определено среднее значение теплового потока на Воронежском выступе (49 ± 4 мВт/м²). Радиогенная компонента теплового потока составляет 24–27 мВт/м², т.е. 50% от его фонового значения. Обнаруженные вариации ТП обусловлены структурно-теплофизическими неоднородностями. Они связаны с проявлениями трещиноватости, микро- и макровключениями в породы фундамента и хорошо заметны при оптическом сканировании теплопроводности практически каждого образца керн. Построена карта распределения теплового потока и рассчитаны глубинные температуры вдоль профиля вкрест простираения Воронежского кристаллического массива.

Ключевые слова: тепловой поток, теплопроводность, теплогенерация, Восточно-Европейская платформа, Воронежский кристаллический массив.

Благодарности: Работа подготовлена в рамках Госбюджетной темы ГИН РАН № 122012700311-2 и при финансовой поддержке Российского научного Фонда, грант № 23-17-00019.

Для цитирования: Никитин Д.С., Прикащикова Е.Л., Хуторской М.Д. Тепловое поле Воронежского кристаллического массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 84–99. DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

Original paper

The thermal field of the Voronezh crystal massif

D.S. Nikitin^{id}, E.L. Prikatshikova^{id}, M.D. Khutorskoy^{id}

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7/1 Pyzhevskiy Lane,
Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: ndsnomination@mail.ru

Received: 03.09.2024, revised: 31.10.2024, accepted: 03.11.2024

Abstract: Relevance. The heat flow study provides basic and reliable information on the terrestrial temperatures in the Earth's crust, on the matter phase state, which, ultimately, allows us to judge the nature of the tectogenesis driving forces. A detailed heat flow (HF) distribution analysis in different structural and formation zones of the East European Platform (EEP) shows that its magnitude is related to many geological heterogeneities of the basement structure and sedimentary cover of the platform, and is also conditioned by the peculiarities of the formation history of the regions modern structure. **Aim.** In this aspect was set the task to analyze the heat flow distribution in the area of the Voronezh crystalline massif (VCM). **Methods.** The thermal conductivity of core samples from the Voronezh parametric well with optic-scan method and the magnitude of radiogenic heat generation due to spontaneous decay of long-lived isotopes of uranium, thorium and potassium by X-ray fluorescence spectral method on X-ray vacuum spectrometer were investigated. The calculated reduced heat flow is set as a lower boundary condition in the numerical modeling of the depth temperatures along the profile across to the VCM. **Results.** The heat flow average value at the Voronezh massif (49 ± 4 mW/m²) was determined. The radiogenic component of heat flow is 24-27 mW/m², i.e. 50% of its background value. The detected HF variations are caused by structural and thermophysical inhomogeneities. They are associated with fracturing, micro- and macroinclusions in the basement rocks and are clearly visible at optical scanning of thermal conductivity of almost every core sample. The heat flow distribution map was constructed and the depth temperatures were calculated along the profile across the Voronezh crystalline massif.

Keywords: heat flow, thermal conductivity, heat production, East-European platform, Voronezh crystal massif.

Acknowledgments: The work was prepared within the State Budget theme framework of RAS Geological Institute No. 122012700311-2 and with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 23-17-00019.

For citation: Nikitin D.S., Prikatshikova E.L., Khutorskoy M.D. The thermal field of the Voronezh crystal massif. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 84-99. DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

Введение

Основной объем материалов о тепловом потоке (ТП) на Восточно-Европейской платформе (ВЕП) был получен в 70-е и в начале 80-х годов XX века. В обобщающих монографиях, посвященных описанию термического режима платформы, указаны пределы его изменения от 35 до 55 мВт/м² [Тепловой режим ..., 1970; Глубинный тепловой поток ..., 1974], что свидетельствовало об относительной однородности ТП. Для докембрийской Восточно-Европейской платформы этот вывод подтверждал установленную ранее генетическую связь величин теплового потока и возраста тектономагматических циклов [Поляк, Смирнов, 1968; Хуторской и др., 2023]. Отмечалось, что наибольшие вариации ТП в указанных пределах приурочены к зонам дислокаций фундамента, а также к экзогональным впадинам платформ с широким развитием солянокупольной тектоники.

Однако детальный анализ распределения теплового поля в разных структурно-формационных зонах ВЕП показывает, что величина ТП связана со многими геологическими неоднородностями строения фундамента и осадочного чехла платформы, а также обуславливается особенностями истории становления современной структуры регионов.

Выступы докембрийского фундамента на ВЕП являются эталонными объектами для характеристики ТП платформы, т.к. в этих структурах искажающее влияние контрастной теплопроводности между осадочными породами чехла и метаморфическими породами фундамента минимально. Воронежский кристаллический массив (ВКМ) является одним из таких выступов.

Согласно существующим представлениям в строении докембрийского фундамента ВКМ выделяются два мегаблока: восточный (Воронежский), сложенный нижнепротерозойскими образованиями, и западный (Курский), характеризующийся преобладанием архейских пород, среди которых нижнепротерозойские отложения наблюдаются лишь в узких синклиналих зонах [Кременецкий и др., 2006] (рис. 1).

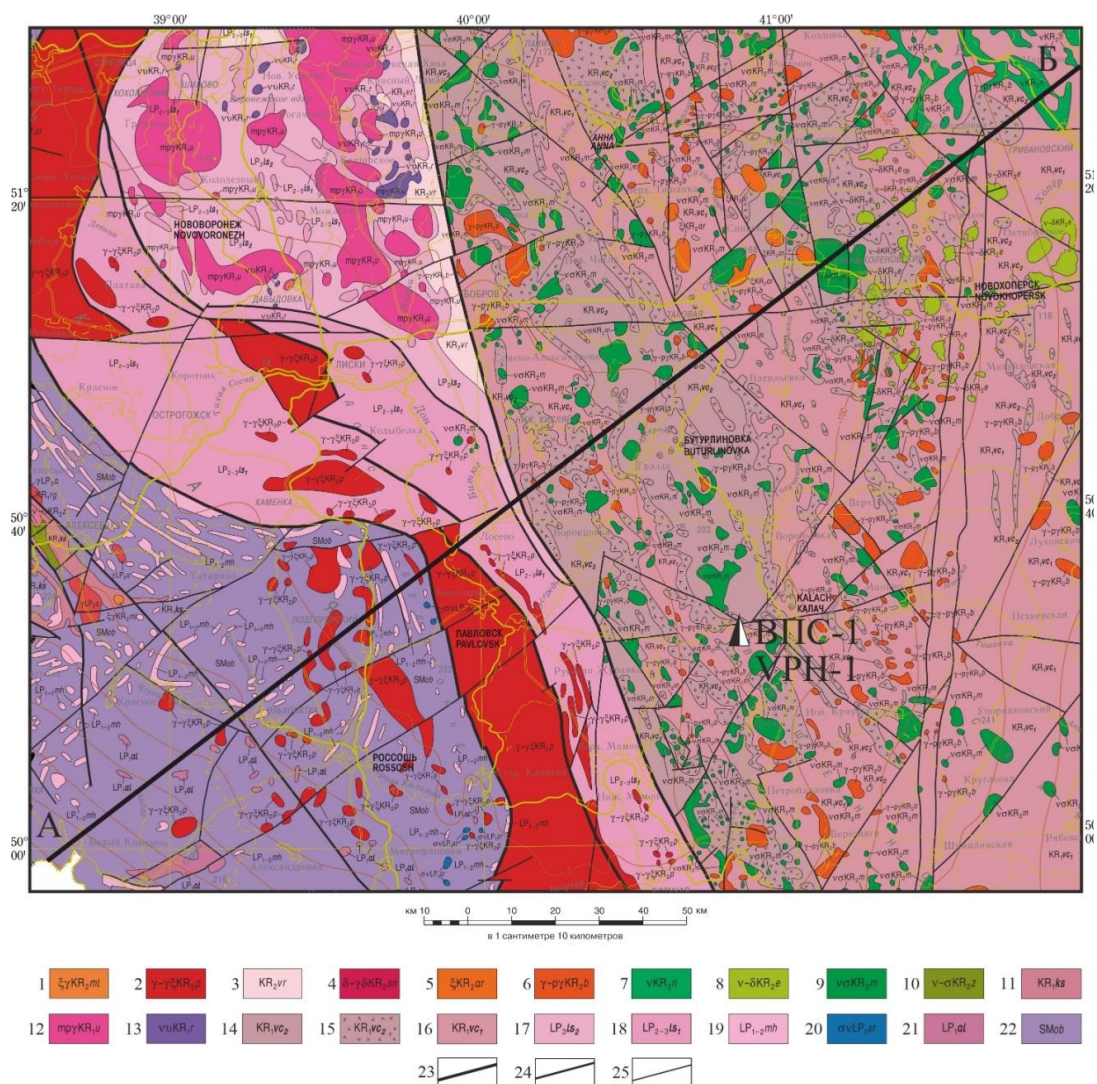


Рис. 1. Геологическая карта докембрийского фундамента в районе бурения ВПС-1 и расположение профиля А-Б:

- 1 – шебекинский габбро-сиенитовый комплекс; 2 – павловский гранит-граносиенитовый комплекс; 3 – воронежская свита, метаэффузивы основного и среднего состава; 4 – стойло-николаевский диорит-гранодиоритовый комплекс; 5 – артюшковский щелочно-сиенитовый комплекс;

6 – бобровский гранит-плагиогранитный комплекс; 7 – новогольский габбро-долеритовый комплекс; 8 – еланский норит-диоритовый комплекс; 9 – мамонский перидотит-габбро-норитовый комплекс; 10 – золотухинский габбро-перидотитовый комплекс; 11 – курская серия: метапесчаники, метаалевролиты; 12 – усманский мигматит-плагиогранитный комплекс; 13 – рождественский комплекс габбро-норит-перидотитовый; 14 – воронцовская серия (нижняя толща): ритмично переслаивающиеся метапесчаники с прослоями сланцев, реже метаалевролитов; 15 – верхняя толща: ритмично переслаивающиеся сланцы, метаалевролиты и метапесчаники (в основании толщи с прослоями углерод- и сульфидсодержащих сланцев); 16 – терригенно-туфогенная толща; 17-19 – лосевская серия: 17 – метадациты, метарьолиты; 18 – метавулканиты, амфиболиты; 19 – михайловский метаморфический комплекс; 20 – сергиевский габбро-дунит-перидотитовый комплекс; 21 – александровская серия ортоамфиболитов; 22 – обоянский плутоно-метаморфический комплекс; 23-25 – разломы: 23 – трансрегиональные I порядка, 24 – региональные II порядка, 25 – прочие /

Fig. 1. Precambrian fundament geological map in the area of VPH-1 hole and A-B profile location:

1 – Shebekinsky gabbro-syenite complex; 2 – Pavlovsky granite-granosyenite complex; 3 – Voronezh Formation, metaeffusives of basic and medium composition; 4 – Stoilo-Nikolaevsky diorite-granodiorite complex; 5 – Artyushkovsky alkaline-syenite complex; 6 – Bobrovsky granite-plagiogranite complex; 7 – Novolsky gabbro-dolerite complex; 8 – Elan norite-diorite complex; 9 – Mamonsky peridotite-gabbro-norite complex; 10 – Zolotukhinsky gabbro-peridotite complex; 11 – Kursk series: metasandstones, metasiltstones; 12 – Usman migmatite-plagiogranite complex; 13 – Rozhdestvensky gabbro-norite-peridotite complex; 14 – Vorontsov series (lower strata): rhythmically interbedded metasandstones with interlayers of shales, less frequently metaaleurolites; 15 – upper strata: rhythmically interbedded shales, metaaleurolites and metasandstones, at the base of the strata with interlayers of carbon- and sulfide-bearing shales); 16 – terrigenous-tuffogenic strata; 17-19 – Losev series: 17 – metadacites, metaryolites; 18 – metavolcanites, amphibolites; 19 – Mikhailovsky metamorphic complex; 20 – Sergievsky gabbro-dunite-peridotite complex; 21 – Alexandrovsky series orthoamphibolites; 22 – Oboyansky plutono-metamorphic complex; 23-25 – faults: 23 – transregional I order; 24 – regional II order; 25 – other

Геотермические параметры: методы исследования и результаты

A. Региональный тепловой поток

В этой работе мы рассмотрели распределение всех геотермических параметров, описывающих тепловое поле земной коры в районе Воронежского кристаллического массива, и рассчитали глубинные температуры вдоль фрагмента регионального профиля 1-ЕВ в районе бурения глубокой параметрической скважины ВПС-1.

Воронежская параметрическая скважина пробурена в пределах Воронежского мегаблока, сложенного нижнепротерозойскими метатерригенными образованиями воронцовской серии, которые прорываются ультрамафит-мафитовыми интрузиями мамонского комплекса, а также биотитовыми и двуслюдяными гранитами бобровского комплекса. К востоку и юго-востоку от ВПС-1 расположен Калачевский грабен, выполненный толщей базальтов и андезитобазальтов с прослоями песчаников.

На ВКМ сделано относительно немного измерений теплового потока (табл.1), но все же они дают представление о термическом режиме этой структуры.

Таблица 1 / Table 1

**Распределение теплового потока на Воронежском кристаллическом массиве /
Heat flow distribution in Voronezh crystal massif**

№ п/п	В.д., ° longitude	С.ш., ° latitude	Высота, м Altitude, m	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	Тепловой поток, мВт/м ² Heat flow, mW/m ²
1	36,25	50,25	180		33
2	36,25	50,25	170	3,16	74
3	36,48	50,43	170	1,95	52
4	37,58	50,50	190	3,4	62
5	37,33	50,50	190	2,85	52
6	36,67	50,58	200	1,55	74
7	36,53	50,63	212		50
8	36,83	50,75	210		36
9	36,83	50,75	210	3,01	61
10	36,83	50,75	210		33
11	36,83	50,75	210		59
12	36,83	50,75	210	3,01	56
13	36,83	50,75	210		54
14	38,58	50,75	200	1,79	42
15	36,83	50,75	200		42
16	36,50	50,8	210	2,36	43
17	36,52	50,8	212	2,7	33
18	36,50	50,8	218		46
19	37,17	50,83	220	2,8	56
20	37,17	50,83	220	3,17	56
21	43,80	50,85	220		38
22	37,83	50,92	230		59
23	36,17	51,00	230		63
24	36,17	51,00	230		43
25	36,17	51,00	240	2,55	25
26	36,17	51,00	230		48
27	36,17	51,00	205		80
28	36,17	51,00	205		49
29	36,00	51,42	185	3,12	64
30	37,50	51,58	240	2,55	51
31	40,05	52,18	200		62
32	37,03	52,97	190	2,5	38

В северной и центральной частях ВКМ тепловой поток изменяется от 33 до 47 мВт/м², но на Яковлевском месторождении получены значения 56–59 мВт/м². Геотермический отряд ИФЗ РАН, получивший эти данные [Геотермические..., 1964], предполагал, что вариации связаны со структурным фактором, однако количественные оценки не были приведены. Повышение теплового потока до 60–65 мВт/м² зафиксировано в долине р. Сейм южнее Курска. Среднее значение теплового по-

тока на Воронежском выступе составляет 49 ± 4 мВт/м² (рис. 2). На южном склоне выступа, в сторону Днепровско–Донецкой впадины, тепловой поток повышается до 46–62 мВт/м². Повышение теплового потока здесь связывается с наличием разломов в фундаменте и контактом с палеозойской структурой Большого Донбасса. В самой Днепровско–Донецкой впадине и в Донбассе зафиксированы умеренные значения теплового потока – 40–50 мВт/м². Строение фундамента и осадочной толщи здесь мало влияет на распределение теплового потока. Не проявляются в тепловом поле погружение фундамента в юго-восточном направлении и перемещения отдельных блоков по разломам. На отдельных локальных структурах, приуроченных к соляным куполам или нефтегазоносным структурам, наблюдается повышение теплового потока до 55–65 мВт/м². Особенно заметное повышение потока отмечается в зонах пересечения глубинных разломов.

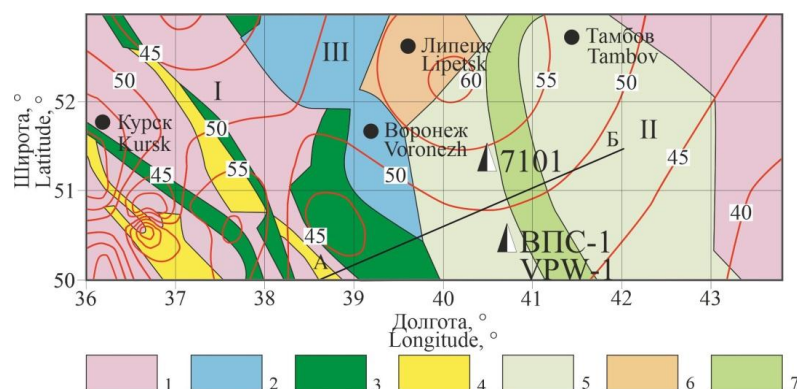


Рис. 2. Тектоническая схема Воронежского кристаллического массива и распределение теплового потока (красные изолинии, мВт/м²):

1 – раннеархейские мегаблоки; 2 – зона раннего карелия; 3 – структурные комплексы позднего архея; 4 – структурные комплексы раннего карелия; 5 – Воронцовский эпикратонный прогиб раннего карелия; 6 – Воронежско-Шукавская наложенная грабен-синклиналь; 7 – Калач-Эртильская наложенная структура (реактивизированный рифт). Римскими цифрами показаны мегаблоки: Курский (I), Воронежский (Хоперский) (II), Лосевский (III). Треугольники – положение Воронежской параметрической скважины ВПС-1 и скв. № 7101. Линией показано расположение профиля А-Б (см. рис. 1) /

Fig. 2. Tectonic pattern of the Voronezh crustal massif and heat flow distribution (red isolines, MW/m²): 1 – early Archean megablocks; 2 – early Karelian zone; 3 – structural complexes of the late Archean; 4 – structural complexes of the early Karelia; 5 – Vorontsov epicratonic trough of the early Karelia; 6 – Voronezh-Shukava superimposed graben syncline; 7 – Kalach-Ertel superimposed structure (reactivated rift). The following megablocks are shown in Roman numerals: Kursky (I), Voronezh (Khopersky) (II), Losevsky (III). Triangles are the holes location of VPH-1 and 7101. Line is the A-B profile location (see fig. 1)

При расчете глубинного фонового значения ТП следует количественно оценить наиболее значимые искажающие поверхностные факторы, среди которых влияние структурно-теплофизических неоднородностей геологического разреза на стабильных докембрийских платформах является решающим.

Б. Теплопроводность горных пород

Теплопроводность пород нами изучалась по образцам керна из скважины ВПС-1. Измерения проводились методом оптического сканирования на усовершенствованной установке ТС-14 [Никитин и др., 2016].

Таблица 2 / Table 2

**Результаты измерения теплопроводности образцов /
The thermal conductivity measurements results**

Отбор образцов по скважинам / Sampling by holes				Теплопроводность, Вт/(м·К) / Thermal conductivity, W/(m·K)				Описание пород / Rocks description
№ п/п	№ скважины Hole number	Глубина, м / Depth, m	№ образца / Sample number	Среднее / mean	мин. / min	макс. / max	Дисперсия / dispersion	
1	ВПС-1	150,87	2890	4,14	2,77	4,54	0,11	Диорит-порфирит кварцевый / Diorite-porphyrite quartz
2		250,84	4	3,67	2,67	3,74	0,04	„
3		309,73	292	3,10	2,53	4,05	0,07	„
4		451,74	407	3,50	2,73	4,73	0,24	„
5		500,09	653	3,75	2,23	3,13	0,03	„
6		650	944	2,57	2,43	3,49	0,05	Бiotит-рогово- обманковый диорит / Biotite-hornblende diorite
7		745,22	1354	2,95	2,38	3,45	0,04	„
8		850,84	1385-2	2,78	2,69	4,74	0,15	„
9		942,11	1848-2	3,38	2,39	3,32	0,04	„
10		1050,74	1894	2,83	3,17	4,39	0,06	„
11		1145,29	2366	3,68	3,17	5,00	0,09	„
12		1252,19	2382	3,67	2,48	3,19	0,02	„
13		1347,99	2762	2,85	2,65	3,44	0,02	„
14		1412	2773-2	3,05	3,39	5,69	0,17	Бiotитовый горнблен- дит / Biotite hornblendite
15		1600,69	3125	4,79	3,64	6,97	0,47	Метapесчаник, метаа- левролит / Metasandstone, metalevelite
16		1635,91	3213	3,30	2,84	3,88	0,05	Бiotит-роговообманко- вый диорит / Biotite-hornblende diorite
17		1720	3214	3,48	3,01	4,37	0,07	„
18		1802,67	3391	3,45	2,15	4,93	3,45	Сланцы / Shale
19		1869,91	3532	3,89	3,47	4,58	0,07	„
20		1978	3558	3,79	2,89	5,04	0,26	Метapесчаник, метаа- левролит / Metasandstone, metalevelite
21		2045,53	3772	4,44	3,42	6,29	0,39	„
22		2147,53	3784	3,92	2,90	5,96	0,50	„
23		2147,96	3785	3,63	3,31	3,95	0,03	„
24		2249,97	4100	1,80	1,67	1,96	1,67	„
25		2350	4101	3,57	3,02	4,21	0,05	Сланцы / Shale
26		2403,14	4359	4,47	3,86	5,58	0,09	„
27		2449,69	4553	3,85	3,48	4,21	0,03	„
28		2551,44	4559	4,21	3,52	5,27	0,15	„
29		2650,26	4915	4,81	3,91	6,07	0,21	Метapесчаник, метаа- левролит, переслаивание со сланцами
30		2700,1	5091	5,00	4,13	6,66	0,19	Metasandstone, metasiltstone, interbedded with shale
31		2751,88	5348	4,58	2,27	5,88	0,73	„
32		2850,37	5900-1	4,04	3,22	5,07	0,23	„
33		2948,26	6231	2,95	2,61	3,42	0,02	„
34		3000,41	6405	3,05	2,18	4,16	0,29	„
35		3002,06	6416	2,55	1,95	3,70	0,19	„
36		3003,03	6422	2,90	2,38	3,38	0,07	„

В таблице 2 приведены результаты изучения теплопроводности. Визуально заметно увеличение теплопроводности в интервале глубин 800–2800 м. Однако, статистически значимой корреляции этих параметров мы не установили. Очевидно, что вариации значений теплопроводности образцов обуславливаются микровключениями и микротрещиноватостью, о чем свидетельствуют скан-граммы теплопроводности (рис. 3).

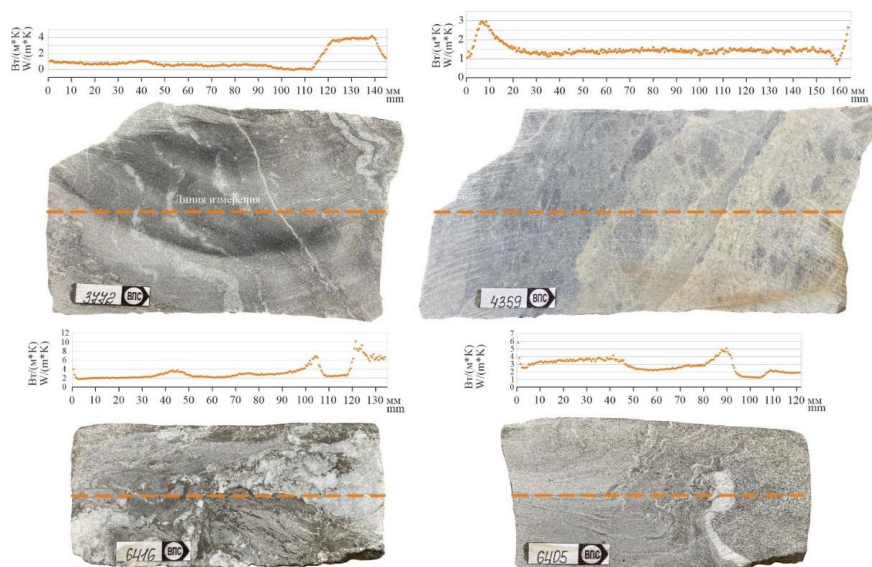


Рис. 3. Результаты оптического сканирования теплопроводности /

Fig. 3. The thermal conductivity optic-scan results

Анализ изучения теплофизических свойств показал, что, несмотря на разные типы горных пород, вскрытых скважиной, статистически значимого различия средних значений в группах пород не наблюдается. Большинство измерений находилось в диапазоне от 2,8 до 3,8 Вт/(м·К) (рис. 4) и фиксировалось как для диоритов и порфиритов, так и для метапесчаников и сланцев.

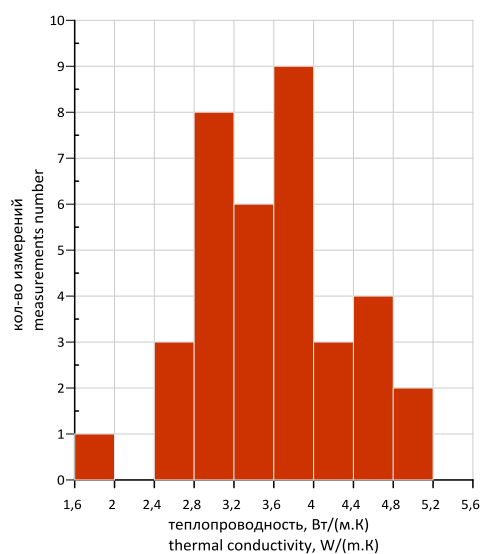


Рис. 4. Гистограмма распределения теплопроводности пород из скважины ВПС-1 /

Fig. 4. The histograms of thermal conductivity distribution from VPH-1 hole

В. Структура теплового потока

Среди архей–протерозойских структур восточного полушария наиболее полно исследованы параметры и компоненты теплового поля Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Детальный анализ радиогенной теплогенерации в отдельных слоях земной коры и в разных структурно-формационных зонах платформы приведен в монографии [Боганик, 1975]. В дальнейшем, некоторые аналитические данные и расчеты были уточнены [Кутас, 1978; Смыслов и др., 1979; Сальников, 1984], что привело даже к изменению идеологии оценки роли корового и мантийного тепла. Так, по данным Н.С. Боганика [1975], на платформе выделяются некоторые области, где наблюдаемый тепловой поток полностью обеспечивается радиогенной теплогенерацией (восточная часть Балтийского щита, Воронежский кристаллический массив, Украинский щит, западная и центральная части Прикаспийской впадины). В большинстве же структур платформы, по его мнению, соотношение корового и «подкорового» тепловых потоков составляет 9:1. Лишь на периферии платформы, вблизи более молодых тектонических структур Карпат, Кавказа и Урала, доля тепла, поступающего к подошве земной коры, увеличивалась до 20%.

«Изменение идеологии» оценки роли коровой и мантийной компонент теплового потока было обусловлено появлением более точных и многочисленных измерений теплового потока на ВЕП, а также совершенствованием аналитической базы для определения концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в образцах керн [Смыслов и др., 1979]. По данным А.А. Смыслова и У.И. Моисеенко, из мантии поступает 30–40% наблюдаемого на поверхности теплового потока, а в Московской синеклизе (данные по скважинам вблизи г. Данилов и г. Солигалич) – 40–45%. Эти оценки уже сопоставимы с теми, которые приводятся для других древних платформ [Pinet et al., 1991; Rudnick, Fountain, 1995; Rudnick et al., 1998; McLennan, Taylor, 1996; Perry et al., 2006].

К сожалению, авторы работ по структуре теплового потока на ВЕП не обсуждают реальные модели вертикального распределения теплогенерации, категорически заявляя, что «...распределение радиоактивных элементов в породах архея, протерозоя, палеозоя и мезо–кайнозоя (*авторское написание*) не подчиняется экспоненциальному закону, причем протерозойский комплекс пород выделяется наиболее высокими содержаниями их. В пределах больших стратиграфических интервалов распределение радиоактивных элементов обуславливается главным образом литологическим составом пород» [Боганик, 1975, с. 35]. Однако там же, приводя данные о радиогенной теплогенерации в карбонатах стратиграфических комплексов ВЕП, указывается на то, что в четвертичных отложениях, да и в среднем для кайнозоя, теплогенерация ($A_{\text{рад.}}$) составляет 1,34 мкВт/м³, а в ордовик–силурийских – 0,44 мкВт/м³.

Уменьшение теплогенерации с глубиной всё же дает основание предположить экспоненциальный характер ее убывания. Учитывая, что параметр D в экспоненциальной модели численно равен глубине, на которой теплогенерация убывает в « e » (2,718) раз, рассчитаем, что на глубине D теплогенерация равна 0,49 мкВт/м³, т.е. глубина D примерно совпадает с кровлей ордовикских отложений, которая в центральной части ВЕП (Московская синеклиза, Абдулино–Серноводская впадина) находится на глубине 4,0–4,5 км.

Таким образом, толщина слоя активной теплогенерации (D), практически, совпадает в структурах Канадского щита, где она оценена по измерениям теплоге-

нерации в метаморфических породах амфиболитовой и гранулитовой фаций, и на ВЕП – по оценкам в карбонатных породах осадочного чехла. Это лишний раз доказывает высказанное довольно давно мнение [Jaupart et al., 1981; Jaupart, Mareschal, 2003], что параметр D устойчив для провинции теплового потока даже в случае дифференцированной эрозии. Объекты, расположенные на выступе фундамента и на поверхности осадочного чехла в пределах одной провинции теплового потока, будут различаться лишь величиной поверхностной теплогенерации.

Для расчета радиогенной компоненты теплового потока нами были проанализированы содержания долгоживущих изотопов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , которые дают основной вклад в радиогенную теплогенерацию в земной коре (табл. 3). Анализ порошковых проб был выполнен рентгеноспектральным флуоресцентным методом на рентгеновском вакуумном спектрометре в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН¹. Пробы пород были отобраны из керна скважины № 7101, расположенной в 135 км юго-восточнее г. Воронеж (см. рис. 2). Скважина вскрыла толщу роговообманковых габбро и габброноритов Хоперского комплекса среднего протерозоя, поэтому априорно не ожидалось высокие значения радиогенной теплогенерации.

Таблица 3 / Table 3

Определение концентрации радионуклидов и теплогенерации керна из скв. № 7101 / Radionuclide concentration determination and rocks heat production from VPH-1 hole

№ п/п	Глубина (м) / Depth, m	^{238}U / (г/т)	^{232}Th (г/т) / ^{232}Th (g/t)	^{40}K (%)	$A_{\text{рад.}}$ (мкВт/м³) / $A_{\text{рад.}}$ (μW/m³)
1	226,40	0,49	1,60	1,20	0,39
2	412,20	1,38	4,30	1,20	0,62
3	445,40	1,35	4,90	1,20	0,66
4	520,80	3,64	8,90	2,40	1,33
5	541,20	1,34	4,80	1,40	0,69
6	556,30	1,73	5,50	1,70	0,83
7	574,50	0,71	1,90	1,20	0,43
8	599,50	0,61	1,40	1,20	0,39
9	618,50	0,33	1,60	1,20	0,38
10	650,60	1,61	2,90	1,40	0,60
11	660,90	0,72	5,30	0,70	0,52
12	689,80	3,81	8,30	3,00	1,44
13	867,40	0,64	1,00	1,20	0,37
14	871,60	0,73	2,90	1,50	0,55
15	874,00	0,62	2,30	1,20	0,45
16	877,80	0,93	2,00	1,30	0,47
17	887,00	0,44	2,10	1,40	0,46
18	894,60	0,38	3,80	2,20	0,73
19	912,60	0,92	2,70	1,20	0,49
20	947,40	0,94	5,10	0,60	0,50
21	997,00	2,74	6,40	3,10	1,27
22	999,60	1,07	2,70	1,20	0,50
23	1015,30	0,47	2,60	1,30	0,47
24	1020,00	1,30	5,10	1,10	0,64
25	1064,20	1,36	4,30	1,80	0,75
26	1078,50	0,32	1,00	1,20	0,35
27	1095,00	0,52	1,00	1,30	0,38
28	1106,60	0,25	1,60	1,20	0,38
29	1128,30	1,34	3,30	1,50	0,63
30	1193,00	0,79	10,20	1,20	0,92

¹ Аналитики: С.М. Ляпунов и Е.П. Шевченко.

Рассчитанная на относительно небольшом интервале глубин 200–1200 м теплогенерация не позволяет судить о типе зависимости теплогенерации от глубины. Можно в первом приближении считать, что в этом диапазоне глубин существует средняя теплогенерация $0,62 \text{ мкВт/м}^3$ (рис. 5).

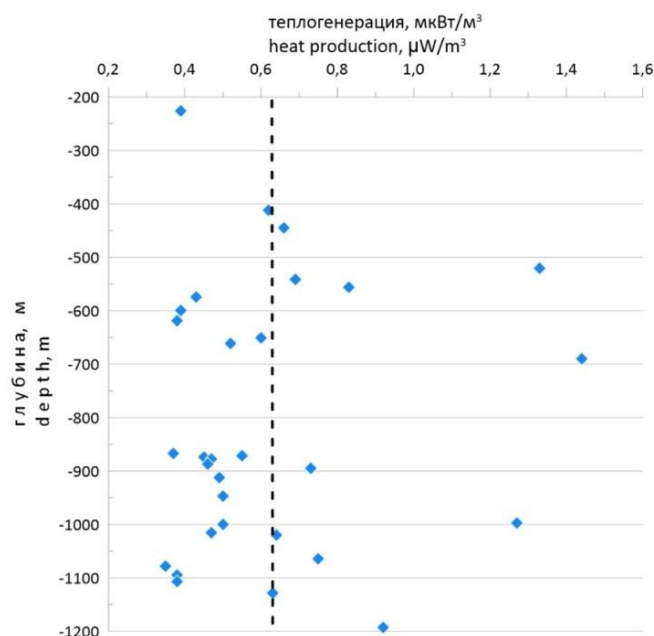


Рис. 5. Распределение теплогенерации по глубине скважины № 7101

Пунктирная линия – среднее значение A_{rad} .

Fig. 5. The heat production distribution along the depth of N7101 hole

The dotted line is the average value of A_{rad} .

Расчеты показали, что на ВКМ радиогенное тепло, продуцируемое в чехле, в наблюдаемом ТП обеспечивает только $3,7\text{--}5,0 \text{ мВт/м}^2$. В фундаменте массива генерируется $20\text{--}22 \text{ мВт/м}^2$. Таким образом, полный радиогенный тепловой поток здесь составляет $24\text{--}27 \text{ мВт/м}^2$, или 50% от значения фонового среднего ТП, который для ВКМ оценивается величиной 49 мВт/м^2 .

Г. 2D-температурное моделирование по профилю А-Б

Для решения задачи о распределении температур в разрезе используется численный метод конечных элементов с квадратичной аппроксимацией функции температуры между узлами прямоугольной сетки. В программе предусматривается сетка 41×41 узел (т.е. решается двухмерная задача), линейные размеры узла по осям X и Z возможно изменять по требованию оператора². Внутри области моделирования задается конфигурация контрастных сред и их теплофизические свойства: температуропроводность $\alpha (\text{м}^2/\text{с})$, теплопроводность $k (\text{Вт}/(\text{м} \times \text{К}))$ и нормированная плотность тепловых источников $Q/(c \times r) (\text{К}/\text{с})$. В расчетной части комплекса задаются линейные размеры области моделирования (L_x и L_z , в км), которые определяют линейные размеры узла ($L_x/41$ и $L_z/41$), а также временной интервал дискретизации решения (в млн лет). Временной шаг итерационного процесса автоматиче-

² Температурное поле вдоль профиля рассчитывалось с помощью программы для нестационарного моделирования теплового поля «TERMGRAF» [Хуторской, 1996].

ски выбирается программой и рассчитывается как $t=10^{-7} \times (Z^2/4a)$, где Z – толщина области моделирования.

В результате решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов:

$$(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + A(x, z) = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где k , c , ρ – соответственно, теплопроводность, теплоемкость и плотность слоев литосферы, $A(x, z)$ – плотность источников тепла в слое, t – время, мы получаем распределение температур и тепловых потоков $q(z)$ и $q(x)$ для принятой теплофизической среды в конечный момент временного этапа дискретизации. Полученный файл результатов переименовывается в файл начальных температур, и на следующем этапе начинается расчет с конечного момента предыдущего этапа. Таким образом, решение не прерывается, а просто делается «фотография» состояния системы расчетов в конечный момент временного шага. Возможность дискретизации решения удобна, если необходимо изменить теплофизическую среду в связи со структурно-вещественными перестройками геологического разреза, задать распределение новых источников и стоков тепла, а также просмотреть результаты расчета палеотемпературного поля. Если в модели требуется задать тепломассоперенос, то его можно имитировать установкой граничных температур и/или адиабатического градиента в интервале глубин, на которые распространяется конвекция.

Для каждого профиля при моделировании задается значение краевой температуры на верхней границе (как правило, на подошве гелиотермозоны) в соответствии с метеорологическими данными, и редуцированный тепловой поток – на нижней границе ($q_{ред.}$), соответствующий его измерениям в ближайших скважинах ($q_{набл.}$) за вычетом теплового потока, генерируемого в вышележащем слое земной коры при спонтанном распаде долгоживущих радиоизотопов (q_p), т.е. $q_{ред.} = q_{набл.} - q_p$.

Радиогенный тепловой поток (q_p) рассчитывается на основании сейсмической информации о мощности слоя (z_i) и его составе, а также на основе расчета этой величины из аналитически определенных концентраций содержания долгоживущих радионуклидов: ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . $(q_p)_i = A(x, z) \cdot z_i$ [Roy et al., 1968].

Точность расчетов оценивается в данном случае, по совпадению модельного и измеренного в скважинах теплового потока. Метод наименьших квадратов, примененный для оценки погрешности определения глубины нахождения изотерм, показал, что она составляет 0,5–0,6%, т.е. при средней глубине расчета температур 3 км относительная погрешность составит ± 15 –20 м.

При расчете теплового потока по профилю А-Б были заданы следующие граничные условия: на верхней границе поддерживалась температура 6 °С – это среднегодовая температура на подошве гелиотермозоны в районе Воронежа; на нижней границе (глубина 3 км) задавался редуцированный тепловой поток (20 мВт/м²), который был нами определен в этом исследовании. Незначительный контраст теплопроводности структурных комплексов данного разреза обусловил слабые вариации теплового потока (рис. 6). Вдоль профиля на расстоянии 280 км его значения укладываются в диапазон 47–52 мВт/м².

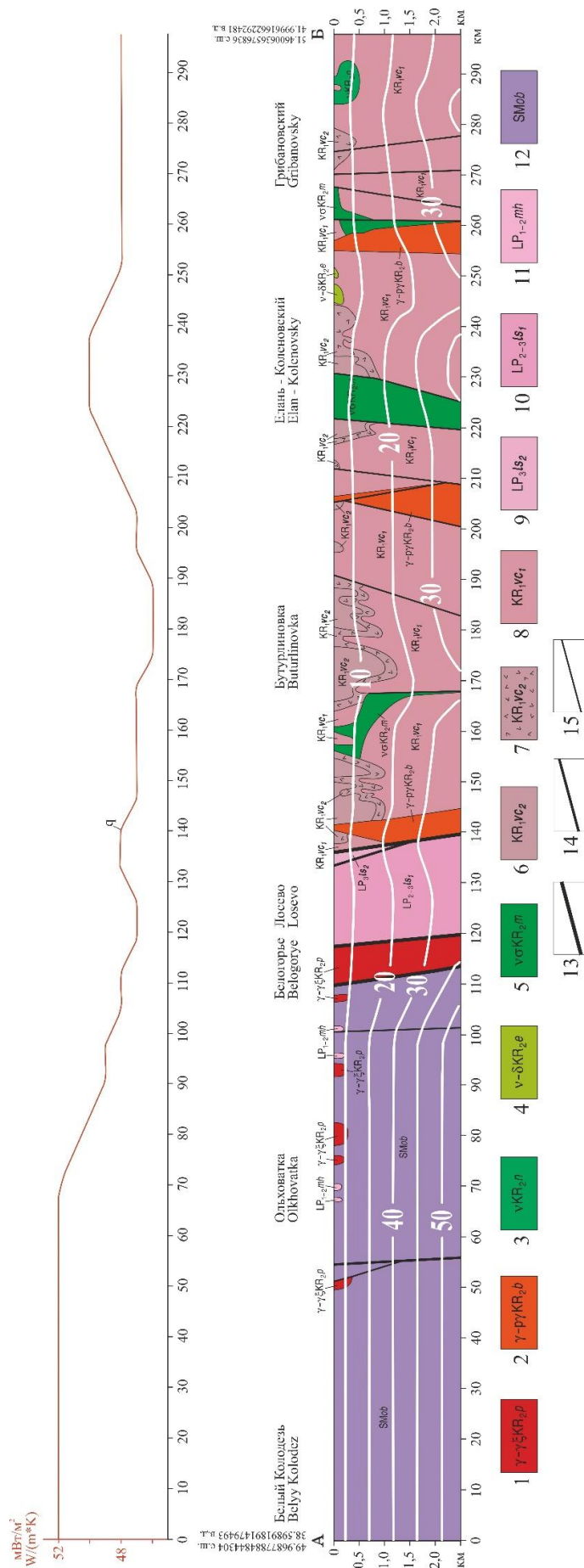


Рис. 6. 2D-температурная модель (изотермы, $^{\circ}\text{C}$) (внизу) и профиль теплового потока (q , mW/m^2) (вверху) по линии А-В (условные обозначения – см. рис. 1) / Fig. 6. 2D-temperature pattern and heat flow profile (q , mW/m^2) along A-B line

Заключение

Мы рассмотрели особенности распределения теплового потока и глубинных температур в пределах Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Результаты этого анализа позволяют сделать главный вывод о том, что сходная история геологического развития и времени становления архей-протерозойского фундамента разных частей ВКМ объясняют стабильность геотермического режима и однородность значений теплового потока. Средняя величина ТП составляет 49 ± 4 мВт/м².

Но существует в каждом сегменте более дробная дифференциация теплового потока – вариации «второго порядка», обусловленные структурно-теплофизическими неоднородностями. Они связаны с проявлениями трещиноватости, микро- и макровключениями в породы фундамента и хорошо заметны при оптическом сканировании теплопроводности практически каждого образца керна.

Комплексный анализ всех компонентов, определяющих геотермическое поле, позволяет наиболее корректно определить фоновый тепловой поток в регионе и оценить возможности использования глубинного тепла в качестве альтернативного источника энергии.

Литература

1. Боганик Н.С. Радиогенное тепло земной коры Русской платформы и ее складчатого обрамления. М.: Наука, 1975. – 159 с.
2. Геотермические исследования. / Отв. редактор Е.А. Любимова. М.: Наука, 1964. – 175 с.
3. Глубинный тепловой поток Европейской части СССР. / Отв. редакторы С.И. Субботин, Р.И. Кутас. Киев: Наукова думка, 1974. – 190 с.
4. Кременецкий А.А., Скрябин В.Ю., Терентьев Р.А. и др. Воронежская параметрическая скважина – новый этап познания глубинного строения ВКМ. // Разведка и охрана недр. – 2006. – №9-10. – С. 109–117.
5. Кутас Р.И. Поле тепловых потоков и термическая модель земной коры. Киев: Наукова думка, 1978. – 148 с.
6. Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Никитин А.С. Бесконтактные измерения теплофизических свойств горных пород на установке ТС14. // Процессы в геосредах. – 2016. – Т. 7. № 3. – С. 246–254.
7. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов. // Геотектоника. – 1968. – № 4. – С. 3–19.
8. Сальников В.Е. Геотермический режим Южного Урала. М.: Наука, 1984. – 89 с.
9. Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З. Тепловой режим и радиоактивность Земли. Л.: Недра, 1979. – 191 с.
10. Тепловой режим недр СССР. / Под редакцией Ф.А. Макаренко, Б.Г. Поляка. М.: Наука, 1970. – 224 с.
11. Хуторской М.Д., Гнатусь Н.А., Демежко Д.Ю. и др. Геотермия: XX-XXI век. // Труды геологического института. – 2023. – Т. 636. – С. 7–435.
12. Jaupart C., Sclater J.G., Simmons G. Heat flow studies: constraints on the distribution of uranium, thorium and potassium in the continental crust. // Earth and Planetary Science Letters. – 1981. – Vol. 52. – pp. 328–344.
13. Jaupart C., Mareschal J.-C. Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data. // Treatise on Geochemistry. – 2003. – Vol. 3. – pp. 65–84.
14. McLennan S.M., Taylor S.R. Heat flow and the chemical composition of continental crust. // Journal of Geology. – 1996. – Vol. 104. No. 4. – pp. 369–377.

15. Perry H., Jaupart C., Mareshal J.C., Bienfait G. Crustal heat production in the Superior Province, Canadian Shild, and in North America inferred from heat flow data. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2006. – Vol. 111. Issue B4. – pp. 893–903.
16. Pinet C., Jaupart C., Mareshal J.C. et al. Heat flow and structure of the lithosphere in the Eastern Canadian shild. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 1991. – Vol. 96. – pp. 19941–19963.
17. Roy R.F., Blackwell D.D., Birch F. Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1968. – Vol. 5. – pp. 1–12.
18. Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. // *Reviews of Geophysics*. – 1995. – V. 33. No. 3. – pp. 267–309.
19. Rudnick R.L., McDonough W.F., O'Connell R.J. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. // *Chemical Geology*. – 1998. – Vol. 145. – pp. 395–411.

References

1. Boganik N.S. Radiogenic heat of the Russian Platform Earth's crust and its folded frame. Moscow. Nauka. 1975. 159 p. (In Russ.)
2. Geothermal studies. Ed. E.A. Lyubimova. Moscow. Nauka. 1964. 175 p. (In Russ.)
3. Terrestrial heat flow of the European part of the USSR. Eds. S.I. Subbotin, R.I. Kutas. Kiev. Naukova Dumka. 1974. 190 p. (In Russ.)
4. Kremenetsky A.A., Skryabin V.Yu., Terentyev R.A. et al. Voronezh parametric well – a new stage of knowledge of the VCM deep structure. Exploration and protection of subsoil. 2006. Nos. 9-10. pp. 109–117. (In Russ.)
5. Kutas R.I. Heat flow field and thermal model of the Earth's crust. Kiev. Naukova Dumka. 1978. 148 p. (In Russ.)
6. Nikitin D.S., Khutorskoy M.D., Nikitin A.S. Non-contact thermal-physical properties measurements of rocks on TC14 device. Processes in geospheres. 2016. Vol. 7. No. 3. pp. 246–254. (In Russ.)
7. Polyak B.G., Smirnov Y.B. Relationship of the deep heat flow with the continents tectonic structure. *Geotectonics*. 1968. No. 4. pp. 3–19. (In Russ.)
8. Salnikov V.E. Geothermal regime of the Southern Urals. Moscow. Nauka. 1984. 89 p. (In Russ.)
9. Smyslov A.A., Moiseenko U.I., Chadovich T.Z. Thermal regime and radioactivity of the Earth. Leningrad. Nedra. 1979. 191 p. (In Russ.)
10. Thermal regime of the subsurface of the USSR. Eds. F.A. Makarenko, B.G. Polyak. Moscow. Nauka. 1970. 224 p. (In Russ.)
11. Khutorskoy M.D., Gnatus N.A., Demezhko D.Yu. et al. Geothermics: XX-XXI century. Proceedings of the Geological Institute. 2023. Vol. 636. pp. 7–435. (In Russ.)
12. Jaupart C., Selater J.G., Simmons G. Heat flow studies: constraints on the distribution of uranium, thorium and potassium in the continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*. 1981. Vol. 52. pp. 328–344.
13. Jaupart C., Mareschal J.-C. Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data. *Treatise on Geochemistry*. 2023. Vol. 3. pp. 65–84.
14. McLennan S.M., Taylor S.R. Heat flow and the chemical composition of continental crust. *Journal of Geology*. 1996. Vol. 104. No. 4. pp. 377–396.
15. Perry H., Jaupart C., Mareshal J.C., Bienfait G. Crustal heat production in the Superior Province, Canadian Shild, and in North America inferred from heat flow data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2006. Vol. 111. Issue B4. pp. 893–903.
16. Pinet C., Jaupart C., Mareshal J.C. et al. Heat flow and structure of the lithosphere in the Eastern Canadian shild. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1991. Vol. 96. pp. 19941–19963.

17. Roy R.F., Blackwell D.D., Birch F. Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. *Earth and Planetary Science Letters*. 1968. Vol. 5. pp. 1–12.
18. Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*. 1995. V. 33. No. 3. pp. 267–309.
19. Rudnick R.L., McDonough W.F., O’Connell R.J. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. *Chemical Geology*. 1998. Vol. 145. pp. 395–411.

УДК 551.1/.4; 911.2; 911.9

DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009

Оригинальная статья

Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу

В.И. Черкашин¹, В.Б. Заалишвили², С.А. Мамаев¹, З.В. Атаев¹,
Ж.Г. Ибаев¹, В.К. Сулейманов¹

¹ Институт геологии ДФИЦ РАН, Россия, 367030,
г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: dangeogis@mail.ru;

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru

Статья поступила: 31.10.2024, доработана: 02.12.2024, одобрена в печать: 05.12.2024

Резюме: Актуальность работы. В последнее время ученые во всем мире огромное внимание уделяют сохранению окружающей среды в связи с глобальным изменением климата. В этой связи в данной статье исследуется динамика геоэкологического состояния высокогорной части бассейнов горных рек. В определенной степени с изменением климата связано и увеличение антропогенной нагрузки на склоны речных долин. Идет строительство новых и расширение существующих автомобильных дорог. Следствием этого, является повышение риска экзогенных процессов. Немаловажную роль, в этой связи, в решении проблем геоэкологического состояния играют также инженерно-геологические и инженерно-геофизические исследования. В данной статье комплексно исследуются геологическое, гидрологическое, геоэкологическое состояние водосбора высокогорной части бассейна р. Аварское Койсу в условиях глобальных климатических изменений. Для этих целей по результатам исследований построены некоторые инженерно-геологические и геофизические разрезы специфических оползнеопасных участков вдоль автодороги по реке Аварское Койсу. **Цель исследований.** Анализ геоэкологического состояния верховьев высокогорной части бассейна реки Аварское Койсу в условиях глобального изменения климата и нарастающей антропогенной нагрузки. **Методы исследования.** Проведены маршрутные инженерно-геологическое и ландшафтное обследования высокогорной части бассейна р. Аварское Койсу. Вдоль расширяемых автомобильных дорог, на особо опасных оползневых участках, проведены инженерно-геологические и инженерно-геофизические изыскания с бурением более 40 скважин. Проведена малоглубинная сейсморазведка, методом преломленных волн (МПВ) в виде отдельных сейсмозондирований по сетке профилей, каждый из которых отработан 3-4 расстановками (по 94 м) сейсмоприемников. **Результаты исследования.** В процессе исследований получены результаты по состоянию ландшафтов высокогорной части бассейна р. Аварское Койсу, составлены инженерно-геологические и инженерно-геофизические разрезы, позволяющие дать оценку условиям, связанным с процессами глобального изменения климата и нарастающей антропогенной нагрузки в этом районе.

Ключевые слова: климатические изменения, инженерная геология, геоэкология, горные реки, бассейны рек, инженерно-геофизические разрезы, сейсмичность.

Благодарности: Работа представлена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки», (соглашение № 075-15-2024-644).

Для цитирования: Черкашин В.И., Заалишвили В.Б., Мамаев С.А., Атаев З.В., Ибаев Ж.Г., Сулейманов В.К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 100-112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009

DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009

Original paper

Geoecological state of the upper reaches of the Avarskoye Koisu river basin

V.I. Cherkashin¹, V.B. Zaalishvili², S.A. Mamaev¹, Z.V. Ataev¹,
Zh.G. Ibaev¹, V.K. Suleimanov²

¹ Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
75 M. Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, Russian Federation,
e-mail: dangeogis@mail.ru;

² Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: vzaal@mail.ru

Received: 31.10.2024, revised: 02.12.2024, accepted: 05.12.2024

Abstract: Relevance. Recently, scientists around the world have been paying great attention to the preservation of the environment in connection with global climate change. In this regard, this article examines the dynamics of the geoecological state of the highland part of mountain river basins. To a certain extent, climate change is also associated with an increase in anthropogenic load on the slopes of river valleys. New roads are being built and existing ones are being expanded. As a consequence, the risk of exogenous processes increases. In this regard, engineering-geological and engineering-geophysical studies also play an important role in solving the problems of the geoecological state. This paper comprehensively studies the geological, hydrological, geoecological state of the catchment area of the high-mountain part of the Avarskoye Koisu River basin in the context of global climate change. For these purposes, based on the research results, some engineering-geological and geophysical sections of specific landslide-prone areas along the Avarskoye Koisu River road were constructed. **Aim.** Analysis of the geoecological state of the upper reaches of the high-mountain part of the Avarskoye Koisu River basin in the context of global climate change and increasing anthropogenic load. **Methods.** A route engineering-geological and landscape survey of the high-mountain part of the Avarskoye Koisu River basin was conducted. Engineering-geological and engineering-geophysical surveys with the drilling of more than 40 wells were carried out along the widened roads, in especially dangerous landslide areas. Shallow seismic exploration was carried out using the refraction wave method (RWM) in the form of individual seismic soundings along a grid of profiles, each of which was processed by 3–4 arrangements (94 m) of seismic receivers. **Results.** In the course of the study, results were obtained on the state of the landscapes of the high-mountain part of the Avarskoye Koisu River basin, engineering-geological and engineering-geophysical sections were compiled, allowing us to assess the conditions associated with the processes of global climate change and the increasing anthropogenic load in this area.

Keywords: climate change, engineering geology, geoecology, mountain rivers, river basins, engineering-geophysical sections, seismicity.

Acknowledgments: The work was presented within the framework of a large scientific project “Dynamics of the geoecological state of the mountain river basins of the North-Eastern Caucasus, Azerbaijan and Iran under conditions of climate change and growing anthropogenic load” (agreement No. 075-15-2024-644).

For citation: Cherkashin V.I., Zaalishvili V.B., Mamaev S.A., Ataev Z.V., Ibaev Zh.G., Suleimanov V.K. Geoecological state of the upper reaches of the Avarskoye Koisu river basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 100–112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009

Введение

Исследование динамики геоэкологического состояния бассейнов горных рек водосбора Каспийского моря в условиях глобального изменения климата и усиления антропогенной нагрузки, особенно в сейсмически опасных регионах, представляет собой задачу с высокой актуальностью.

Во-первых, изменение климата – это одна из главных глобальных проблем современности. Горные реки являются чувствительными экосистемами, которые реагируют на изменения климата с особой остротой. Исследование динамики геоэкологического состояния бассейнов горных рек в этом контексте позволяет получить более точное представление о последствиях климатических изменений и их влиянии на ландшафты и водные ресурсы региона.

Во-вторых, антропогенная нагрузка на бассейны горных рек также играет важную роль в изменении их экологического состояния. Рост населения, урбанизация, промышленная деятельность и сельское хозяйство в этих регионах могут оказывать негативное воздействие на водные ресурсы, качество воды и биологическое разнообразие.

Для эффективного решения проблемы постоянно нарастающего антропогенного воздействия и изменения климата необходимо комплексное изучение и анализ геологических, гидрологических, географических и геоэкологических особенностей каждого конкретного бассейна, основанное на полевых исследованиях. В этой связи была организована полевая экспедиция в район верховьев бассейна р. Аварского Койсу. Согласно схеме физико-географического районирования Дагестана, исследованная территория относится к трём природным районам провинции Высокогорного Дагестана – Бокового хребта, Межгорных котловин и Главного Кавказского хребта [Атаев, 1999]. Преобладают здесь горно-лесные, горно-луговые и субнивальные ландшафты.

Основная часть

В геоморфологическом отношении исследованная площадь проходит долиной реки Аварское Койсу по вырубленной полке у подножия её левого крутого (30-40°, на отдельных участках свыше 50°) каменистого склона, местами заросшего смешанным лесом средней густоты. Рельеф на данной территории можно охарактеризовать как чрезвычайно сложный эрозионно-тектонический, сильно расчленённый гидрографической сетью. Горные цепи, расположенные между долинами рек, отличаются скалистым характером и развитием поперечных участков глубоких долин. На рисунке 1 представлена исследованная площадь верховья бассейна р. Аварского Койсу. В целом рельеф представляет собой горную систему, состоящую из параллельных хребтов и разделяющих их межгорных депрессий.

Район входит в состав альпийской орогенной области Большого Кавказа.

Основной особенностью гидрологического режима горных рек Дагестана является зависимость от высоты местности, направления горных хребтов и экспозиций склонов по отношению к господствующим воздушным течениям. В пределах территории Горного Дагестана выделено три гидрологические области: I – высокогорная (высокогорный Дагестан); II – внутригорная (внутригорный Дагестан); III – внешнегорная (внешнегорный Дагестан).

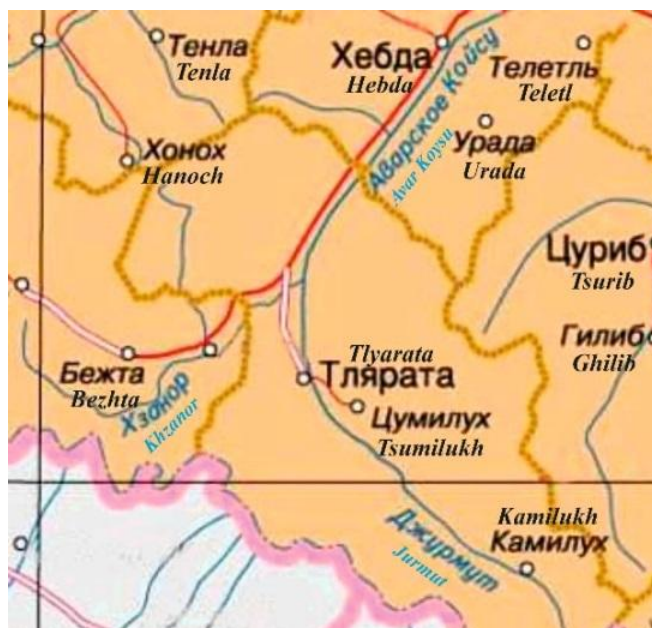


Рис. 1. Бассейн притоков верховья реки Аварское Койсу /

Fig. 1. Basin of the tributaries of the upper reaches of the Avarskoye Koisu River

Исследованная площадь входит в пределы второй (II) гидрологической области Дагестана. Внутригорная (II) гидрологическая область включает реки с северных склонов Главного Кавказского хребта и северо-восточных склонов Бокового хребта. Область занимает территорию с высотными отметками от 200 до 4480 м. Большой перепад высот объясняется наличием здесь относительно низко расположенных межгорных впадин и плато.

Река Аварское Койсу характеризуется весенне-летним половодьем и низкой зимней меженью. Распределение стока внутри года происходит не равномерно. Наиболее многоводной река бывает в период с мая по август, в течение которого проходит до 65 % годового объёма стока. Основными притоками реки являются: Джурмут, Хзанор, Сараор, Мазадинка, Темирор, Тобот и др. Распределение речной сети, ледников и озёр определяется особенностями климата, рельефа и геологического строения отдельных частей территории. Горный район является областью аккумуляции влаги. Здесь располагаются истоки многочисленных рек, образующих мощные речные системы. Густота речной сети возрастает по мере увеличения высоты.

На исследованной территории выделяются следующие водоносные комплексы: четвертичный и юрский. Воды четвертичных отложений представлены аллювиальными, делювиальными и флювиогляциальными водоносными горизонтами.

Водоносный горизонт аллювиальных отложений следует подразделить на две группы: воды аллювия рек, берущих своё начало в горной части и воды аллювия рек в низменной части территории. Аллювиальные отложения отличаются высокой водообильностью, причём воды имеют минерализацию до 1 г/л. Водовмещающими породами здесь служат валунно-галечниковые отложения. По химическому составу воды с минерализацией 0,1–0,5 г/л относятся к гидрокарбонатно-кальциевым, а с минерализацией от 0,5 до 0,8 г/л – к гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевым и сульфатно-гидрокарбонатно-кальциевым.

Водоносный горизонт делювиальных отложений вследствие большой изменчивости литологического состава делювия в вертикальном и горизонтальном направлениях не имеет выдержанного распространения. Водообильность отложений слабая, его глубина залегания 1–15 м [Гидрогеология СССР ..., 1968]. По степени минерализации и химическому составу воды чрезвычайно пестрые (0,5–30 г/л). Химический состав их изменяется от гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевого до хлоридно-сульфатно-натриевого и хлоридно-натриевого. Анализ химического состава воды р. Аварское Койсу и притока Хзанор приведен в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Анализ химического состава воды рр. Аварское Койсу и Хзанор /
Analysis of the chemical composition of river water Avar Koisu and Khzanor**

№ п/п /Item No.	Наименование химических веществ / Name of chemical substances	Ед.изм./ Unit of measurement	Норма по СанПиН 21.4.1074-01 / Standard according to SanPiN 21.4.1074-01	Содержание компонентов, мг/дм ³ / Content of components, mg/dm ³			
				р.Аварское Койсу / Avar Koisu river		р. Хзанор / r. Khzanor	
				min	max	min	max
1	Сухой остаток / Dry residue	мг/дм ³ / mg/dm ³	1000 (1500)	190	248	214	312
2	Жесткость общая / Total hardness	мг-экв/л / mg-eq/l	7,0 (10)	2,5	3	3,5	4,0
3	Водородный показатель / Hydrogen index	единица pH / pH unit	6-9	7	8,7	7,2	8,7
4	Нефтепродукты / Petroleum products	мг/дм ³ / mg/dm ³	0,1	0	0,07	0	0,05
5	Сульфаты (SO ₄) / Sulfates (SO ₄)	-«-	500,0	72	120	48	96
6	Хлориды (Cl) / Chlorides (Cl)	-«-	350,0	7	14	7	14
7	Нитриты (NO ₂) / Nitrites (NO ₂)	-«-	3	0,004	0,05	0	0,02
8	Нитраты (NO ₃) / Nitrates (NO ₃)	-«-	45	0	1,0	0,1	2,1
9	Аммоний (NH ₄) / Ammonium (NH ₄)	-«-	2	0,04	0,45	0,06	0,25
10	Железо (Fe) / Iron (Fe)	-«-	0,3 (1,0)	0,05	0,23	0,02	0,2

Материалы и методы исследований

В работе использовались следующие методы исследования: анализ и синтез, сравнительный, статистический и картографический. В основе исследования гео-экологического состояния верховьев высокогорной части бассейна реки Аварское Койсу в условиях глобального изменения климата и нарастающей антропогенной нагрузки лежит: анализ географического положения исследуемого района; учет особенностей ландшафтной структуры; оценка туристско-рекреационного потенциала; обследования экзогенных геологических процессов в районе исследований; инженерно-геологические и инженерно-геофизические изыскания, выявленных опасных участков исследуемого района.

При исследовании динамики геоэкологического состояния высокогорной части бассейнов горных рек опирались на инструменты ГИС-картографирования и геоанализа. Подобные приемы в исследованиях речных бассейнов широко применяются в разных регионах. Уточнение положения сети постоянных и временных водотоков, а также результатов дешифрирования типов землепользования осуществлялось нами с помощью сервиса Google Earth Pro.

Инженерно-геологические изыскания проведены для обоснования проекта с целью изучения геолого-литологического разреза, определения физико-механических свойств пород. В процессе бурения отбирались монолиты и образцы нарушенной и ненарушенной структуры из всех разностей грунтов. Отбор образцов произведен в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-84.

В состав инженерно-геологических работ вошли следующие виды работ:

- маршрутное обследование – 1 км;
- буровые работы – 45 скважин, общим метражом 220 пог. м;
- отбор монолитов и проб – 24 образца;
- отбор проб воды из родника – 2 пробы.

Бурение скважин осуществлялось колонковым способом буровой установкой ПБУ- 2М с отбором проб.

Для инженерной сейсмики характерно использование всех трёх типов волн- продольной, поперечной и поверхностной. Распространение сейсмических волн в горных породах происходит по законам геометрической оптики, т.е. на границах раздела волны могут отражаться, преломляться и рассеиваться. По этому принципу различают волны прямые, отражённые, преломлённые, рефрагированные.

Результаты работы и их обсуждение

Водоносные комплексы юрских отложений в исследованном районе отличаются высокими напорами (15–200 м). Абсолютные отметки пьезометрических уровней достигают 700–750 м. В районах поверхностного залегания среднеюрских отложений в них встречаются пресные, реже минерализованные воды, гидрокарбонатно-натриевого, гидрокарбонатно-кальциевого и гидрокарбонатно-кальцево-натриевого состава.

Речные бассейны, как целостные системы, представляют собой объекты особого интереса в контексте исследований в области различных наук. Эти системы выступают важными источниками пресных вод, поддерживающих жизнь многих экосистем и обеспечивающих необходимые условия для деятельности человека. Однако, антропогенное воздействие и глобальное изменение климата угрожают чистым пресным водам, что актуализирует проблему доступа к ним, особенно в контексте устойчивого развития, определенного целями устойчивого развития ООН.

Дагестан делится на три климатические зоны: равнинная, предгорная, горная. Район изысканий расположен в горной части Дагестана с высотой над уровнем моря свыше 850 (1000) метров. Снежный покров невелик, но держится довольно долго. Конец весны и начало лета – самый влажный период. На высотах лето прохладное, в долинах и котловинах – теплое. Ближайшей метеостанцией является станция Тлярата с отметкой выше 1500 м.

В целом по району за год выпадает более 621 мм осадков. Основное количество выпадает с апреля по октябрь (650 мм), и годовая сумма осадков на 87,5% складывается из осадков тёплого периода.

Территория изысканий со всех сторон защищена горными хребтами, поэтому частых ураганных ветров здесь не наблюдается, максимальная скорость ветра по метеостанции составляет 23 м/с. Направление сильных ветров, как правило, совпадает с направлением речных долин и межгорных котловин. В последние годы наблюдаются изменения в ветровом режиме, связанные с глобальными климатическими изменениями, выраженные в частых и резких изменениях в ветровом режиме.

В районе проведения исследований образование туманов в последние годы наблюдается в течение всего года, с некоторым перевесом в сторону холодного периода.

Как отмечено выше, район исследований характеризуется сложным рельефом, где горные цепи, расположенные между долинами рек, отличаются скалистым характером. Экзогенные геологические процессы встречаются повсеместно. К примеру, по обследованной автодороге «Хебда-Бежта» до с. Тлярата проходит зона развития опасных геологических процессов на склонах крутизной от 25° и более. Наблюдается транзит грунтовых и поверхностных вод в скоплении крупнообломочного материала, что способствует активизации опасных селевых и оползневых процессов в период снеготаяния и обильного выпадения осадков. Встречаются участки осыпей и камнепадов по лавиноопасным и селеопасным лоткам. Область питания осыпей, как правило, представлена отвесными обнажениями скальных пород с выветрелой и трещиноватой поверхностью, местами частично покрытой мелкой растительностью [Мамаев и др., 2018]. В результате обследования определены участки, на которых активны опасные геологические процессы.

На рисунке 2 представлен типичный склон на исследованной территории с развитием опасного геологического процесса в виде оползня. Протяжённость оползня около 200 метров относительно существующей автодороги.



Рис. 2. Типичный оползневой склон /
Fig. 2. Typical landslide slope



Рис. 3. Бурение скважин /
Fig. 3. Drilling wells

Активизация опасных геологических процессов на исследованной территории возможна при проведении строительных работ на участках, приуроченных к выветрелой, разуплотненной зоне аргиллитов. Следует иметь в виду, что активизация оползневых процессов возможна при подрезке склонов [Идрисов и др., 2013; Кондратьева и др., 2015; Кононова, 2012]. Нередко, данные деформации склона под действием эрозионных процессов превращаются в борозды, рвы, промоины.

Значимость эрозионных процессов связана с формированием в русловых понижениях временных водотоков рыхлообломочных продуктов выветривания горных пород, которые могут составить твердую фазу селевого потока. Эрозионная деятель-

ность выражена и в основном приурочена к долинам мелких водотоков, где за счет размыва коренных пород идет донная и бортовая эрозия. В ходе исследований было пробурено 45 скважин (рис. 3), отобрано 24 образца проб, проведены лабораторные исследования по определению физико-механических свойств образцов. На основании проведенного комплекса инженерно-геологических работ геолого-литологический разрез в основании сверху вниз представлен разными глубинными техногенными, щебенистыми, аллювиально-пролювиальными отложениями, аргиллитами и др. породами. На рис. 4. показан типичный литолого-сейсмологический разрез между 40 и 45 скважинами исследованной площади. Как видно по рисунку 4 в геологическом плане можно выделить одну разность пород – темно-серые и черные плитчатые и сланцеватые аргиллиты (рис. 5) с прослойками песчаников нижней юры (J_{1t+2}).

На рис. 5 показаны типичные примеры залегания выделенных пород. Как видно по рисунку 5 элементы залегания в массиве могут меняться в широком диапазоне. Аллювиально-пролювиальные отложения распространены в долинах временных водотоков и в днищах крупных левых притоков реки Аварское Койсу, формируя в устьевых частях конусы выноса, которые, соединяясь, образуют обширные шлейфообразные покровы. Мощность этих отложений достигает 15–18 и более метров. Состав этих отложений до 70% составляют валуны и галечники, заполненные щебнем, глиной и суглинком.

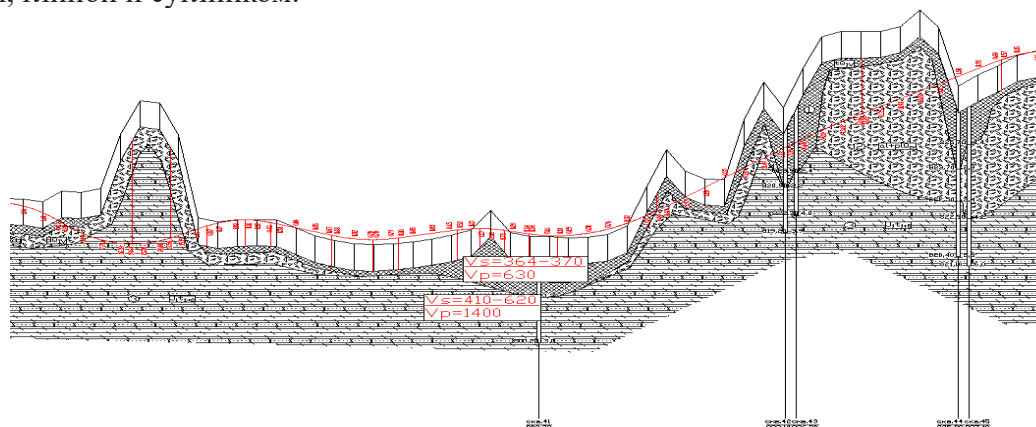


Рис. 4. Инженерно-геологический разрез по профилю скв. № 40- № 45
вдоль автомобильной дороги /

Fig. 4. Engineering-geological section along the profile of wells No. 40-No. 45 along the highway



Рис. 5. Обнажение аргиллитов тоарского яруса (J_{1t+2}) /

Fig. 5. Outcrop of Toarcian mudstones (J_{1t+2})

Отложения тоарского яруса нижней юры представлены темно-серыми аргиллитами с песчаниками средней прочности. Проведенные исследования показали, что аргиллиты вне пределов зон выветривания обладают достаточно высокими значениями прочностных и деформационных свойств. В то же время следует отметить, что водонасыщение этих грунтов идет очень медленно в основном по трещинам и таким образом, можно заключить, что процесс разрушения аргиллитов носит сложный характер и происходит как по трещинам напластования, так и многочисленным трещинам иной направленности.

В геологическом строении района исследований принимают участие отложения юрского, мелового и четвертичного возрастов [Короновский, 1994; Зоненшайн и др., 1990; McClusky et al., 2000; Gordon, Jurdi, 1986; Hempton, 1987; Babeshko et al., 2021; Blinova, 2019; Mammadli, 2022; Гаврилов, 2017; Геолого-геофизические ..., 2017]. *Юрская система* представлена в верхней части преимущественно песчано-алевролитовыми породами с доминированием песчаников, в нижней части – черными рассланцованными, плотными аргиллитами иногда с тонкими прослоями мелкозернистых песчаников. *Меловая система* четко подразделяется на два литологически различных комплекса: терригенно-карбонатный и карбонатный (известняково-мергельный) соответствующие нижнемеловому и верхнемеловому отделам. *Четвертичные* отложения развиты как по долинам рек, так и в межгорных депрессиях. Выделяются следующие генетические типы: ледниковые отложения (морены) – грубообломочные накопления; флювиогляциальные, аллювиальные и пролювиальные отложения – валунно-галечниковые образования, пески, суглинки; отложения склонов [Гидрогеология СССР ..., 1968]. По схеме тектонического районирования исследуемая территория располагается в пределах восточной части мегантиклинория Большого Кавказа, охватывающей области Известнякового и Сланцевого Дагестана, и расположена в области Сланцевого Дагестана, захватывающего небольшую восточную часть мегантиклинория Большого Кавказа, представляющего собой крупное многоступенчатое складчатое сооружение, приуроченное к Бежтинскому грабен-синклинию в ядре мегантиклинория Большого Кавказа.

Сложена породами юрской и четвертичной систем. В близлежащих районах встречены отложения мелового и палеогенового возраста. Более древние и более молодые отложения отсутствуют, поэтому его достоверная геологическая история может быть прослежена только на протяжении вышеуказанных периодов.

В юрских отложениях преобладают частые ленточные переслои аргиллитов, алевролитов с редкими прослоями и пачками песчаников. Глинистая часть пород состоит из гидрослюд с примесью каолинита и хлорита, алевритовая часть представлена мелкими плохо окатанными зернами кварца и полевых шпатов. Аргиллиты темно-серые и черные, тонкоплитчатые, при разрушении рассыпаются в мелкую дробь. Песчаники серые мелко и среднезернистые слоистые или плитчатые. Мощность свиты достигает 600 м.

Четвертичные отложения залегают с поверхности, представлены аллювиально-пролювиальными отложениями и щебенистыми грунтами, образовавшимися при разрушении аргиллитов. Аргиллиты темно-серые, трещиноватые, в кровле выветрелые, пониженной прочности, крошатся и расслаиваются.

Для определения сейсмичности территории Российской Федерации нормативными являются карты ОСР-2015 (СНиП II-7-81*, Строительство в сейсмических районах, 2007 г., СП 47.13330.2018. Свод правил строительство в сейсмических

районах /seismic building design code. 2018 г.) [Ризниченко и др., 1979; Общий каталог ..., 2007; Scholz, 2019; Masi et al., 2020; Tibaldi et al., 2020; Павленко, 2022]. Исследованный участок долины р. Аварское Койсу по указанной карте относится к 9-бальной зоне (карты А, В) и 10-бальной зоне (карта С) по шкале MSK-64.

Важно отметить, что новейшие тектонические движения в бассейне р. Аварское Койсу, особенно в его горной части, обуславливают высокую сейсмичность этой территории. При анализе сейсмичности особый интерес представляют зоны сочленения областей с разной направленностью тектонических движений, т.е. зоны расположения предполагаемых глубинных разломов [Aptikaev et al., 2021; Zaalishvili, Rogozhin, 2011].

На рисунке 6 представлена типичная площадка, на которой проводились геофизические исследования с помощью методов малоглубинной сейсморазведки.



Рис. 6. Развертывание сейсмокосы на типичной площадке /

Fig. 6. Deployment of a seismic streamer at a typical site

Для проведения исследований использовалась 24-канальная сейсморазведочная станция «Лакколит-24». Сейсмическое профилирование проводилось методом переломленных волн (МПВ). По результатам выполненных работ были определены акустические жесткости грунтов и построены геолого-геофизические профили (РСН 65-87 «Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование ..., 1987; Технический отчет Инженерно-геологических изысканий по объекту «Строительство путепровода на улице Шеболдаева с выходом на М-29 Кавказ», г. Дербент, Республика Дагестан. ООО «ИПТС»-Транспроект. Махачкала. 2022. 82 с.; Отчет о сейсмическом микрорайонировании территории перспективной застройки г. Махачкала, Госстрой РСФСР, «Ставрополь ТИСИЗ», 1988 г.).

Выводы

Таким образом, по результатам выполненного комплекса исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследованная территория входит в зону альпинотипного рельефа Внутреннего Сланцевого Дагестана, которая объединяет раннеальпийские складчатые структуры, сложенные ниже- и среднеюрскими сланцевыми толщами. Развиты системы глубокорасчлененных горных хребтов и межгорных депрессий.

2. Важную роль в формировании современного рельефа играют процессы механического выветривания горных пород и плоскостная денудация. Во время ливней

со склонов сливается значительный объем продуктов выветривания, что приводит к возникновению разрушительных грязекаменных потоков в речных долинах.

3. Территория характеризуется весьма высокой степенью эрозионного расчленения рельефа и отмечается высокая пораженность современными экзогенными процессами (ЭГП). Нижне- и среднеюрские породы, слагающие рельеф, малоустойчивы и подвергаются интенсивному воздействию эрозионно-денудационных процессов. Сильная расчлененность рельефа способствует формированию и развитию здесь селей, лавин, эрозии, обвально-осыпных, оползневых процессов. Наиболее сильно развиты обвально-осыпные процессы.

4. Наряду с названными причинами возникновения ЭГП на развитие и возникновение оползней, осыпей оказывает влияние и антропогенная деятельность, связанная с освоением территории, строительством дорог и т.д.

5. Геологическое строение, тектонические и сейсмические, а также экзогенные процессы, климатические изменения и человеческая деятельность являются факторами, влияющими на геоэкологическое состояние ландшафта на исследуемой территории.

Таким образом, комплексное изучение динамики геоэкологического состояния ландшафтов бассейнов малых и средних рек водосбора с учетом современных изменений климата и растущей антропогенной нагрузки является необходимой и актуальной задачей при освоении горных территорий.

Литература

1. Атаев З.В. Ландшафтная карта. / Атлас Республики Дагестан. М.: Роскартография, 1999. – 37 с.
2. Гаврилов Ю.О. Отражение сейсмических палеособытий в мезозойско-кайнозойских терригенных толщах Северного Кавказа. // Литология и полезные ископаемые. – 2017. – № 1. – С. 3–24.
3. Геолого-геофизические исследования глубинного строения Кавказа: геология и геофизика Кавказа: современные вызовы и методы исследований. / Под редакцией Заалишвили В.Б. – Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2017. – 619 с.
4. Гидрогеология СССР. Т. IX. Северный Кавказ. / Под редакцией Н.А. Григорьева, Н.С. Погорельского. – М.: Недра, 1968. – 488 с.
5. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. – 328 с.
6. Идрисов И.А., Мамаев С.А., Ибаев Ж.Г. Особенности распространения и развития крупных оползней Дагестана. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2013. – № 62. – С. 96–100.
7. Кондратьева Н.В., Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Гедуева М.М., Перов В.Ф., Разумов В.В., Сейнова И.Б., Хучунаева Л.В. Кадастр селевой опасности юга Европейской части России. М., Нальчик: Феория, 2015. – 148 с.
8. Кононова Н.К. Циркуляция атмосферы как фактор стихийных бедствий на Северном Кавказе в XXI веке. // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2012. – Т. 8. № 1-2. – С. 72–103.
9. Короновский Н.В. Аграхан-Тбилиско-Левантийская левосдвиговая зона – важная структура Кавказского региона. // Доклады РАН. – 1994. – Т. 337. № 1. – С. 83–89.
10. Мамаев С.А., Васьков И.М., Юсупов А.Р., Мамаев А.С. Опасные геологические процессы и перспективы их прогноза в Дагестане. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2018. – № 1 (72). – С. 69–73.

11. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана: макросейсмические и инструментальные данные о землетрясениях за период VII в. н. э. до 2005 г. / РАН, Геофизическая служба, Дагестанский филиал; [сост. О.А. Асманов и др.]; отв. ред. Р.А. Левкович. – Махачкала: Эпоха, 2007. – 393 с.

12. Павленко О.В. Записи местных землетрясений как основа для корректных оценок сейсмических воздействий (на примере трассы второго Северомуйского тоннеля). // Геология и геофизика. – 2022. – № 2. – С. 247–263.

13. Ризниченко Ю.В., Сейдузова С.С., Пронишин Р.С. и др. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. / Отв. редактор Ю.В. Ризниченко. – М.: Наука, 1979. – 192 с.

14. 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.

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

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

17. Gordon R.G., Jurdi D.M. Cenozoic global plate motions. // Journal of geophysical research. – 1986. – Vol. 91. No. B12. – pp. 389–406.

18. Hempton M.K. Constrains on Arabian plate motion and extensional history of the Red Sea. // Tectonics. – 1987. – Vol. 6. – pp. 687–705.

19. Mammadli T.Ya. Determination of seismogenic zones for analysis of seismotectonic activity of deep faults: Seismic hazard assessment for the territory of Azerbaijan. // Geotectonics. – 2022. – Vol. 56. No. 2. – pp. 191–199.

20. Masi A., Chiauuzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 18. – pp. 1899–1932.

21. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. // Journal of geophysical research. – 2000. – Vol. 243. – pp. 673–682.

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

23. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2020. – Vol. 188. – pp. 1–18.

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

References

1. Ataev Z.V. Landscape map. Atlas of the Republic of Dagestan. Moscow. Roskartografia. 1999. 37 p.

2. Gavrillov Yu.O. Reflection of seismic paleoevents in Mesozoic–Cenozoic terrigenous sequences of the Northern Caucasus. Lithology and Mineral Resources. 2017. No. 1. pp. 3–24.

3. Geological-geophysical Studies of the Deep Structure of the Caucasus: Geology and Geophysics of Caucasus: Contemporary Challenges and Research. Ed. V.B. Zaalishvili Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2017. 619 p.

4. Hydrogeology of the USSR. Vol. IX. North Caucasus. Eds. N.A. Grigoriev, N.S. Pogorelsky. Moscow. Nedra. 1968. 488 p.

5. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. Tectonics of lithospheric plates of the USSR territory. Moscow. Nedra. 1990. 328 p.

6. Idrisov I.A., Mamaev S.A., Ibaev J.G. Features of distribution and development of large landslides in Dagestan. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013. No. 62. pp. 96–100.
7. Kondratyeva N.V., Adzhiev A.H., Bekkiev M.Y., Gedueva M.M., Perov V.F., Razumov V.V., Seinova I.B., Khuchunaeva L.V. Mudflow hazard inventory of the south of the European part of Russia. Moscow. Nalchik. Feoria. 2015. 148 p.
8. Kononova N.K. Atmospheric circulation as a factor of natural disasters in the North Caucasus in the XXI century. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*. 2012. Vol. 8. No. 1-2. pp. 72–103.
9. Koronovsky N.V. Agrakhan-Tbilisi-Levantine left shift zone – the most important structure of the Caucasus Region. *Doklady RAN*. 1994. Vol. 337. No. 1. pp. 83–89.
10. Mamaev S.A., Vaskov I.M., Yusupov A.R., Mamaev A.S. Hazardous geologic processes and prospects for their prediction in Dagestan. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018. No. 1(72). pp. 69–73.
11. General catalog of earthquakes on the territory of Dagestan: macroseismic and instrumental data on earthquakes for the period VII century A.D. to 2005. RAS. Geophysical Survey. Dagestan branch. Compiled by O.A. Asmanov et al. Ed. by R.A. Levkovich. Makhachkala. Epokha. 2007. 393 p.
12. Pavlenko O.V. Records of local earthquakes as a basis for the correct estimation of strong ground motion (the area of the second Severomuisk tunnel). *Geology and Geophysics*. 2022. No. 2. pp. 247–263.
13. Riznichenko Yu.V., Seiduzova S.S., Pronishin R.S. et al. Seismic Shaking of the USSR Territory. Ed. Y.V. Riznichenko. Moscow. Nauka. 1979. 192 p.
14. 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.
15. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. *Doklady Physics*. 2021. Vol. 66. No. 8. pp. 218–222.
16. Blinova T. Generalization of the features of the geodynamically unstable zones and their connection with the deep structure low seismic activity region. In: *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*. 2019. Vol. 19. pp. 813–820.
17. Gordon R.G., Jurdi D.M. Cenozoic global plate motions. *Journal of geophysical research*. 1986. Vol. 91. No. B12. pp. 389–406.
18. Hempton M.K. Constrains on Arabian plate motion and extensional history of the Red Sea. *Textonics*. 1987. Vol. 6. pp. 687–705.
19. Mammadli T.Ya. Determination of seismogenic zones for analysis of seismotectonic activity of deep faults: Seismic hazard assessment for the territory of Azerbaijan. *Geotectonics*. 2022. Vol. 56. No. 2. pp. 191–199.
20. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020. Vol. 18. pp. 1899–1932.
21. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of geophysical research*. 2000. Vol. 243. pp. 673–682.
22. Scholz C.H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press. 2019. 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473.
23. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A. et al. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 188. pp. 1–18.
24. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2011. Vol. 5. pp. 30–40.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

Оригинальная статья

Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях

Ю.К. Чернов 

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

Статья поступила: 02.07.2024, доработана: 28.11.2024, принята к публикации: 29.11.2024

Резюме: Актуальность работы. В Российской Федерации и за рубежом накоплен значительный объем данных о спектрах Фурье колебаний грунтов при сильных землетрясениях. В отечественной практике эти данные используются, в том числе, для оценок спектров реакции колебаний грунта, необходимых для антисейсмического проектирования. Однако процедуры такого рода пересчетов относительно сложны и трудоемки. Поэтому на данный момент полезно дополнительно иметь и более простые, но обладающие приемлемой точностью способы таких расчетов. Разработке варианта решения этой задачи и посвящено настоящее исследование. **Цель исследований.** Разработка новых моделей для вероятностного описания спектров реакции ускорений колебаний грунта при землетрясениях разной величины и удаленности. **Объект исследований.** Эмпирические функции затухания с расстоянием спектров колебаний разных типов грунтов при землетрясениях. **Методы исследования.** Комплексный статистический анализ большого объема одновременно зарегистрированных спектров Фурье и спектров реакции колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. Сопоставление интегральных (кумулятивных) спектров Фурье и спектров реакции, попарно рассчитанных для различных сейсмоактивных районов. Разработанные модели спектров реакции тестировались путем их сопоставления со спектрами и пиковыми ускорениями колебаний грунта при реальных землетрясениях. **Результаты исследования.** Разработаны статистические модели связи между спектрами реакции и спектрами Фурье ускорений колебаний грунта, позволяющие с приемлемой точностью оценивать спектральные ускорения по имеющимся данным об уровнях спектральной плотности Фурье колебаний грунта. Разработанные модели в определенной степени универсальны и позволяют оценивать спектры реакции землетрясений для разных магнитуд, расстояний и частот, для разных типов грунтов, а также для простых («ситуационных») и интегральных (кумулятивных) оценок. Использование разработанных моделей позволило получить новые альтернативные оценки имеющих существенное практическое значение соотношений между пиковыми ускорениями колебаний грунта и максимальными величинами спектральных ускорений.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмические воздействия, вероятные спектры реакции колебаний грунта, спектры Фурье колебаний грунта.

Для цитирования: Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 113-127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

Original paper

Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes

Yu.K. Chernov 

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

Received: 02.07.2024, revised: 28.11.2024, accepted: 29.11.2024

Abstract: Relevance. In the Russian Federation and abroad, a significant amount of data has been accumulated on the Fourier spectra of ground motions during strong earthquakes. In Russian practice, these data are used, among other things, to estimate the spectra of the ground motions response necessary for seismic-resistant design. However, the procedures for this kind of recalculation are relatively complex and time-consuming. Therefore, at the moment it is useful to additionally have simpler, but with acceptable accuracy, methods of such calculations. The present research is devoted to the designing of a solution to this problem. **Aim.** Designing of new models for the probabilistic description of the reaction spectra of accelerations of ground motions in earthquakes of different magnitude and distance. **The object of research.** Empirical attenuation functions with the distance of the motion spectra of different types of soils during earthquakes. **Methods.** Comprehensive statistical analysis of a large volume of simultaneously recorded Fourier spectra and vibration response spectra of different types of soils during earthquakes of different magnitudes and distances. Comparison of integral (cumulative) Fourier spectra and reaction spectra calculated in pairs for various seismically active regions. The designing models of the reaction spectra were tested by comparing them with the spectra and peak accelerations of ground motions in real earthquakes. **Results.** Statistical models of the relationship between the reaction spectra and the Fourier spectra of ground motion accelerations have been designed, which make it possible to estimate spectral accelerations with acceptable accuracy based on available data on the levels of the Fourier spectral density of ground motions. The designed models are to a certain extent universal and allow us to estimate the spectra of earthquake reactions for different magnitudes, distances and frequencies, for different types of soils, as well as for simple ("situational") and integral (cumulative) estimates. The use of the designed models made it possible to obtain new alternative estimates of the relations between peak accelerations of ground motions and maximum values of spectral accelerations of significant practical importance.

Keywords: earthquakes, seismic impacts, probable spectra of the reaction of ground motions, Fourier spectra of ground motions.

For citation: Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 113-127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

Введение

Спектры реакции ускорений колебаний грунта при возможных землетрясениях используются в расчетах на сейсмостойкость зданий и сооружений. Поэтому прогнозирование таких спектров традиционно является одной из основных задач инженерной сейсмологии. Важным первоисточником данных для таких прогнозов сейчас являются спектры реакции, рассчитанные по инструментальным записям

колебаний грунта во время землетрясений (см., например, базы данных по сильным движениям Strong-Motion Virtual Data Center (VDC); European Strong-Motion Database (ESD)).

Но на более ранних этапах по получаемым таким образом записям сильных движений в массовом порядке рассчитывались не спектры реакции, а спектры Фурье. В результате в ряде зарубежных сейсмологических центров созданы достаточно обширные базы спектров Фурье колебаний грунта при землетрясениях. Несколько позднее в Советском Союзе также начала создаваться система инструментальной регистрации сильных землетрясений движений, которая позволила в ряде районов Средней Азии, Северного Кавказа и Дальнего Востока получить несколько сотен инструментальных записей смещений, скоростей и ускорений колебаний грунта при ощутимых и сильных землетрясениях, по которым затем рассчитаны спектры Фурье (примеры см. в [Рустанович, 1974; Дагестанское ..., 1981; Назарбекское ..., 1984; Папское ..., 1986; Газлийские ..., 1986; Шикотанское ..., 1995; Геодинамика ..., 1997]).

Интерес к представлению сейсмических колебаний именно в виде спектров Фурье связан, в том числе, и с возможностями использования этой информации для решения фундаментальных задач сейсмологии, таких, например, как изучение физики очага землетрясения, закономерностей формирования поля сейсмических колебаний в разных геологических средах и др. [Костров, 1975; Брун, 1981; Аки, Ричардс, 1983]. Установленные экспериментальным путем зависимости спектров Фурье колебаний грунта при землетрясениях применялись также и для решения прикладных задач – оценок сейсмической опасности территорий, прогнозирования возможных сейсмических воздействий и сейсмического риска (см., например, [Штейнберг и др., 1993; Чернов, 2023]). При этом переход к необходимым для инженерных расчетов спектрам реакции осуществлялся при помощи специальных процедур. Так, в отечественной практике для построения спектров реакции ускорений грунта широко используется методика, основанная на их связи с энергетической спектральной плотностью Фурье [Ванмарке, 1981]. Опыт более чем сорокалетнего использования этого подхода на территории СССР, а затем и России в целом показывает эффективность данного метода. В то же время, его корректное применение имеет свои сложности. Так, например, получаемые данным способом оценки спектральных ускорений зависят от задаваемой в качестве исходных данных длительности колебаний и вероятностей, для которых производятся оценки. Определение и того и другого во многих случаях требует своего исследования.

Изложенное показывает, что для отечественной инженерно-сейсмологической практики было бы полезным помимо вышеуказанной и хорошо зарекомендовавшей себя, но относительно сложной методики, в качестве первого приближения иметь еще и более простой и быстрый способ расчетов, который можно называть экспресс-оценками. Одно из возможных решений данной задачи приводится в данной работе, что и определяет ее актуальность, цель, новизну, научную и практическую значимость.

Информационная база и методика исследований

В основу работы положено статистическое сопоставление спектров Фурье и спектров реакции. Затухание спектров реакции здесь и далее во всех случаях 5%. Всего в анализ включены 1198 пар спектров, рассчитанных по одним и тем же инструментальным записям ускорений колебаний грунтов разных типов при коровых

землетрясениях разных магнитуд (М) и удаленностей от очага (D), полученных в различных районах мира. Подробное описание этих данных можно найти по ссылкам и в работах разных авторов, указанных выше, а также в [Чернов, 2024]. Обобщенные же характеристики этого материала сведены в таблицу 1.

Таблица 1 / Table 1

Обобщенные характеристики используемых в исследовании данных по инструментальной регистрации землетрясений с одновременными оценками спектров Фурье и спектров реакции ускорений колебаний грунта /
Generalized characteristics of the data used in the research on instrumental registration of earthquakes with simultaneous estimates of Fourier spectra and reaction spectra of accelerations of ground motions

«Мягкие»* грунты / “Soft”* soils			«Твердые»* грунты / “Hard”* soils		
М	D (км, km)	Кол-во пар спектров / Number of pairs of spectra	М	D (км, km)	Кол-во пар спектров / Number of pairs of spectra
7 (6,5-7,3)	1,0-496	205	7 (6,5-7,3)	1,0-517	168
6 (5,5-6,4)	1,0-377	201	6 (5,5-6,4)	1,-386	200
5 (4,5-5,4)	1,0-201	192	5 (4,5-5,4)	1-208	180
4 (3,5-4,4)	1,0-45	44	-	-	-
3 (2,5-3,4)	2-18	8	-	-	-

* – терминология [Чернов, 2023]; terminology [Chernov, 2023]

К этой же группе данных относятся и включенные в общий анализ 138 (102 для «мягких» и 36 для «твердых» грунтов) пар интегральных (кумулятивных) спектров Фурье и спектров реакции, рассчитанных для землетрясений со средними периодами повторяемости $t=100, 200, 500, 1000, 2500$ и 5000 лет. Эти оценки получены в процессе вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA) различных участков территорий Узбекистана, Хабаровского края, Приморья, Сахалина, РСО-Алания, Центрального Предкавказья, Северного Алжира на суше и на дне моря, а также на глубинах (по грунту) до 3000 м.

Описание этих данных содержится в [Геодинамика ..., 1997; Глаговский и др., 2004; Чернов, 2023], а также в соответствующих Отчетах Геофизического института ВНИЦ РАН, Института сейсмологии АН Узбекистана, Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Северо-Кавказского инженерно-геологического центра, ОАО «Ставрополь ТИСИЗ», ООО «Изыскатель», EQE International Inc.

Часть второй группы исходных данных – это 1052 пар значений максимумов спектров реакции (максимальных спектральных ускорений SA_{max}) и соответствующих этим же акселерограммам пиковых ускорений грунта (PGA), равных среднегеометрическим значениям максимальных амплитуд ускорений на двух горизонтальных компонентах записи. Характеристики этого массива данных такие же как в таблице 1. Вторая часть этой группы данных – 478 пар значений интегральных значений SA_{max} и соответствующих им интегральных оценок PGA для землетрясений с $t=50, 100, 200, 500, 1000, 2500, 5000$ и 10000 лет. Эти оценки получены в процессе PSHA вышеуказанных участков территорий для различных типов грунтов в условиях поверхности суши и дна моря, а также вглубь (от морского дна) до 3000 м.

Во всех вышеуказанных случаях (кроме данных EQE International Inc) интегральные спектры реакции получены пересчетом спектров Фурье по методу Ван-

марке (см. выше). Данные EQE являются прямыми интегральными оценками спектров реакции.

Для дальнейшего анализа все исходные спектры ускорений колебаний грунта (и Фурье и реакции) параметризованы в виде набора уровней спектральной плотности Фурье ($|S|$) и спектральных ускорений (SA) для 18-ти спектральных составляющих, логарифмически равномерно распределенных в инженерном диапазоне частот $f=0,28-22$ Гц. По преобразованным таким образом массивам данных первой группы, с учетом принятия гипотезы о логарифмически нормальном распределения случайных величин $|S|(f)$ и $SA(f)$, для каждой спектральной составляющей произведены вероятностные оценки зависимости наиболее вероятных значений $\lg SA$ от $\lg |S|$. Эти зависимости затем объединены в еще один блок зависимостей, теперь уже от частоты спектральной составляющей. Все вышеуказанные зависимости строились методом подбора в виде многочленов различной степени, оптимальным образом аппроксимирующих все исходные данные $|S|(f)$ и $SA(f)$. Для достижения некоторой «универсальности» исследуемых соотношений $\lg SA(\lg |S|)$ при построении аппроксимирующих выражений учитывались только частоты спектральных составляющих. Все остальные характеристики – магнитуды и удаленности зарегистрированных землетрясений, грунтовые и иные условия в пунктах регистрации, а также вид оценок (простые или интегральные) не учитывались.

Для выяснения степени обоснованности и надежности разработанных моделей зависимостей $SA(f)$ от $|S|(f)$ произведено их тестирование путем сопоставления с независимыми оценками. Для этих целей использованы исходные данные второй группы (см. выше), а также независимые оценки ряда других авторов.

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 в графическом виде приведены типичные примеры описанных выше массивов пар значений $\lg SA$ и $\lg |S|$, сформированных для двух спектральных составляющих.

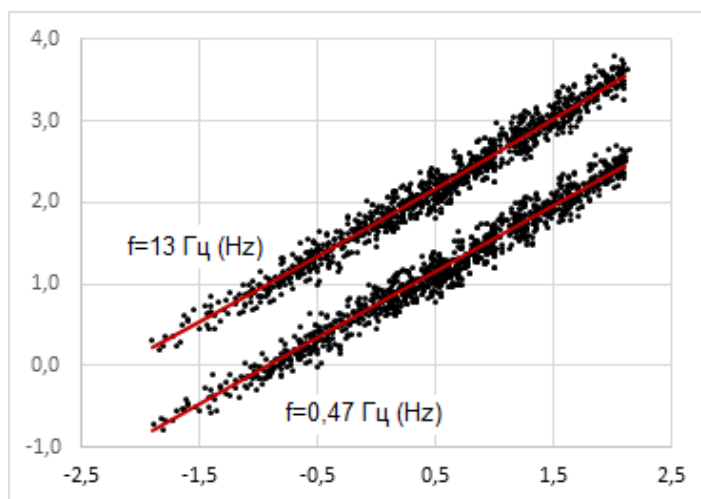


Рис. 1. Примеры сформированных для различных частот (f) массивов экспериментально зарегистрированных пар значений SA и $|S|$ (точки) и соответствующих выражениям (1) и (2) модельных оценок (сплошные линии). Оси абсцисс и ординат – значения $\lg |S|$ и $\lg SA$, соответственно. SA в см/с/с, $|S|$ в см/с /

Fig. 1. Examples of arrays of experimentally recorded pairs of SA and $|S|$ values (dots) formed for different frequencies (f) and corresponding to expressions (1) and (2) model estimates (solid lines). The abscissa and ordinate axes are the values of $\lg |S|$ and $\lg SA$, respectively. SA in cm/s/s, $|S|$ in cm/s

Рассчитанные по совокупности таких массивов аппроксимирующие выражения, описывающие зависимости наиболее вероятных уровней $\lg SA$ от $\lg|S|$ на разных частотах, можно представить в виде:

$$\lg SA = a (\lg|S|)^2 + b \lg|S| + c \quad (1)$$

где:

$$\begin{aligned} a &= 0,0720(\lg f)^5 - 0,1020(\lg f)^4 - 0,0718(\lg f)^3 + 0,0614(\lg f)^2 + 0,0469\lg f + 0,0060 \\ b &= 0,4910(\lg f)^5 - 0,6323(\lg f)^4 - 0,0120(\lg f)^3 + 0,1827(\lg f)^2 + 0,0008\lg f + 0,7992 \\ c &= 0,2599(\lg f)^3 - 0,1285(\lg f)^2 + 0,6366\lg f + 0,9868. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) $|S|(f)$ и $SA(f)$ в см/с и см/с/с, соответственно, f в Гц. Выражения (1) и (2) справедливы для $f \approx 0,28-22$ Гц и $|S| \approx 0,1-500$ см/с. При этом стандартные отклонения случайной величины $\lg SA$ принимаются одинаковыми и равными $\sigma = 0,111$ для всех фиксированных значений $\lg|S|$ и $\lg f$.

В графическом виде примеры моделей, соответствующих выражениям (1) и (2) также показаны на рисунке 1. На рисунке видно хорошее соответствие модельных оценок и экспериментальных данных. Примерно такое же хорошее соответствие модельных и экспериментальных оценок наблюдается и на других частотах спектров.

Еще одно подтверждение качества разработанной модели, описывающей связь между спектрами реакции и спектрами Фурье ускорений колебаний грунта (выражения (1) и (2)), можно видеть на рисунках 2 и 3.

О реалистичности вышеописанных модельных оценок спектров реакции можно также судить по тесту, результаты которого приведены на рисунке 4. На этом рисунке показаны разности между логарифмами уровней реальных спектральных ускорений грунта, определенных непосредственно по 70-ти произвольно выбранным акселерограммам землетрясений и их модельными аналогами, рассчитанными при помощи выражений (1) и (2) по спектрам Фурье тех же акселерограмм – $\Delta \lg SA(f) = \lg SA(f)_{\text{реал}} - \lg SA(f)_{\text{мод}}$.

На рисунке видно, что для каждой из частот осредненные разности $\Delta \lg SA(f)$ незначительно колеблются около нулевых значений во всем рассматриваемом диапазоне f . Среднее значение $\Delta \lg SA$ по всему диапазону f составляет $-0,0024$, т.е. среднестатистическая ошибка порядка 0,55%, что является хорошим показателем. Стандартные отклонения значений $\Delta \lg SA$ на разных частотах варьируют в пределах $0,123-0,198$ (среднее 0,149). Существование этого разброса связано с дисперсией самих экспресс-оценок случайной величины $\lg SA$ (см. выше). Свой вклад здесь вносят и погрешности определений реальных уровней $SA(f)$ и $|S|(f)$.

Приведенные выше сопоставления и тесты показывают, что предлагаемый способ экспресс-оценок в принципе обеспечивает приемлемую точность расчетов и поэтому может применяться для определения уровней $SA(f)$ по известным уровням $|S|(f)$. На рисунке 5 приведены примеры такого применения, когда экспресс-оценки $SA(M,D,f)$ выполнены путем пересчета вероятностных моделей $|S|(M,D,f)$ из [Чернов, 2024]. Полученные таким образом моделирующие спектры реакции колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разных M и D представляются достаточно реалистичными и не противоречащими многим другим известным зависимостям такого типа (см. [Штейнберг и др., 1993; Boore, Atkinson, 2008; Campbell, Bozorgnia, 2008; Akkar et al., 2014; Danciu et al., 2018]).

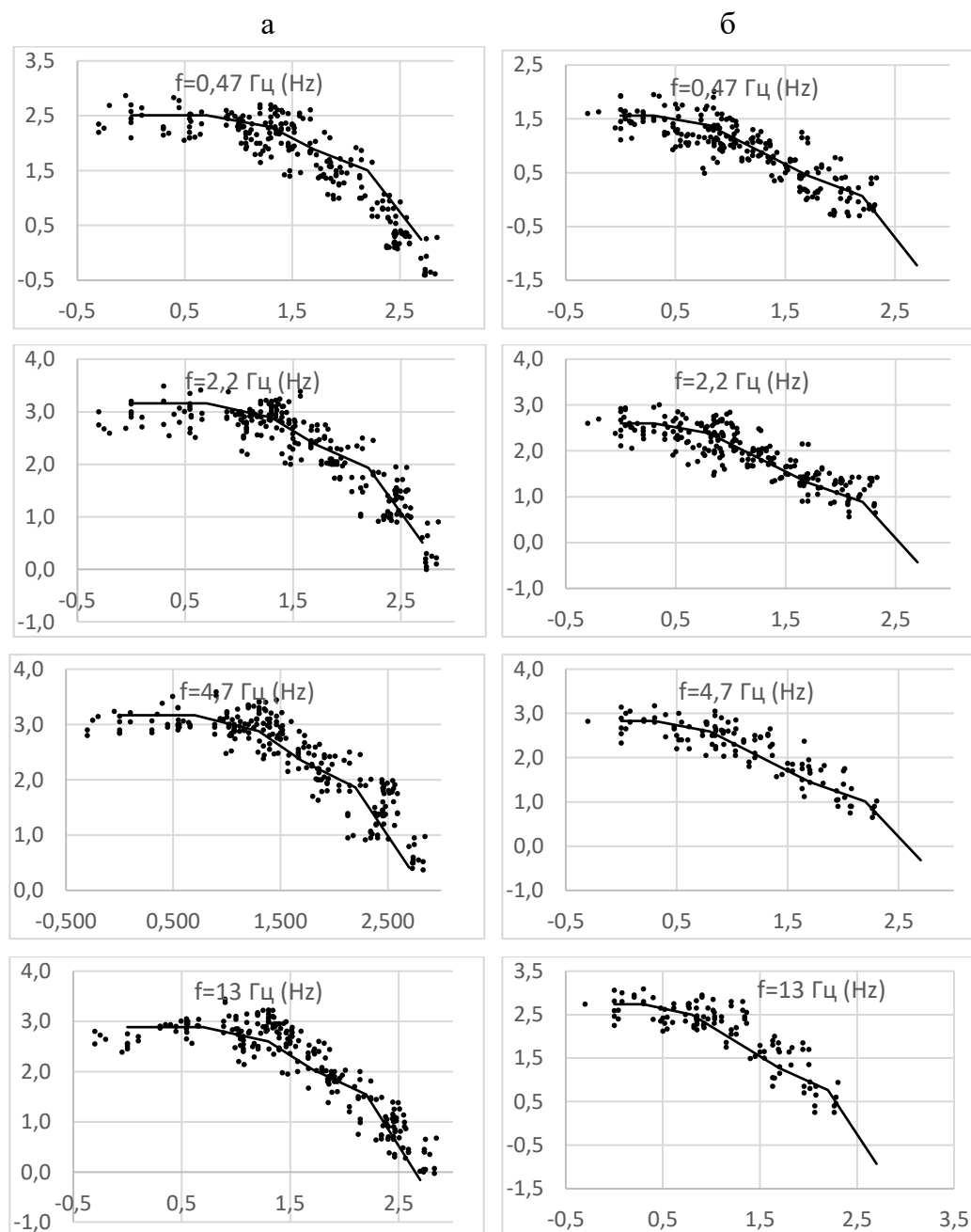


Рис. 2. Примеры сопоставления уровней спектральных ускорений «мягких» грунтов, инструментально зарегистрированных на разных частотах (f) и расстояниях до очага (D) при землетрясениях с разными M (кружки) с пересчетами по выражениям (1) и (2) функций $|S|(M,D,f)$ из [Чернов, 2024] (сплошные линии). а и б – для землетрясений с $M=7$ и $M=5$, соответственно.

Оси абсцисс – значения $\lg D$ (D в км), оси ординат – значения $\lg SA$ (SA в см/с/с) /

Fig. 2. Examples of comparing the levels of spectral accelerations of “soft” soils instrumentally recorded at different frequencies (f) and distances to the source (D) in earthquakes with different M (circles) with recalculations using expressions (1) and (2) of the $|S|(M,D,f)$ functions from [Chernov, 2024] (solid lines). a and b are for earthquakes with $M=7$ and $M=5$, respectively. The abscissa axes are $\lg D$ values (D in km), the ordinate axes are $\lg SA$ values (SA in cm/s/s)

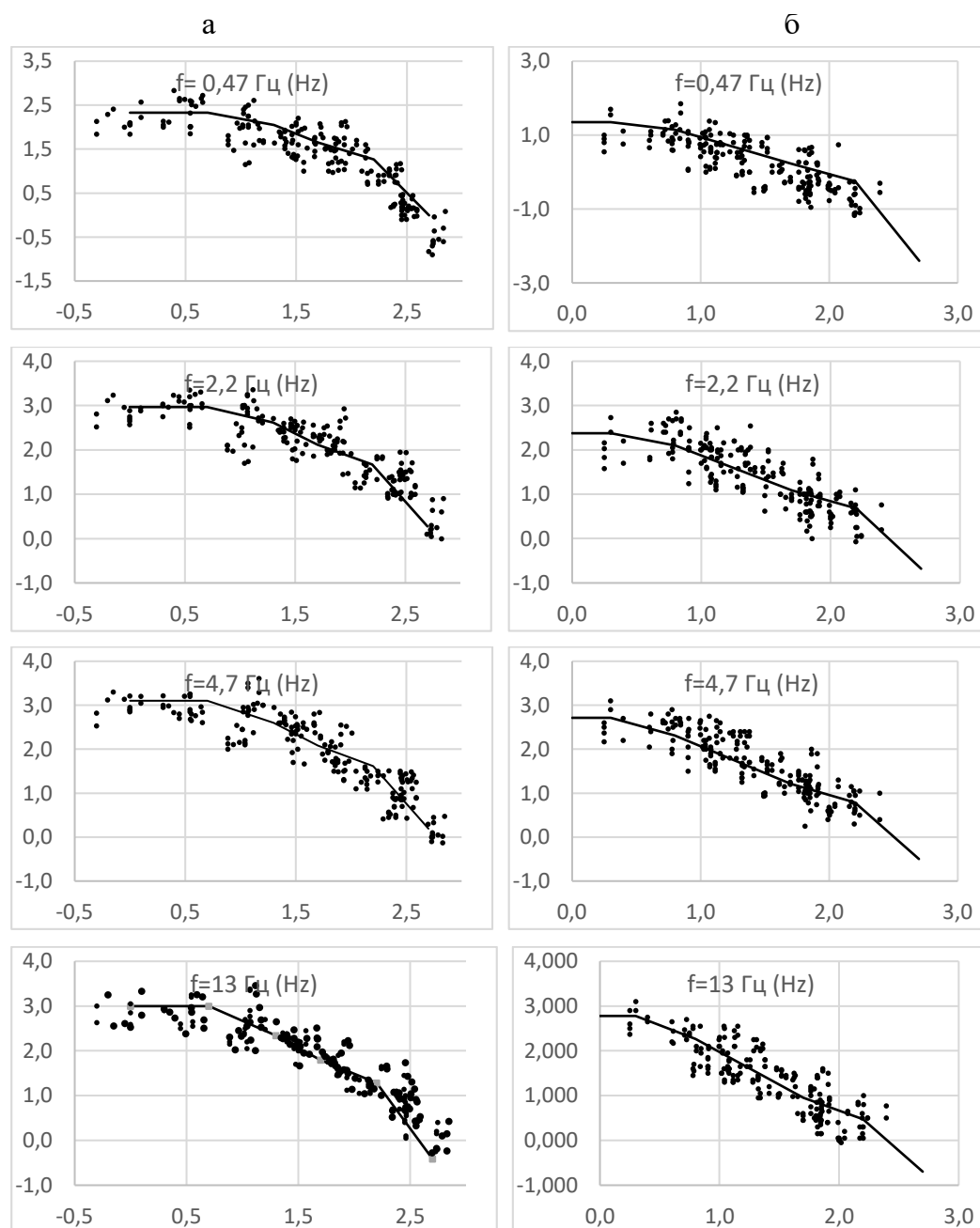


Рис. 3. Примеры сопоставления уровней спектральных ускорений «твердых» грунтов, инструментально зарегистрированных на разных частотах (f) и расстояниях до очага (D) при землетрясениях с разными M (кружки) с пересчетами по выражениям (1) и (2) функций $|S|(M,D,f)$ из [Чернов, 2024] (сплошные линии). а и б – для землетрясений с $M=7$ и $M=5$, соответственно. Оси абсцисс – значения $\lg D$ (D в км), оси ординат – значения $\lg SA$ (SA в см/с/с) /

Fig. 3. Examples of comparing the levels of spectral accelerations of “hard” soils instrumentally recorded at different frequencies (f) and distances to the source (D) in earthquakes with different M (circles) with recalculations using expressions (1) and (2) of the $|S|(M,D,f)$ functions from [Chernov, 2024] (solid lines). а and б are for earthquakes with $M=7$ and $M=5$, respectively. The abscissa axes are $\lg D$ values (D in km), the ordinate axes are $\lg SA$ values (SA in cm/s/s)

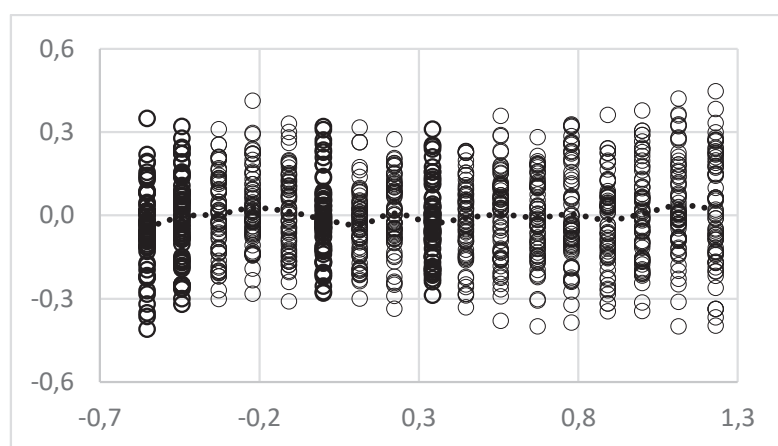


Рис. 4. Оценки разностей между реальными и полученными в результате экспресс-оценок уровнями спектральных ускорений на различных частотах (пояснения в тексте).

Кружки – оценки по отдельным тестовым землетрясениям, пунктир – осреднения тестовых оценок. ($\Delta \lg SA$). Ось абсцисс – значения $\lg f$, где f в Гц, ось ординат – значения $\Delta \lg SA$ /

Fig. 4. Estimates of the differences between the real and the levels of spectral accelerations obtained as a result of express estimates at various frequencies (explanations in the text). Circles are estimates for individual test earthquakes, dotted lines are averages of test estimates. ($\Delta \lg SA$).

The abscissa axis is the $\lg f$ value, where f is in Hz, the ordinate axis is the $\lg SA$ value

Среднестатистические спектры реакции, примеры которых приведены на рисунке 5 использованы для изучения соотношений между максимальными уровнями спектральных ускорений ($SA_{\max}$) и соответствующими уровнями PGA при землетрясениях с разными M и D . При этом пиковые ускорения оценивались в нескольких вариантах. Один из них – это модели $PGA(M,D)$, разработанные в рамках исследований для ДСР территории РСО-Алания [Опасные ..., 2019]. Отметим, что эти модели являются статистическим обобщением 35-ти отдельных зависимостей, разработанных разными авторами, для разных районов мира. Второй – рекомендации по результатам ОСР территории России из [Комплект ..., 1999]. Третий – это пересчет функций затухания макросейсмической интенсивности сотрясений $I(M,D)$, разработанных ранее нами для целей ДСР территории РСО-Алания и для других целей (см. [Опасные ..., 2019; Чернов, 2024]) при помощи выражений:

$$\lg PGA = \begin{cases} 0,271 I + 0,279 & \text{при } 7,5 < I < 11 \\ 0,384 I - 0,568 & \text{при } 4,5 \leq I \leq 7,5 \\ 0,362 I - 0,307 & \text{при } 4,5 \geq I \end{cases} \quad (3)$$

Четвертый вариант – то же, что и третий, но с пересчетом по выражению:

$$\lg PGA = 0.333 I - 0.222 \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) PGA в см/с/с, I в баллах MSK.

Используемые в расчетах по вариантам 3 и 4 функции $I(M,D)$, как и используемые в расчетах по варианту 1 функции $PGA(M,D)$ являются обобщением 23-х зависимостей разных авторов.

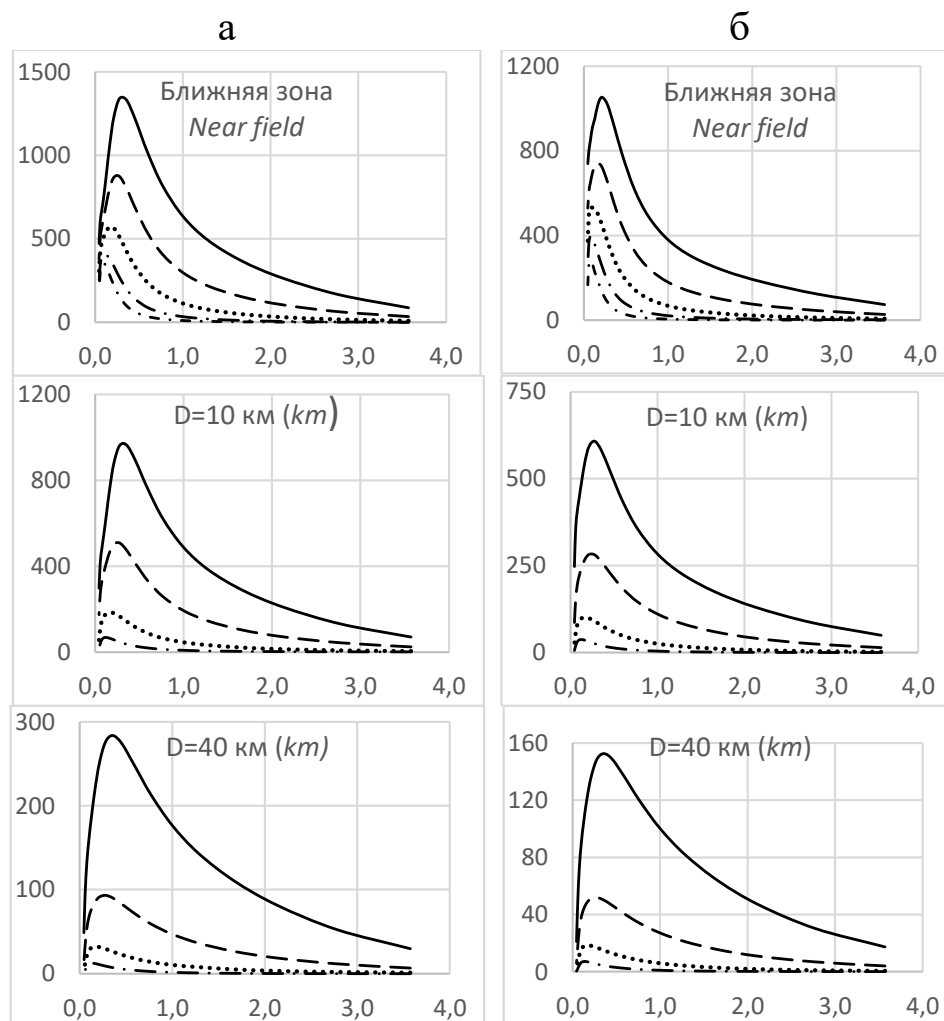


Рис. 5. Примеры наиболее вероятных значений спектральных ускорений (SA) колебаний «мягких» (а) и «твердых» (б) грунтов, рассчитанных по соотношениям (1) и (2) для землетрясений разных магнитуд (M), расстояний до очага (D) и периодов колебаний (T). Сплошные линии, длинный пунктир, точечные линии, длинный пунктир с точкой и короткий пунктир с точкой – оценки для землетрясений с $M=7$; 6; 5; 4 и 3, соответственно.

Ось абсцисс – значения T в с; ось ординат – значения SA в см/с/с /

Fig. 5. Examples of the most probable values of spectral accelerations (SA) of vibrations of “soft” (a) and “hard” (b) soils calculated by the ratios (1) and (2) for earthquakes of different magnitudes (M), distances to the source (D) and periods of motions (T). Solid lines, long dotted lines, dotted lines, long dotted lines with a dot and short dotted lines with a dot are estimates for earthquakes with $M=7$; 6; 5; 4 and 3, respectively. The abscissa axis is the values of T in s; the ordinate axis is the values of SA in cm/s/s

По модельным оценкам $SA_{\max}(M,D)$ и вышеуказанным вариантам оценок $PGA(M,D)$ выполнены 4 варианта оценок $\lg(SA_{\max}/PGA)$ для землетрясений с разными M и D , по которым затем определены средние значения. Результаты этих построений приведены на рисунке 6.

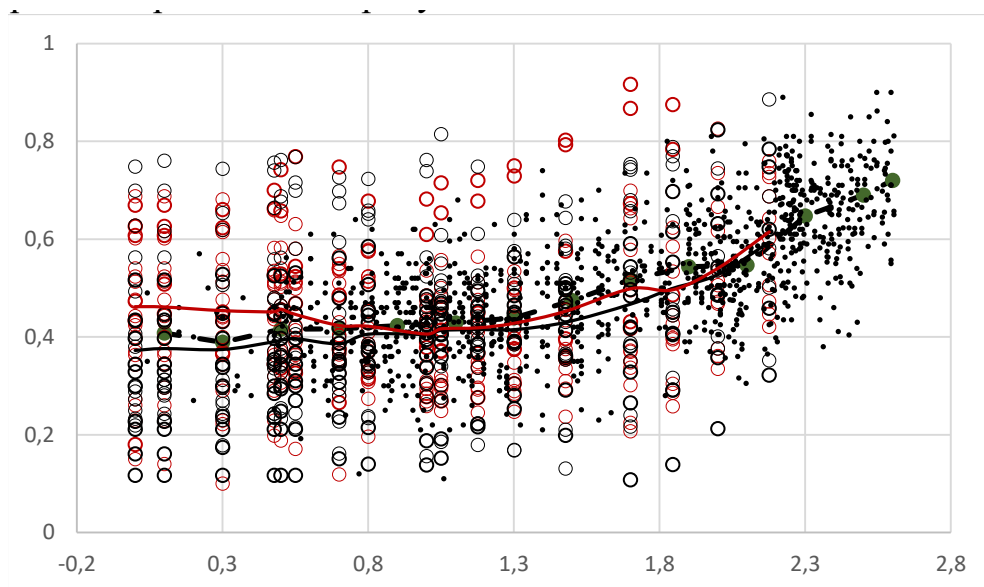


Рис. 6. Соотношения между уровнями SA_{max} и PGA при землетрясениях разных M и D . Круги черного и красного цвета – варианты модельных оценок для «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно. Черные точки – оценки по акселерограммам реальных землетрясений. Черные и красные сплошные линии – осреднения модельных оценок для «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно; пунктир – осреднение реальных данных. Ось абсцисс – значения lgD , где D в км; ось ординат – значения $lg(SA_{max}/PGA)$, где SA_{max} и PGA в см/с/с /

Fig. 6. The relationship between SA_{max} and PGA levels in earthquakes of different M and D . The black and red circles are variants of model estimates for “soft” and “hard” soils, respectively. Black dots are estimates based on accelerograms of real earthquakes. The black and red solid lines are the averaging of model estimates for “soft” and “hard” soils, respectively; the dotted line is the averaging of real data. The abscissa axis is the lgD values, where D is in km; the ordinate axis is the $lg(SA_{max}/PGA)$ values, where SA_{max} and PGA are in cm/s/s

Так как модельные оценки соотношений SA_{max}/PGA оказались слабо зависящими от M , то в целях упрощения на рисунке 6 эти оценки показаны в виде единых массивов, без разделения по величине M . На рисунке также видно, что рассчитанные по моделям величины SA_{max}/PGA практически одинаковы для «мягких» и «твердых» грунтов. На рисунке также видно, что выполненные по упрощенным моделям экспресс-оценки хорошо коррелируют с аналогичными оценками по натурным данным (см. табл. 1), которые в данном случае объединяют оценки для землетрясений разных M и разных типов грунтов в одном массиве. Это соответствие говорит о работоспособности экспресс-моделей и о возможности их использования в исследовательских и практических целях. Так, например, исходя из данных рисунка 6 можно говорить о том, что средние соотношения SA_{max}/PGA слабо зависят от типа грунта и магнитуды землетрясений, но заметно меняются при изменении расстояний D . На близких расстояниях ($D < 25-30$ км) средние уровни SA_{max}/PGA незначительно колеблются около значений 2,5. Следует отметить, что этот результат близок к оценкам многих других авторов (см. например, [Sadigh et al., 1986; Boore et al., 1994; Campbell, Bozorgnia, 1994; 2008; Atkinson, Sonley, 2000]). Затем, по мере возрастания D , средние уровни SA_{max}/PGA постепенно возрастают, достигая значений ≈ 5 при D порядка 300 км.

На рисунке 7 приведены результаты еще одного анализа – оценки распределения соотношений между максимальными уровнями интегральных спектров ре-

акции ускорений и соответствующими интегральными уровнями PGA. Наиболее вероятными здесь являются значения «интегральных» соотношений $SA_{\max}/PGA \approx 2,42$ при стандарте величины $\lg(SA_{\max}/PGA) \sigma \approx 0,07$.

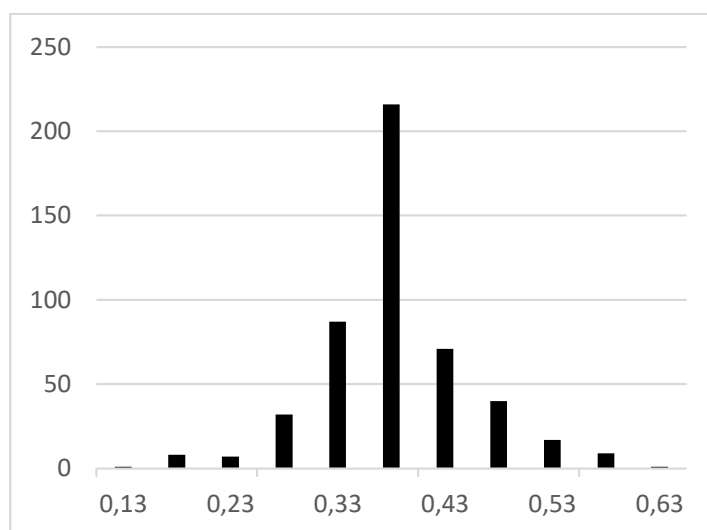


Рис. 7. Гистограмма соотношений логарифмов максимумов интегральных спектров реакции и пиковых амплитуд ускорений колебаний грунта. Ось абсцисс – «интегральные» значения $\lg(SA_{\max}/PGA)$, где $SA_{\max}$ и PGA в см/с/с. Ось ординат – число случаев (измерений) /

Fig. 7. Histogram of the logarithm ratios of the maxima of the integral reaction spectra and peak amplitudes of acceleration of ground motions. The abscissa axis is the “integral” values of $\lg(SA_{\max}/PGA)$, where $SA_{\max}$ and PGA are in cm/s/s. The ordinate axis is the number of cases (measurements)

При формировании анализируемой выборки интегральных оценок, соотношения $SA_{\max}/PGA$, полученные в условиях «мягких» и «твердых» грунтов, ввиду их небольших отличий и относительно небольшого количества последних, объединены в единый массив данных.

Приведенные на рисунках 6 и 7 данные, как указывалось выше, представляют также и практический интерес. Так, например, в российских документах, регламентирующих работы по ДСР и СМР (СП 286.1325800.2016, СП 408.1325800.2018), указано, что среднее значение соотношений $SA_{\max}/PGA = 3,6$. В то же время по рисунку 6 видим, что такие значения характерны для расстояний порядка 100 км, на которых обычно интенсивность сотрясений уже невелика и даже при больших землетрясениях (с $M \sim 7$, например) составляет в среднем 6,0 – 6,5 балла MSK, а для землетрясений с меньшими M и того меньше. Ясно, что такие воздействия не являются основной проблемой, решаемой при антисейсмическом проектировании и строительстве. Применение же коэффициента 3,6 для близких расстояний приводит к значительному завышению прогнозных уровней спектральных ускорений и, как следствие, к неоправданным затратам на усиление зданий и сооружений.

В этой связи интересно отметить, что в принятом приблизительно в то же время документе, регламентирующем строительство в сейсмических районах (СП 14.13330.2018) максимальное значение коэффициента динамичности, имеющего похожий физический смысл с соотношением $SA_{\max}/PGA$, оставлено таким же, как и в предыдущих редакциях СНиП и равным 2,5.

Выводы

1. Разработанные аналитические выражения, описывающие статистические зависимости $SA(f)$ от $|S|(f)$ позволяют с приемлемой для исследовательских и практических нужд точностью оценивать спектральные ускорения колебаний по имеющимся данным об уровнях спектральной плотности Фурье ускорений колебаний грунта.

2. Установленные соотношения между $SA(f)$ от $|S|(f)$ обладают определенной универсальностью и позволяют моделировать спектры реакции землетрясений для разных магнитуд, расстояний и частот, для разных типов грунтов, а также для простых («ситуационных») и интегральных (кумулятивных) оценок.

3. Использование разработанных моделей связи между $SA(f)$ и $|S|(f)$ позволило получить новые альтернативные оценки имеющих существенное практическое значение соотношений между пиковыми ускорениями колебаний грунта и максимальными величинами спектральных ускорений.

Литература

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 2. М.: Мир, 1983. – С. 751–857.
2. Брун Дж.Н. Физика сильных движений, вызванных землетрясениями. / В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. – С. 129–161.
3. Ванмарке Э.Х. Реакция сооружений на землетрясения. / В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. – С. 256–299.
4. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
5. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. / Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Т. VI. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – 237 с.
6. Глаговский В.П., Кассирова Н.А., Воронков О.К. и др. Исследования сейсмостойкости скважин нефтедобывающей платформы на шельфе Сахалина. // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 6. – С. 72–77.
7. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства. М.: Наука, 1981. – 265 с.
8. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. / Гл. редакторы В.Н. Страхов, В.И. Уломов. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.
9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. – 174 с.
10. Назарбекское землетрясение 11 декабря 1980 г. Ташкент: Фан, 1984. – 145 с.
11. Папское землетрясение 1984 г. Ташкент: Фан, 1986. – 136 с.
12. Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография. / Под редакцией А.В. Николаев, В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019. – 806 с.
13. Рустанович Д.Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1974. – 97 с.
14. Чернов Ю.К. Эмпирические модели для вероятностных оценок колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 90–106.
15. Чернов Ю.К. О новом подходе к учету влияния «грунтового фактора» при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2023 – Т. 13. № 4. – С. 55–70.

16. Шикотанское землетрясение 1994 г. Эпицентральные наблюдения и очаг землетрясения. М.: ОИФЗ РАН, 1995. – 136 с.
17. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1993. – Вып. 34. – С. 5–94.
18. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2014. – Vol. 12. No. 1. – pp. 359–387.
19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. // *BSSA*. – 2000. – Vol. 90(2). – pp. 533–544.
20. Boore D.M., Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24. No. 1. – pp. 99–138.
21. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. // U.S. Geological Survey Open – File Report. – 1994. – pp. 94–127.
22. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5%-damped linear elastic response spectra at periods ranging from 0.1 s to 10.0 s. // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24(1). – pp. 139–171.
23. Campbell K.W., Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993. // In: *Proceedings, Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. – 1994. – Vol. III. – pp. 283–292.
24. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2018. – Vol. 16. – pp. 3497–3533.
25. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of ground motion for seismic design of long period structures. // *Earthquake Note*. – 1986. – pp. 57–132.

References

1. Aki K., Richards P. Quantitative seismology. Vol. 2. Moscow. Mir. 1983. pp. 751–857. (In Russ.)
2. Brun J.N. Physics of strong motions caused by earthquakes. In: *Seismic risk and engineering solutions*. Moscow. Nedra. 1981. pp. 129–161. (In Russ.)
3. Vanmarke E.H. Reaction of structures to earthquakes. In: *Seismic risk and engineering solutions*. Moscow. Nedra. 1981. pp. 256–299. (In Russ.)
4. The Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Fan. 1986. 368 p. (In Russ.)
5. Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Problems of seismic hazard in the Far Eastern region. Vol. VI. Yuzhno-Sakhalinsk. IMGGE FEB RAS. 1997. – 237 p. (In Russ.)
6. Glagovsky V.P., Kassirova N.A., Voronkov O.K. et al. Studies of seismic resistance of oil production platform wells on the Sakhalin shelf. *Oil industry*. 2004. No. 6. pp. 72–77. (In Russ.)
7. Dagestan earthquake on 14 May 1970. Destructive effects. *Engineering seismology. Issues of earthquake engineering*. Moscow. Nauka. 1981. 265 p. (In Russ.)
8. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas. Eds. V.N. Strakhov, V.I. Ulomov. Moscow. OIPE RAS. 1999. 57 p. (In Russ.)
9. Kostrov B.V. Mechanics of the tectonic earthquake source. Moscow. Nauka. 1975. 174 p. (In Russ.)
10. The Nazarbek earthquake on 11 Decembe 1980. Tashkent. Fan. 1984. 145 p. (In Russ.)
11. The Pap earthquake of 1984. Tashkent. Fan. 1986. 136 p. (In Russ.)

12. Dangerous natural and anthropogenic processes in mountainous territories: models, systems, technologies. Multi-authored monograph. Eds. A.V. Nikolaev, V.B. Zaalishvili. Vladikavkaz. GFI VSC RAS. 2019. 806 p. (In Russ.)
13. Rustanovich D.N. Fluctuations of the Earth's surface in epicentral zones of strong earthquakes. Moscow. Nauka. 1974. 97 p. (In Russ.)
14. Chernov Yu.K. Empirical models for probabilistic estimates of vibrations of “soft” and “hard” soils during earthquakes. *Geology and geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 90-106. (In Russ.)
15. Chernov Yu.K. A new approach to taking into account the influence of the “ground factor” in probabilistic assessments of the seismic hazard of territories. *Geology and geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 55–70. (In Russ.)
16. The Shikotan earthquake of 1994. Epicentral observations and earthquake source. Moscow. OIPE RAS. 1995. 136 p. (In Russ.)
17. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods of seismic impact assessment (manual). *Problems of Engineering Seismology*. 1993. Issue 34. pp. 5–94. (In Russ.)
18. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2014. Vol. 12. No. 1. pp. 359–387.
19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. *BSSA*. 2000. Vol. 90(2). pp. 533–544.
20. Boore D.M., Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*. 2008. Vol. 24. No. 1. pp. 99–138.
21. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. U.S. Geological Survey Open – File Report. 1994. pp. 94–127.
22. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5%-damped linear elastic response spectra at periods ranging from 0.1 s to 10.0 s. *Earthquake Spectra*. 2008. Vol. 24(1). pp. 139–171.
23. Campbell K.W., Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993. In: *Proceedings, Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. 1994. Vol. III. pp. 283–292.
24. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018. Vol. 16. pp. 3497–3533.
25. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of ground motion for seismic design of long period structures. *Earthquake Note*. 1986. pp. 57–132.

УДК 625.7/.8

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

Оригинальная статья

Энергия деформирования в слоистой среде при ударном нагружении (на примере автомобильных дорог)

А.Н. Тиратурян^{ID}, В.В. Акулов^{ID}

Донской государственный технический университет, Россия, 344000,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, e-mail: tiraturjan@list.ru

Статья поступила: 27.09.2024, доработана: 28.11.2024, принята к публикации: 29.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Слоистые среды – одни из наиболее часто встречающихся объектов в инженерно-строительной деятельности человека. С одной стороны они представляют собой грунтово-геологические массивы, а с другой, например, взаимодействующие с ними дорожные одежды автомобильных дорог. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных одежд автомобильных дорог служит основой для решения многих инженерных задач, и в последние годы осуществляется, как правило, с применением геофизических методов. Выработка эффективных критериев анализа состояния дорожных одежд на основе геофизических подходов, опирающихся на анализ диссипации энергии динамического деформирования, может в значительной степени послужить повышению их долговечности и надежности в течение жизненного цикла. **Цель работы.** Исследование процессов диссипации энергии деформирования в слоистых средах на примере дорожных одежд автомобильных дорог и установление качественных взаимосвязей между жесткостью отдельных слоев и диссипацией энергии деформирования в них. **Методы.** В рамках исследования выполнялись экспериментальные исследования диссипации энергии деформирования на поверхности дорожной одежды, и отдельных ее слоев по мере строительства. В качестве опытного участка был выбран строящийся участок автомобильной дороги I категории на Юге России. Для экспериментального анализа использовалась установка динамического нагружения с падающим грузом FWD PRIMAX 1500, позволяющая осуществлять регистрацию динамических петель гистерезиса как на поверхности отдельных слоев дорожной одежды, так и на поверхности автомобильной дороги. **Результаты.** Впервые рассчитаны количественные значения уровней диссипации энергии деформирования для дорожной одежды автомобильной дороги, и установлена их связь с жесткостными характеристиками конструктивных слоев. Установлено, что верхние тонкие слои покрытий дорожных одежд, обладающие большей вязкостью в сравнении с остальными слоями, служат «демпфером», поглощающим и рассеивающим энергию деформирования, позволяющим предохранять нижние слои от накопления деформаций и микроразрушений.

Ключевые слова: слоистые среды, напряженно-деформированное состояние, дорожная одежда, диссипация энергии, динамическое нагружение.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00110, <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>.

Для цитирования: Тиратурян А.Н., Акулов В.В. Энергия деформирования в слоистой среде при ударном нагружении (на примере автомобильных дорог). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 128-141. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

Original paper

Deformation energy in a layered half-space under impact loading (on the example of highways)

A.N. Tiraturyan^{ID}, V.V. Akulov^{ID}

Don State Technical University, 1 Gagarin Ave., Rostov-on-Don 344000,
Russian Federation, e-mail: tiraturjan@list.ru

Received: 27.09.2024, revised: 28.11.2024, accepted: 29.11.2024

Abstract: Relevance. Layered half-space are among the most frequently encountered objects in human engineering and construction activities. On the one hand they represent soil-geological massifs, and on the other hand, for example, roadways interacting with them. The study of stress-strain state of highway pavements serves as a basis for solving many engineering problems, and in recent years is carried out as a rule with the use of geophysical methods. The development of effective criteria for analyzing the state of road pavements on the basis of geophysical approaches, based on the analysis of dissipation of dynamic deformation energy, can significantly serve to increase their durability and reliability during the life cycle. **Aim.** To study the processes of deformation energy dissipation in layered half-space on the example of road pavements of highways and to establish qualitative relationships between the stiffness of individual layers and the dissipation of deformation energy in them. **Methods.** Experimental investigations of the dissipation of deformation energy on the surface of the road pavement and its separate layers during construction were carried out within the framework of the research. For the experimental analysis we used a dynamic loading unit with a falling load FWD PRIMAX 1500, which allows to register dynamic hysteresis loops both on the surface of separate layers of pavement and on the road surface. **Results.** For the first time quantitative values of the levels of dissipation of deformation energy for the A-135 highway pavement have been calculated and their relationship with the stiffness characteristics of structural layers has been established. The assumption is made, confirmed by the results of experimental measurements, that the upper thin layers of pavements with higher viscosity compared to other layers serve as a “dampener” absorbing and dissipating the deformation energy, allowing to protect the lower layers from the accumulation of deformation and micro-destruction.

Keywords: lyered half-space, stress-strain state, road pavement, energy dissipation, dynamic loading.

Acknowledgments: The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 24-29-00110, <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>.

For citation: Tiraturyan A.N., Akulov V.V. Deformation energy in a layered half-space under impact loading (on the example of highways). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(4): 128-141. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

Введение

Дорожные одежды автомобильных дорог представляют собой слоистые среды, взаимодействующие с грунтовым основанием и контактирующие с движущимся по их поверхности транспортным потоком. Фактически долговечность дорожных одежд определяет долговечность автомобильной дороги, и своевременное выявление проблем, связанных с внутренним или внешним дефектообразованием, может позволить значительно продлить их срок службы.

Поскольку работа дорожных одежд автомобильных дорог в течение года осуществляется преимущественно в условиях динамического нагружения, их деформирование может рассматриваться преимущественно с точки зрения геофизических методов. В работах [Бабешко и др., 1989, 2024; Ворович и др., 1999; Ляпин и др., 2008; Разин, Собисевич, 2012] были заложены основы расчетного аппарата для анализа подобных конструкций, а в последующих исследованиях [Илиополов и др., 2002; Beskopylny et al., 2017] данный расчетный аппарат был эффективно применен при решении задач дорожной отрасли.

В основе данных подходов лежит построение аналитического решения уравнения движения в форме уравнения Ламе:

$$(\lambda + 2\mu)\text{grad}(\text{div}\mathbf{u}) - \mu\text{rotrot}\mathbf{u} + \mathbf{F} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}; \quad (1)$$

где:

λ, μ – коэффициенты Ламе,

$\mathbf{u}$ – вектор перемещений,

ρ – плотность среды.

В работе [Ляпин и др., 2008], были подробно рассмотрены способы построения решений для случая стационарных колебаний. В работе [Волкова и др., 2011] с применением метода дискретного гармонического анализа были получены соответствующие решения данного уравнения для случая нестационарного нагружения, реализуемые при решении задач восстановления механических параметров конструктивных слоев рассматриваемых сред, необходимых для проектирования, их восстановления и усиления.

Вместе с тем уравнение (1) с использованием свойств преобразования Фурье может учитывать, также и вязкость, характеризуемую введением тангенсов углов потерь продольных и поперечных волн в исследуемой среде.

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) - \frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) + \theta_{j1}^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = 0, \quad (2)$$

где ∇ – набла-оператор;

$\theta_{j1}^2 = \omega^2 / V_{Pj}^2$, $\theta_{j2}^2 = \omega^2 / V_{Sj}^2$, – приведенные частоты колебаний,

$V_{Pj} = \sqrt{(\lambda_j + 2\mu_j) / \rho_j}$, $V_{Sj} = \sqrt{\mu_j / \rho_j}$ – скорости распространения продольных и поперечных волн в j -й среде.

Учет вязкости в этом случае позволяет помимо традиционных определяемых в существующих методах исследования дискретных характеристик на поверхности дорожных одежд, таких как чаша прогиба (рис. 1), анализировать непрерывные характеристики деформирования, в виде динамических петель гистерезиса [Тиратурян, 2024; Тиратурян, 2023].

В мировой практике также уделяется большое внимание исследованиям, касающимся динамики деформирования слоистых сред на примере дорожных одежд. В целом данные методики могут быть разделены на «традиционные» подходы к исследованиям характеристик деформирования, регистрируемых на поверхности дорожных одежд, и геофизические методы изучения амплитудно-частотных и амплитудно-временных характеристик скоростей и ускорений, а также методики анализа, базирующиеся на построении профилей скоростей продольных волн и волн сдвига в структуре дорожных одежд.

К таким методам можно отнести метод спектрального анализа поверхностных волн (SASW) [Qiao et al., 2023; Goel, 2024; Gohil et al., 2024; Nazarian et al., 1995] и метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [Gohil et al., 2023; Madun et al., 2020]. Оба этих метода базируются на регистрации поверхностных волн Рэлея, так как этот тип волн несет в себе информацию о соотношении фазовых скоростей и частот колебаний, которые позволяют построить дисперсионную кривую, и профили сдвиговых волн по глубине исследуемого массива. Затем после построения экспериментального профиля скоростей волн, осуществляется решение обратной задачи, которая позволяет подобрать соответствующие жесткостные и геометрические характеристики исследуемого массива. Нужно отметить, что метод SASW достаточно активно применяется при оценке эксплуатационного состояния автомобильных дорог [Wu et al., 2022; Nazarian et al., 1995].

Особого внимания при оценке свойств слоистых сред на примере дорожных одежд заслуживают установки ударного нагружения FWD [Pandya et al., 2024; Makwana, 2023; Aziz, Taher, 2021]. Мировым стандартом в области оценки состояния дорожных одежд в целом и отдельных их слоев является общепризнанный подход к определению модулей упругости слоев дорожных одежд по зарегистрированной на поверхности покрытия автомобильной дороги чаше прогибов. Идеология этого метода в целом близка идее метода SASW, с поправкой на то, что вместо регистрации скоростей поверхностных волн в местах установки датчиков, происходит регистрация скоростей вертикальных колебаний, пересчитываемых затем в вертикальные перемещения. После чего путем решения «обратной» задачи, восстанавливаются жесткостные характеристики слоев дорожной одежды, обеспечивающие расчетную чашу прогибов, аналогичную измеренной в полевых условиях [Wang et al., 2020].

В последних генерациях установок ударного нагружения FWD в дополнение к возможности регистрации чаш прогибов, появилась возможность регистрации динамических петель гистерезиса по каждому из датчиков [Ziyadi et al., 2023; Yin, 2012]. Учитывая, что площадь петли гистерезиса напрямую характеризует работу деформирования, или другими словами величину диссипации энергии, необратимо затрачиваемую при деформировании, анализ этого показателя может значительно расширить информативность существующих методов неразрушающего контроля состояния дорожных одежд.

При этом до текущего момента проведено крайне мало испытаний, направленных на установление количественных значений энергии диссипации в слоях дорожных одежд на реально строящихся объектах. Отсутствуют также и экспериментальные результаты позволяющие оценить соотношение между жесткостными характеристиками слоев дорожных одежд и величиной энергии динамического деформирования, рассеиваемой в них. Именно поэтому цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании процессов диссипации энергии деформирования в слоистых средах на примере автомобильных дорог и установлении количественных и качественных характеристик диссипации энергии, зарегистрированных на тестовом участке автомобильной дороги.

Методы исследования

В качестве тестовой конструкции была принята конструкция дорожной одежды, устроенная на автомобильной дороге А-135 в г. Ростов-на-Дону (рис. 1). Данная конструкция устраивалась полностью новой, и состоит из слоев, проектные значения механических характеристик которых представлены в таблице 1.

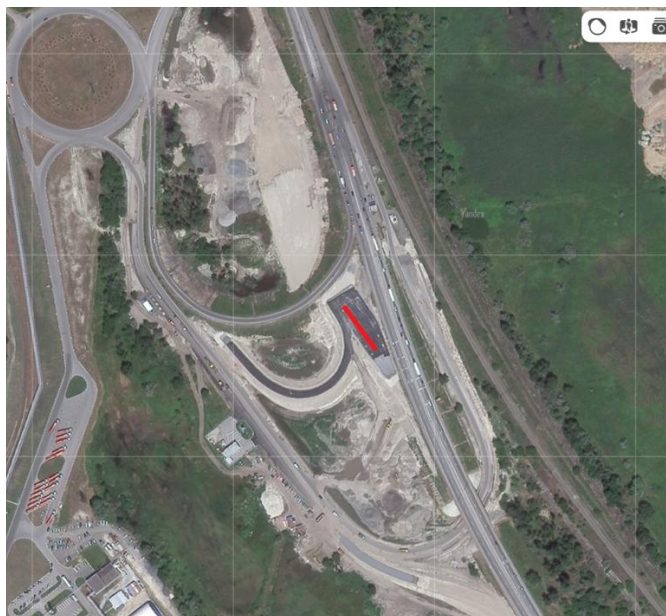


Рис. 1. План участка мониторинга (красной линией указан участок проведения мониторинга) /
Fig. 1. Plan of the monitoring site Monitoring site plan (the red line indicates the monitoring site)

Таблица 1 / Table 1

**Механические параметры конструктивных слоев дорожной одежды
на участке мониторинга /
Mechanical parameters of structural pavement layers at the monitoring site**

Материалы конструктивных слоев / Materials of structural layers	Проектные данные / Design data		
	Проектная толщина, см / Design thickness, cm	Проектный модуль упругости на поверхности конструктивных слоев (для асфальтобетона при 10°C), МПа / Design modulus of Young on the surface of structural layers (for asphalt concrete at 10°C), MPa	Проектный модуль упругости на поверхности конструктивных слоев, при 10° расчет ПНСТ 265, МПа / Design equivalent modulus of Young on the surface of structural layers, at 10° calculated PNST 265, MPa
Верхний слой покрытия – ЩМА 16 по ПНСТ 183-2019 на ПБВ 60 по ГОСТ 52056-2003 / The surface layer of the pavement is SMA 16 according to PNST 183-2019 on PBV 60 according to GOST 52056-2003	5	4600	1067.64

Нижний слой покрытия – А 32 НТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Lower pavement layer – A 32 NT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	8	4500	913.27
Верхний слой основания – А 32 ОТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Top base layer – A 32 OT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	12	2900	667
Укрепленный слой основания из органоминеральной смеси ХО 32 ЭМ / Stabilized base layer made of organomineral mixture HO 32 EM	22	1000	446.54
Нижний слой основания – Щебень М800 фр. 31,5-63 мм, ГОСТ 32703-2014 / The bottom layer of the base (granular base) – Crushed stone М800 crushed stone of 31.5-63 mm, GOST 32703-2014	36	450	227.86
Дополнительный слой основания – Песок средней крупности с коэфф. фильтр. более 1 м/сут., ГОСТ 8736-93 / Subbase layer — Medium coarse sand with a filter coefficient of more than 1 m/day, GOST 8736-93	20	120	75.59
Грунт – суглинок / Soil – loam		43	43
Общая толщина / Total thickness	103		

Контроль фактических значений механических параметров слоев дорожной конструкции и диссипации энергии деформирования осуществлялся с использованием датской установки динамического нагружения FWD PRIMAX 1500 (рис. 2). Данная установка представляет собой прицеп со смонтированными на нем механизмом ударного нагружения и измерительной балкой, регистрирующей вертикальную компоненту скорости перемещений, впоследствии пересчитываемую в абсолютные значения вертикальных перемещений. Отличием данной установки является возможность практически непрерывной, с шагом дискретизации 0.002 с, записи амплитудно-временной характеристики перемещений на поверхности покрытия и амплитудно-временной характеристики импульса ударного нагружения (рис. 3).

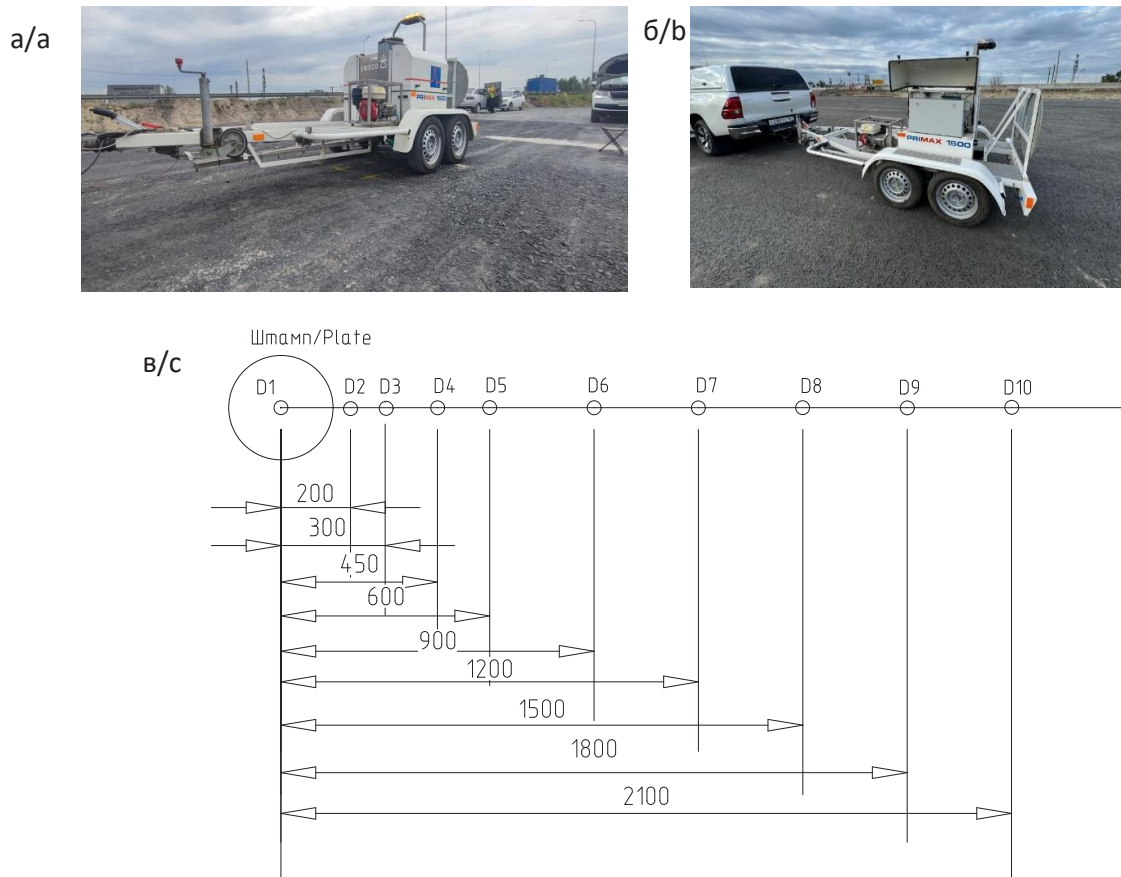


Рис. 2. Установка ударного нагружения для регистрации вертикальных перемещений на слое из органоминеральной смеси (а) и слое асфальтобетонного покрытия (б); схема размещения датчиков-измерителей прогиба, расстояния даны в мм (в) /

Fig. 2. Impact loading rig for recording vertical displacements on a layer of organomineral mixture (a) and asphalt surface layer (b); sensor layout deflection gauges, distances are given in mm (c)

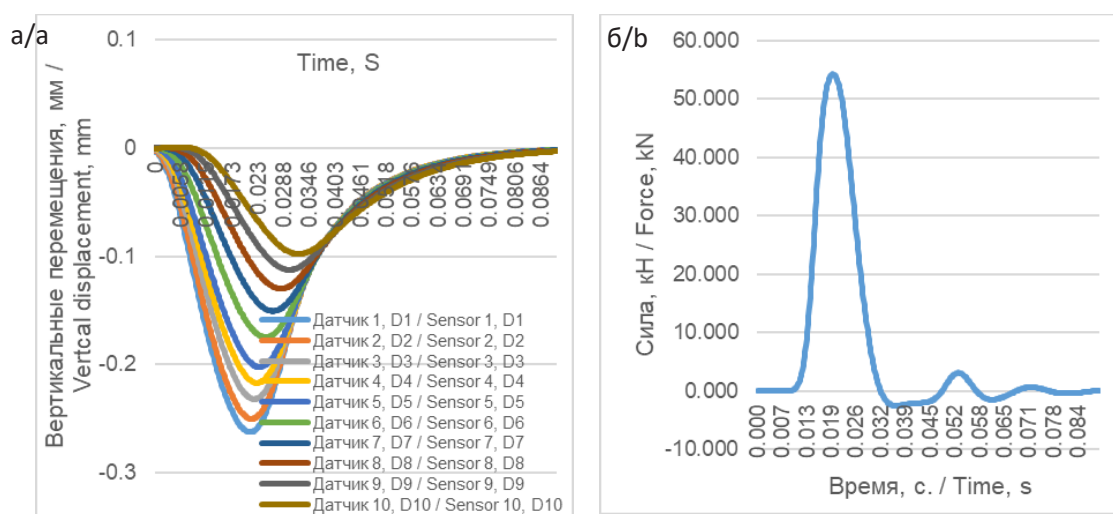


Рис. 3. Примеры амплитудно-временной характеристики перемещений (а) и амплитудно-временной характеристики импульса ударного нагружения (б), зарегистрированные установкой FWD /

Fig. 3. Examples of the amplitude-time displacement characteristic and amplitude-time characteristic of impulse load, recorded by the FWD

Измерения с использованием данной установки осуществлялись на поверхности каждого слоя дорожной одежды по мере ее возведения, начиная с несвязного слоя из фракционированного щебня, заканчивая верхним асфальтобетонным слоем покрытия ЦМА-16. Учитывая влияние температуры асфальтобетона на его механические свойства периоды испытаний подбирались таким образом, чтобы температура на момент проведения всех работ на поверхности асфальтобетонных слоев составляла 13–15 °С.

При обработке результатов измерений удельная диссипация энергии рассчитывалась как:

$$W_{def} = \int_0^t F(t) u(t) dt$$

W_{def} – удельная диссипация энергии, Дж/м³,

$F(t)$ – временная характеристика импульса ударного нагружения от времени,

$u(t)$ – амплитудно-временная характеристика перемещений на поверхности покрытия.

Результаты работы и обсуждение

Ниже представлены результаты определения удельной диссипации энергии за цикл ударного нагружения установкой FWD на щебне, в укрепленном слое основания из органоминеральной смеси, и на поверхности верхнего слоя основания, нижнего слоя покрытия и верхнего слоя покрытия (рис. 4).

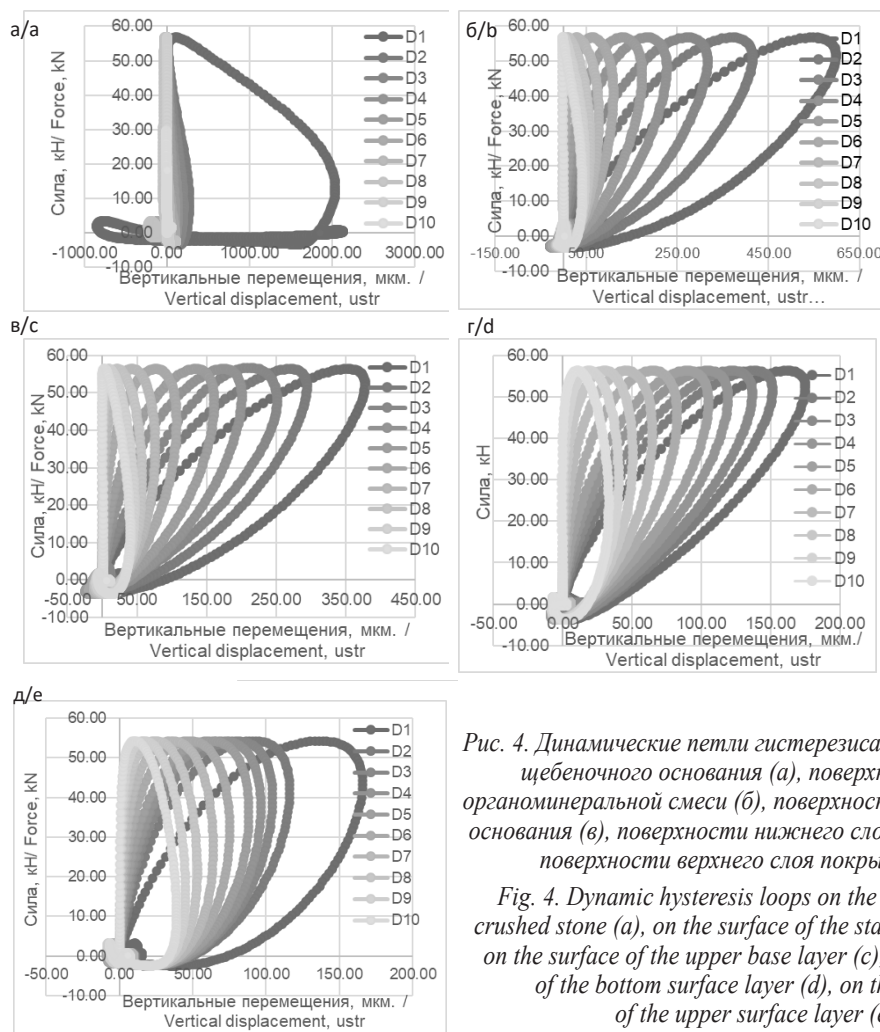


Рис. 4. Динамические петли гистерезиса на поверхности щебеночного основания (а), поверхности слоя органоминеральной смеси (б), поверхности верхнего слоя основания (в), поверхности нижнего слоя покрытия (г), поверхности верхнего слоя покрытия (д) /

Fig. 4. Dynamic hysteresis loops on the surface of the crushed stone (a), on the surface of the stabilized base (b), on the surface of the upper base layer (c), on the surface of the bottom surface layer (d), on the surface of the upper surface layer (e)

Как видно из представленных графиков по мере увеличения капитальности дорожной одежды, т.е. с увеличением количества слоев, уменьшается площадь динамических петель гистерезиса, а следовательно, и фактическое значение удельной диссипации энергии. При этом характерную форму имеют динамические петли гистерезиса, зарегистрированные на поверхности щебеночного слоя. Наибольшее отличие траекторий нагружения наблюдается на первом датчике, при этом на рисунке 4а присутствует характерный «хвост» петли гистерезиса, свидетельствующий о накоплении пластических деформаций, после воздействия динамической нагрузки установки ударного нагружения FWD. На остальных датчиках D2–D9 видна картина резкого затухания энергии, обусловленная выраженными процессами трения между частицами в дискретном слое. Остальные слои являются монолитными, в том числе, это характерно и для укрепленного слоя основания из органоминеральной смеси, что соответственно приводит к значительно более низким значениям величины диссипации энергии деформации в них на датчике D1, и некоторому увеличению рассеянной энергии в области датчиков D2–D10.

В графическом виде фактические результаты определения диссипации энергии приведены на рисунке 5.

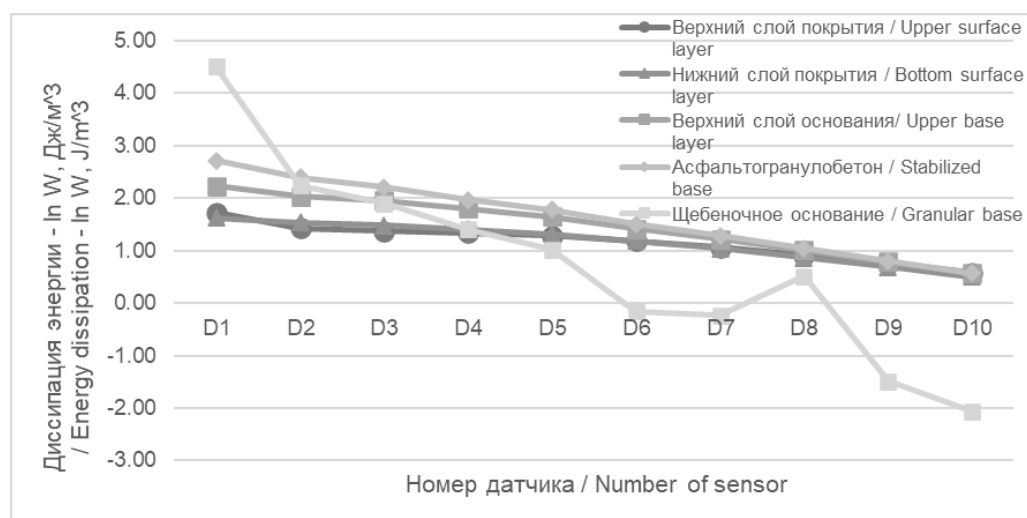


Рис. 5. Изменение величины удельной диссипации энергии по мере увеличения капитальности дорожной одежды /

Fig. 5. Variation of specific energy dissipation as the capitalization of the pavement increases

Данные на рисунке 5 приводятся в логарифмическом масштабе. Особое внимание следует обратить на величину рассеянной энергии, рассчитанной по петле гистерезиса по датчику D8. В этой точке кривая изменения энергии теряет монотонность из-за дискретности слоя щебеночного основания. Для всех остальных слоев, являющихся монолитными, кривые изменения величины диссипации энергии являются монотонными.

На основе полученных фактических значений, по первому датчику – D1, находящемуся непосредственно в точке нагружения, был произведен расчет энергии, рассеянной каждым слоем в структуре дорожной одежды (табл. 2)

Таблица 2 / Table 2

Фактические значения диссипации энергии деформирования и фактические значения модулей упругости слоев дорожной одежды / Actual values of dissipation of deformation energy and actual values of elastic moduli of pavement layers

Наименование слоя	Диссипация энергии на поверхности слоя, Дж/м ³ / Energy dissipated on surface layer, J/m ³	Изменение энергии деформирования по мере наращивания капитальности Дж/м ³ / Change in deformation energy as capitalization increases, J/m ³	Общий модуль упругости на поверхности слоя, МПа / Equivalent modulus of Young on surface layer, MPa	Модуль упругости слоя, МПа / Modulus of Young of layer, MPa.
Верхний слой покрытия – ЩМА 16 по ПНСТ 183-2019 на ПБВ 60 по ГОСТ 52056-2003 / The surface layer of the pavement is SMA 16 according to PNST 183-2019 on PBV 60 according to GOST 52056-2003	5.581	0.48	1120	6000
Нижний слой покрытия – А 32 НТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Lower pavement layer – A 32 NT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	5.097	-4.16	1053	13000
Верхний слой основания – А 32 ОТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Top base layer – A 32 OT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	9.259	-5.88	488	3000
Укрепленный слой основания из органоминеральной смеси ХО 32 ЭМ / Stabilized base layer made of organomineral mixture HO 32 EM	15.135	-75.02	308	2000
Нижний слой основания – Щебень М800 фр. 31,5-63 мм, ГОСТ 32703-2014 / The bottom layer of the base (granular base) – Crushed stone M800 crushed stone of 31.5-63 mm, GOST 32703-2014	90.15	-	87	-

Анализируя данную таблицу, можно отметить, что по мере наращивания капитальности дорожной одежды, путем устройства новых конструктивных слоев об-

ший модуль упругости на поверхности постоянно увеличивается, изменяясь при этом в зависимости от толщины вновь устраиваемого слоя. Фактическая величина диссипации энергии на поверхности каждого вновь устраиваемого слоя уменьшается, вплоть до устройства верхнего слоя покрытия из ЩМА, на поверхности которого диссипация энергии вновь увеличивается. Данный эффект может быть объяснен тем, что слой ЩМА в отличие от остальных слоев асфальтобетона отличается большим содержанием битумного вяжущего, и как следствие большим внутренним трением, возникающим при приложении на его поверхности нагрузки. Это позволяет сформулировать важный вывод – устройство тонкого слоя с большим содержанием вяжущего на поверхности дорожной одежды может служить своеобразным демпфером, поглощающим и рассеивающим энергию деформирования на поверхности, предохраняющим нижние слои от накопления деформаций и микроразрушений. При этом очень важно, что этот слой должен быть достаточно тонким, чтобы не стать источником накопления пластических деформаций в структуре дорожной одежды. Выработка рациональных параметров для подобных слоев требует большего накопления статистических данных, включающих различные виды щебеночно-мастичных асфальтобетонов, устроенных с применением различных вяжущих и добавок, а также широко распространяемые в последние годы слои поверхностных обработок и тонкие слои из литых эмульсионно-минеральных смесей.

Выводы

1. Впервые установлены количественные значения величины диссипации энергии на поверхности конструктивных слоев дорожных одежд автомобильных дорог и непосредственно в слоях дорожных одежд автомобильных дорог, позволяющие оценить степень ее изменения по мере наращивания капитальности дорожной одежды.

2. Отмечено, что по мере увеличения капитальности дорожной одежды общий модуль упругости на поверхности непрерывно возрастает, в то время как величина диссипации энергии убывает. Однако в случае применения слоев, содержащих большое количество вяжущего, т.е. обладающих большей внутренней вязкостью в сравнении со смежными слоями, величина диссипации энергии начинает возрастать, что обуславливается большими потерями на преодоление вязкого трения.

3. Установлено, что устройство тонкого слоя с большим содержанием, вяжущего на поверхности дорожной одежды, может служить своеобразным демпфером, поглощающим и рассеивающим энергию деформирования на поверхности, предохраняющим нижние слои от накопления деформаций и разрушений. Величина диссипации энергии деформирования в таком слое может являться индикатором его рассеивающей способности, и как следствие эффективности.

Литература

1. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука, 1989. – 344 с.
2. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Уафа С.Б., Лозовой В.В., Евдокимов В.С. О предвестнике землетрясения в сейсмоопасной горной территории // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 33–44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003.
3. Волкова Е.А., Ляпин А.А., Селезнев М.Г., Углова Е.В. О решении обратных задач строительной механики на основе данных натурного эксперимента. // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 2(626). – С. 65–71.

4. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. М.: Научный мир, 1999. – 246 с.
5. Илиополов С.К., Селезнёв М.Г., Углова Е.В. Динамика дорожных конструкций. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2002 – 258 с.
6. Ляпин А.А., Селезнёв М.Г., Селезнёв Н.М. Динамическая контактная задача для трехслойного полупространства с цилиндрической полостью. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2008. – № 4. – С. 70–75
7. Разин А.В., Собисевич А.Л. Геоакустика слоистых сред. М.: ИФЗ РАН, 2012. – 210 с.
8. Тиратурян А.Н. Обратный расчет модулей упругости элементов слоистых сред на основе анализа динамического деформирования (на примере автомобильных дорог). // Дефектоскопия. – 2024. – № 8. – С. 52–61. DOI: 10.31857/S0130308224080059.
9. Тиратурян А.Н. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. – С. 56–65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06.
10. Aziz S.H.A., Taher M.N.M. Application of falling weight deflectometer (FWD) and synthetic fiber in the asphalt mixture: a review. // Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment. – 2021. – Vol. 2. No. 1. – pp. 305–314.
11. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V. Layered structures mechanical properties assessment by dynamic tests. // In: Proceedings MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. – 2017. – Vol. 117. – Art. No. 00018.
12. Goel A. Subsurface anomaly assessment in asphalt layers using Rayleigh waves dispersion characteristics: a test-pit study. // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2024. – pp. 1–21.
13. Gohil R.R., Kumar J., Parthasarathy C.R. Pavement testing using nondestructive MASW approach. // In: Proceedings of the Geo-Congress 2023. – 2023. – pp. 163–172.
14. Gohil R.R., Samu V., Kumar J. Non-destructive evaluation of rigid pavements using surface wave tests. // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 442. – Art. No. 137651.
15. Madun A., Kamaruddin N.H.M., Remmani S.A. Numerical seismic approach for pavement investigation. // International Journal of Scientific and Technology Research. – 2020. – Vol. 9. Issue 4. – pp. 1894–1900.
16. Makwana P. Assessment of flexible pavement using the falling weight deflectometer: a comprehensive review. // Method. – 2023. – Vol. 31. No. 32. – pp. 33.
17. Nazarian S., Baker M., Crain K. Use of seismic pavement analyzer in pavement evaluation. // Transportation Research Record. – 1995. – pp. 1–8.
18. Pandya H.I., Ali A.A., Mehta Y.A. Enhancing falling weight deflectometer (FWD) testing: comprehensive review and development of robust procedure in the United States. // Journal of Testing and Evaluation. – 2024. – Vol. 52. No. 4. – pp. 2039–2054.
19. Qiao M., Wang X., Hou R. Case study: Validation of the spectral-analysis-of-surface-waves method for concrete pavement condition evaluation. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. No. 20. – Art. No. 11410.
20. Wang H., Xie P., Ji R. Backcalculation of airfield pavement layer moduli under HWD testing. // In: Proceedings of 6th APT Conference accelerated pavement testing to transport infrastructure innovation. – 2020. – pp. 666–675.
21. Wu H., Wang S., Abdallah I., Nazarian S. A rapid approach to interpretation of SASW results. // Bearing capacity of roads. – 2022. – Vol. 1. – pp. 761–770.
22. Yin H. Simulation of flexible pavement response to FWD loads: A mechanistic approach. // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2012. – Vol. 5. No. 4. – pp. 257.
23. Ziyadi M., Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. // Road Materials and Pavement Design. – 2023. – Vol. 24. No. 3. – pp. 609–630.

References

1. Babeshko V.A., Glushkov E.V., Zinchenko Zh.F. Dynamics of inhomogeneous linear-elastic half-space. Moscow. Nauka. 1989. 344 p. (In Russ.)
2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Uafa S.B., Lozovoy V.V., Evdokiomv V.S. On the earthquake precursor in the seismically dangerous mountainous area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 33–44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003. (In Russ.)
3. Volkova E.A., Lyapin A.A., Seleznev M.G., Uglova E.V. About the solution of inverse problems of construction mechanics on the basis of data of full-scale experiment. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2011. No. 2(626). pp. 65–71. (In Russ.)
4. Vorovich I.I., Babeshko V.A., Pryakhina O.D. Dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable half-space. Moscow. Nauchnyi Mir. 1999. 246 p. (In Russ.)
5. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Uglova E.V. Dynamics of road structures. Rostov-on-Don. RSBU. 2002. 258 p. (In Russ.)
6. Lyapin A.A., Seleznev M.G., Seleznev N.M. Dynamic contact problem for a three-layer half-space with a cylindrical cavity. *Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2008. No. 4. pp. 70–75. (In Russ.)
7. Razin A.V., Sobisevich A.L. Geoacoustics of layered half-space. Moscow. IPE RAS. 2012. 210 p. (In Russ.)
8. Tiraturyan A. N. Inverse calculation of the elasticity moduli of the layered half-space elements on the basis of the dynamic deformation analysis (by the example of highways). *Defectoscopy*. 2024. No. 8. pp. 52–61. DOI: 10.31857/S0130308224080059. (In Russ.)
9. Tiraturyan A.N. Perfection of non-destructive method for determining the mechanical characteristics of elements of multilayer structures on the example of road pavements. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2023. No. 1. pp. 56–65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06. (In Russ.)
10. Aziz S.H.A., Taher M.N.M. Application of falling weight deflectometer (FWD) and synthetic fiber in the asphalt mixture: a review. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*. 2021. Vol. 2. No. 1. pp. 305–314.
11. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V. Layered structures mechanical properties assessment by dynamic tests. In: *Proceedings MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2017. Vol. 117. Art No. 00018.
12. Goel A. Subsurface anomaly assessment in asphalt layers using Rayleigh waves dispersion characteristics: a test-pit study. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2024. pp. 1–21.
13. Gohil R.R., Kumar J., Parthasarathy C.R. Pavement testing using nondestructive MASW approach. In: *Proceedings of the Geo-Congress 2023*. 2023. pp. 163–172.
14. Gohil R.R., Samu V., Kumar J. Non-destructive evaluation of rigid pavements using surface wave tests. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 442. Art. No. 137651.
15. Madun A., Kamaruddin N.H.M., Remmani S.A. Numerical seismic approach for pavement investigation. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2020. Vol. 9. Issue 4. pp. 1894–1900.
16. Makwana P. Assessment of flexible pavement using the falling weight deflectometer: a comprehensive review. *Method*. 2023. Vol. 31. No. 32. pp. 33.
17. Nazarian S., Baker M., Crain K. Use of seismic pavement analyzer in pavement evaluation. *Transportation Research Record*. 1995. pp. 1–8.
18. Pandya H.I., Ali A.A., Mehta Y.A. Enhancing falling weight deflectometer (FWD) testing: comprehensive review and development of robust procedure in the United States. *Journal of Testing and Evaluation*. 2024. Vol. 52. No. 4. pp. 2039–2054.
19. Qiao M., Wang X., Hou R. Case study: Validation of the spectral-analysis-of-surface-waves method for concrete pavement condition evaluation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 20. Art. No. 11410.

20. Wang H., Xie P., Ji R. Backcalculation of airfield pavement layer moduli under HWD testing. *Proceedings of 6th APT Conference accelerated pavement testing to transport infrastructure innovation*. 2020. pp. 666–675.
21. Wu H., Wang S., Abdallah I., Nazarian S. A rapid approach to interpretation of SASW results. *Bearing capacity of roads*. 2022. Vol. 1. pp. 761–770.
22. Yin H. Simulation of flexible pavement response to FWD loads: A mechanistic approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2012. Vol. 5. No. 4. pp. 257.
23. Ziyadi M., Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. *Road Materials and Pavement Design*. 2023. Vol. 24. No. 3. pp. 609–630.

УДК 553.411.071:553.048(470.64)

DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012

Оригинальная статья

Геолого-экономическая оценка золотоносных руд черносланцевого типа на примере Малка-Муштинского рудного узла (Кабардино-Балкарская республика)

С.Г. Парада 

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

Статья поступила: 09.10.2024, доработана: 31.10.2024, принята к публикации: 02.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Выявленные в последние годы на Северном Кавказе золотоносные руды черносланцевого типа характеризуются в большинстве случаев очень низкими содержаниями золота (менее 1,0 г/т). В связи с этим возникает актуальная задача оценки возможности вовлечения таких руд в разработку. **Материал и методы.** Материалом для настоящего исследования послужили результаты выполненных в 2007–2009 гг. ООО «Каббалкгеология» поисковых работ в пределах Малка-Муштинского рудного узла. Также использованы результаты геолого-экономического моделирования, полученные специалистами Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института (ЦНИГРИ) для Учкуланского и Безенгийского золоторудных полей Северного Кавказа. При проведении исследования использованы стандартные методы геолого-экономической оценки месторождений и геолого-экономического моделирования. **Результаты исследования.** Разработана геолого-экономическая модель золотого оруденения черносланцевого типа на примере Малка-Муштинского рудного узла Кабардино-Балкарской республики. Основными элементами этой модели являются геолого-структурные условия локализации и геолого-промышленный тип оруденения, масштабы проявления оруденения и морфология рудных тел, минеральный состав руд, минимальное среднее содержание золота в рудах, количество прогнозных ресурсов. Путем сопоставления ее с геолого-экономической моделью более изученного Учкуланского золоторудного поля (КЧР), установлена их принципиальная схожесть. Наиболее существенное влияние на величину браковочных кондиций оказывают расчетная цена единицы товарной продукции (в нашем случае 1 г золота) и ожидаемая себестоимость добычи и переработки 1 т руды. Последний параметр в части издержек производства имеет тесную корреляционную связь с годовой производительностью горно-обогатительного предприятия и, косвенно, — с запасами руды. Показано, что в настоящее время отработка таких руд экономически не целесообразна. Вместе с тем, результаты интерполяции вероятного изменения технико-экономических показателей при росте цены на золото указывают на возможность отработки таких руд в будущем методом кучного выщелачивания за счет снижения порога рентабельности при содержаниях золота менее 1 г/т.

Ключевые слова: геолого-экономическая модель, интерполяция, золото, руда, запасы, черносланцевая формация, кучное выщелачивание, браковочные кондиции, себестоимость, рентабельность.

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

Для цитирования: Парада С.Г. Геолого-экономическая оценка золотоносных руд черносланцевого типа на примере Малка-Муштинского рудного узла (Кабардино-Балкарская республика). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 142-151. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012

DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012

Original paper

Geological and economic assessment of gold-bearing ores of the black shale type on the example of the Malka-Mushtinsky ore node (Kabardino-Balkarian republic)

S.G. Parada 

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

Received: 09.10.2024, revised: 31.10.2024, accepted: 02.11.2024

Abstract: Relevance. The gold-bearing ores of the black shale type identified in recent years in the North Caucasus are characterized in most cases by very low gold contents (less than 1.0 g/t). In this regard, there is an urgent need to assess the possibility of involving such ores in development. **Material and methods.** The material for this study was the results of prospecting work performed in 2007–2009 by Kabbalkgeologiya LLC within the Malka-Mushtinsky ore node. The results of geological and economic modeling obtained by specialists of the Central Research Geological Exploration Institute (TsNIGRI) for the Uchkulan and Bezengi gold fields of the North Caucasus were also used. During the study, standard methods of geological and economic assessment of deposits and geological and economic modeling were used. **The results of the study.** A geological and economic model of gold mineralization of the black shale type has been developed on the example of the Malka-Mushta ore basin of the Kabardino-Balkarian Republic. The main elements of this model are the geological and structural conditions of localization and the geological and industrial type of mineralization, the scale of mineralization and morphology of ore bodies, the mineral composition of ores, the minimum average gold content in ores, and the amount of forecast resources. By comparing it with the geological and economic model of the more studied Uchkulansky gold ore field (Karachai-Cherkess Republic), their fundamental similarity is established. The most significant influence on the value of defective conditions is exerted by the estimated unit price of commercial products (in our case, 1 g of gold) and the expected cost of extraction and processing of 1 ton of ore. The last parameter in terms of production costs has a close correlation with the annual productivity of the mining and processing enterprise and, indirectly, with ore reserves. It is shown that currently the mining of such ores is not economically feasible. At the same time, the results of interpolation of the likely change in technical and economic indicators with an increase in the price of gold indicate the possibility of mining such ores in the future by heap leaching due to a decrease in the profitability threshold at gold contents of less than 1 g/t.

Keywords: geological and economic model, interpolation, gold, ore, reserves, black shale formation, heap leaching, rejection conditions, cost, profitability.

Acknowledgements: The article was prepared as part of the state assignment for scientific research work of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Parada S.G. Geological and economic assessment of gold-bearing ores of the black shale type on the example of the Malka-Mushtinsky ore node (Kabardino-Balkarian republic). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 142–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012

Введение

В последние годы все чаще появляются публикации о новом для Северного Кавказа типе руд золота, связанном с черносланцевыми толщами. При этом в качестве руды рассматриваются минерализованные в различной степени черносланцевые породы, содержащие золотоносную минерализацию сульфидно-вкрапленного или кварцево-жилльно-прожилкового типа [Богущ и др., 2017; Курбанов и др., 1994; Курбанов и др., 2011; Парада, 2022; Парада, 2024 и др.]. В других работах рассматриваются сами черносланцевые толщи предположительно как новый тип руд благородных металлов на основании отдельных определений повышенных содержаний золота в них [Гончаров и др., 2007; Gurbanov et al., 2019; Гурбанов и др., 2023; Черкашин и др., 2022 и др.].

Содержания золота в первом и втором случае чрезвычайно низкие: от сотых до десятых долей г/т, в то время как в известных месторождениях черносланцевого типа средние содержания золота не менее 2 г/т (Сухой лог, Олимпиадинское, Дегдекан и др.). При этом считается, что извлечение золота из углеродсодержащих руд сопряжено с определенными трудностями. Возникающие трудности с извлечением золота из углеродистых руд преодолены еще в 80-е годы прошлого столетия путем создания сорбционных технологий, учитывающих наличие углеродистого вещества [Hausen, Bucknam, 1984; Dunn et al., 1989; Mossman, 1999], а также с применением биотехнологий [Karthikeyan et al., 2015]. В России также довольно успешно разрабатываются собственные технологии переработки руд и извлечения золота [Александрова и др., 2015; Санакулов и др., 2016; Гурман и др., 2017 и др.], наиболее рентабельной из которых является технология кучного выщелачивания [Михайлов и др., 2014].

Какие бы совершенные технологии не разрабатывались, их можно применять лишь тогда, когда это экономически целесообразно. Для предварительной оценки целесообразности дальнейшего изучения рудоносных объектов применяется геолого-экономическое моделирование [Быбочкин, 1990]. Однако, существующие модели применимы к объёмным объектам со средними содержаниями золота в рудной массе 2–4 г/т на мощность порядка 10 м. Автор настоящей статьи попытался интерполировать результаты одной из таких моделей для рудоносных черносланцевых зон и залежей на примере Малка-Муштинского рудного узла (ММРУ).

Материал и методы

Материалом для настоящего исследования послужили результаты выполненных в 2007–2009 гг. ООО «Каббалкгеология» поисковых работ в пределах ММРУ и изложенные в публикациях [Шишкалов, 2017; Парада, 2022 и др.]. Также использованы результаты геолого-экономического моделирования, полученные специалистами Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института (ЦНИГРИ) для Учкуланского и Безенгийского золоторудных полей Северного Кавказа. Методы, использованные для геолого-экономической оценки оруденения, изложены в работах [Прогнозирование ..., 1989; Быбочкин, 1990 и др.].

Результаты и обсуждение

ММРУ располагается в Бечасынской структурно-формационной зоне [Потапенко, 1991] и сложен метаморфическими толщами протерозоя, северо-восточной частью позднепалеозойского малкинского гранитного массива и позднепротеро-

зойскими продуктами конседиментационного магматизма хасаутского габбро-диабазового комплекса (рис. 1). В пределах ММРУ выявлены крупнообъемные зоны и залежи сульфидно-вкрапленной и кварцево-жильно-прожилковой золотоносной минерализации, подробно охарактеризованной в [Парада, 2022]. Истинные мощности зон и залежей в опробованных бороздах и керновыми пробами сечениях достигают 50 м, их протяженность по падению (восстанию), прослеженная в естественных обнажениях, горных выработках и буровых скважинах достигает 600 м. Распределение золота в рудной массе оценивается как равномерное. Такие рудоносные зоны и залежи по параметрам объема рудных тел приближаются к параметрам модели крупнообъемных месторождений с относительно низкими содержаниями золота в рудной массе, пригодных для открытого способа разработки с применением технологии кучного выщелачивания. Тем не менее, выявленные в них средние содержания золота не превышают 1,0 г/т при бортовом содержании 0,5 г/т.

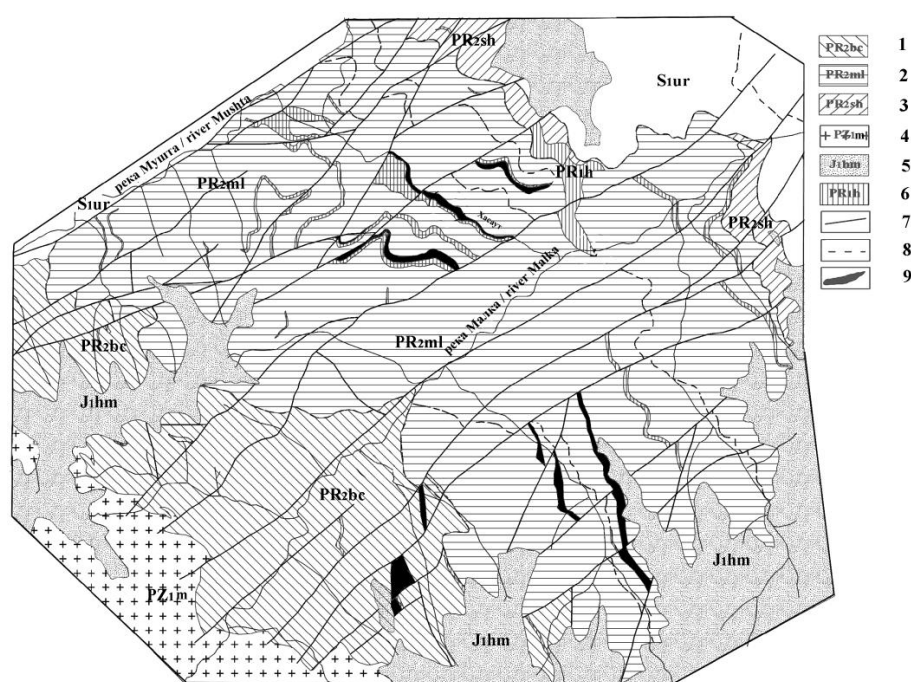


Рис. 1. Положение рудных зон и залежей в структуре Малка-Муштинского рудного узла:

1–3 – протерозойские отложения: 1 – бечасынская свита; 2 – малкинская свита; 3 – шиджатмазская свита; 4 – малкинские позднепалеозойские граниты; 5 – юрские песчаники; 6 – позднепротерозойские интрузии хасаутского диорит-диабазового комплекса; 7 – разрывные нарушения прослеженные; 8 – разрывные нарушения предполагаемые; 9 – рудные зоны и залежи /

Fig. 1. The position of ore zones and deposits in the structure of the Malka-Mushta ore basin:

1-3 – Proterozoic deposits: 1 – Bechasyn formation; 2 – Malkin formation; 3 – Shijatmaz formation; 4 – Malkin Late Paleozoic granites; 5 – Jurassic sandstones; 6 – Late Proterozoic intrusions Khasaut diorite-diorite complex; 7 – traced discontinuous faults; 8 – suspected discontinuous faults; 9 – ore zones and deposits

Далее приводится попытка оценить, могут ли такие содержания в охарактеризованных выше условиях быть рентабельными при открытом способе разработки и использовании технологий кучного выщелачивания (КВ) в геолого-экономических условиях Северного Кавказа.

Для условий Северного Кавказа район с высотными отметками в пределах ММРУ 1200–1900 м является доступным. Через всю территорию рудного узла про-

ходит улучшенная грунтовая дорога, связывающая близлежащие села (Кичмалка, Хабаз, Каменостское) с отгонными пастбищами в районе г. Эльбрус. Ближайшей железнодорожной станцией является г. Кисловодск, расположенный в 40 км от ММРУ. Рельеф позволяет вести открытые горные работы.

Специальные геолого-экономические расчеты для подобных руд, но с более высокими содержаниями золота (2,0 г/т), проведены специалистами ЦНИГРИ для Учкуланского и Безенгийского золоторудных полей Северного Кавказа (табл. 1).

Таблица 1/ Table 1

**Браковочные кондиции для месторождений золота Северного-Кавказа /
Rejection conditions for gold deposits in the North Caucasus region**

Параметры / parameters	Учкуланское месторождение / Uchkulanskoye deposit		Безенгийское месторождение / Bezengiyskoye deposit
Прогнозные ресурсы руды (млн т) / estimated ore resources (million t)	40	40	8,4
Прогнозные ресурсы золота (т) / Forecast gold resources (t)	80	80	38
Годовая производительность, (тыс. т руды) / Annual productivity, (thousand t. of ore)	2500	2500	600
Способ разработки / The development method	Открытый / an open	Открытый / an open	Подземный / Underground
Схема освоения / The scheme of development	Автономный ГОК, ЗИФ / Autonomous GOK, ZIF	Автономный ГОК, КВ / Autonomous GOK, KV	Автономный ГОК, ЗИФ / Autonomous GOK, ZIF
Минимальное среднее содержание Au по месторождению / Minimum average Au content for the deposit	1,97 г/т / g/t	1,61 г/т / g/t	3,01 г/т / g/t

Примечание: ГОК – горно-обогатительный комбинат, ЗИФ – золотоизвлекательная фабрика;
КВ – кучное выщелачивание /

Note: GOK – mining and processing plant, ZIF – gold extraction plant; KV – heap leaching

Безенгийское рудное поле следует исключить из рассмотрения в качестве геолого-экономического аналога орудению ММРУ, так как оно, хотя и локализовано в черносланцевых породах, является типичным представителем другого золото-серебряного формационного типа с весьма сложным минеральным составом руд. Учкуланское рудное поле (УРП), расположенное в Теберда-Кубанском рудном районе среднепалеозойской минерагенической зоны Передового хребта (Карачаево-Черкесская республика), имеет с ММРУ много общих черт (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Сравнительная характеристика основных обобщенных геолого-экономических показателей (ГЭП) золотого оруденения УРП и ММРУ / Comparative characteristics of the main generalized geological and economic indicators (GEO) of the URP and MMRU gold mineralization

ГЭП / GAP	УРП (по данным ЦНИГРИ) / URP (according to TSNIGRI)	ММРУ (по данным автора) / MM RU (according to the author)
Рудоносная формация / Ore-bearing formation	Базальтоидная / Basaltoid	Черносланцевая / Chernoslantsevaya
Рудовмещающие породы / Ore-bearing rocks	Вулканогенные породы базальт-риолитовой формации / Volcanogenic rocks of the basalt-rhyolite formation	Углеродистые сланцы малкинской свиты / Carbonaceous shales of the Malkin formation
Рудоконтролирующие структуры / Mining control structures	Крутые и пологие зоны расщеливания / Steep and gentle areas of dancing	Крутые и пологие зоны смятия / Steep and gentle crumpling zones
Морфология рудных тел / Morphology of ore bodies	Пластообразные залежи, крутопадающие зоны / Formation-like deposits, steeply falling zones	Пластообразные залежи, крутопадающие зоны / Formation-like deposits, steeply falling zones
Минерально-морфологический тип руд / Mineral and morphological type of ores	Малосульфидный прожилково-вкрапленный, частично со свободным золотом / Low-sulfide veined-interspersed, partially with free gold	Малосульфидный прожилково-вкрапленный, частично со свободным золотом / Low-sulfide veined-interspersed, partially with free gold
Главные рудные минералы / The main ore minerals	Золото, пирит, арсенопирит, халькопирит, сфалерит / Gold, pyrite, arsenopyrite, chalcopyrite, sphalerite	Золото, пирит, халькопирит, галенит, сфалерит / Gold, pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite
Среднее содержание Au / Average Au Content	2 г/т / 2 g/t	0,7 – 1 г/т / 0,7 – 1,0 g/t
Ожидаемые запасы золота, руды / Expected reserves of gold, ore	80 (100) т золота, 40 млн т руды / 80 (100) tons of gold, 40 million tons of ore	80 т золота, 90 млн т руды / 80 tons of gold, 90 million tons of ore
Способ отработки, абсолютные отметки рельефа / The method of working out (the absolute relief marks)	Карьер, среднегорный (1600 м) / Quarry, medium mountain (1600 m)	Карьер, среднегорный (1900 м) / Quarry, medium mountain (1900 m)
Технология переработки руды / Ore processing technology	Кучное выщелачивание / Heap leaching	Кучное выщелачивание / Heap leaching
Инфраструктура / Infrastructure	Относительно развитая, охраняемые природные объекты отсутствуют / Relatively developed, there are no protected natural sites	Относительно развитая, охраняемые природные объекты отсутствуют / Relatively developed, there are no protected natural sites

Сходство, физико-географические условия, а также практически одинаковые прогнозные ресурсы, позволяют оценить возможность применения для оруденения

ММРУ браковочных кондиций, рассчитанных для руд Учкулана. Приведенные в таблице 2 практически все основные геолого-экономические показатели двух сравниваемых объектов совпадают.

Самым главным и принципиальным несовпадением является среднее содержание золота в рудах, которое для ММРУ в два раза ниже, чем для Учкуланского объекта и составляет менее 1 г/т против 2 г/т, соответственно.

Тем не менее, расчеты показывают, что предельно минимальное среднее содержание золота в рудах УРП при прочих равных условиях определяется технологией извлечения [Беневольский и др., 2015]. Применение технологии кучного выщелачивания позволяет понизить его с 1,97 г/т (при обычной золотоизвлекательной технологии) до 1,61 г/т (см. табл. 1). Однако средние содержания Au в рудах изучаемого ММРУ ниже даже такого минимального значения.

Для адаптации расчетных значений браковочных кондиций к конкретным условиям была определена чувствительность браковочных кондиций к изменению технико-экономических показателей (рис. 2).

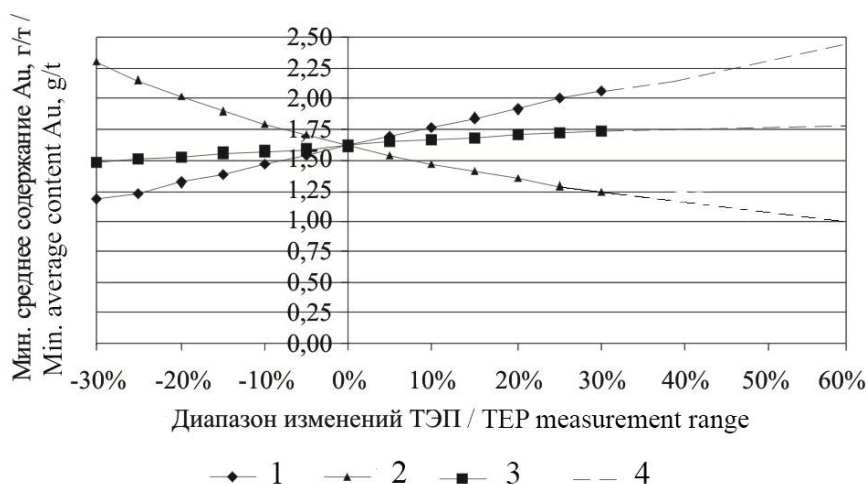


Рис. 2. Зависимость браковочных кондиций от изменения технико-экономических показателей (ТЭП) для золотого оруденения Учкуланского рудного поля при применении технологии кучного выщелачивания: 1 – себестоимость 1 т руды, 2 – цена единицы товарной продукции, 3 – инвестиции в строительство ГОКа, 4 – интерполяция возможного изменения ТЭП при росте цены на золото до 60 % /

Fig. 2. Dependence of rejection conditions on changes in technical and economic indicators (TEP) for gold mineralization of the Uchkulansky ore field when using heap leaching technology: 1 – cost of 1 ton of ore, 2 – unit price of commercial products, 3 – investments in the construction of GOK, 4 – interpolation of a possible change in TEP when the increase in the price of gold to 60 %

Как следует из приведенных лучевых диаграмм, наиболее существенное влияние на величину браковочных кондиций оказывают расчетная цена единицы товарной продукции (в нашем случае 1 г золота) и ожидаемая себестоимость добычи и переработки 1 т руды.

Последний параметр в части издержек производства имеет тесную корреляционную связь с годовой производительностью горно-обогатительного предприятия и, косвенно, – с запасами руды. Поэтому в сравниваемых моделях он остается одинаковым. А вот расчетная цена 1 г золота со времени проведенных расчетов по Учкуланскому объекту заметно изменилась. Тогда была использована средняя расчетная цена золота по состоянию на начало 2015 года, которая с учетом данных LBMA и LME составляла 39,3 \$/г. Нулевая линия ТЭП на рис. 2 соответствует

этой цене. По тем же данным по состоянию на начало 2023 г. средняя цена золота составила уже 58,4 \$US/г, что на 56,5 % выше. Такое возрастание цены, согласно интерполяции, снижает среднее содержание золота в браковочных кондициях как УРП, так ММРУ до 1,0–0,8 г/т. Однако заметно быстрее возрастает себестоимость добычи и переработки руды, что приводит к выполаживанию прогнозируемой линии тренда в сторону уменьшения содержания золота в руде. Если рост цен на золото продолжится более высокими темпами, то золотые руды ММРУ со средним содержанием золота около 1,0 г/т могут стать рентабельными для отработки с применением технологии кучного выщелачивания.

Заключение

Активно обсуждаемые в последние годы возможности вовлечения в разработку нового типа золотоносных руд черносланцевой формации на Северном Кавказе ограничиваются крайне низкими содержаниями золота (менее 1,0 г/т) и трудностями его извлечения. Геолого-экономическое моделирование, выполненное для таких руд на примере хорошо изученных минерализаций Малка-Муштинского рудного узла, показало отсутствие экономической целесообразности отработки таких руд. Вместе с тем, результаты интерполяции вероятного изменения технико-экономических показателей при росте цены на золото указывают на возможность отработки таких руд в будущем за счет снижения порога рентабельности при содержаниях золота менее 1 г/т.

Литература

1. Александрова Т.Н., Цыплаков В.Н., Ромашев О.А., Семенихин Д.Н. Удаление сорбционно-активных углеродистых веществ из упорных золотосульфидных руд и концентратов месторождения Майское. // Обогащение руд. – 2015. – № 4. – С. 3–7.
2. Беневольский Б.И., Михайлов Б.К., Иванов А.И., Вартанян С.С. Проблемы минерально-сырьевой базы золота России. // Руды и металлы. – 2015. – № 1. – С. 93–99.
3. Богуш И.А., Бурцев А.А., Рябов Г.В. Минералы благородных металлов и их источники на Северном Кавказе. // Наука Юга России. – 2017. – Т. 13. № 2. – С. 34–40. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-34-40.
4. Быбочкин А.М. Комплексная геолого-экономическая оценка рудных месторождений. – М.: Недра, 1990. – 267 с.
5. Гончаров В.И., Богуш И.А., Бурцев А.А., Васьков И.М. Поисковые критерии и перспективы благородных металлов девонских черносланцевых толщ на Северном Кавказе. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2007. – Т. 7. № 3. – С. 19–24.
6. Гурбанов А.Г., Кусраев А.Г., Докучаев А.Я., Газеев В.М., Лексин А.Б., Гурбанова О.А. Перспективы обнаружения благороднометалльного оруденения на территории республики Южная Осетия. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2023. – Т. 23. № 2. – С. 54–70. DOI: 10.46698/VNC.2023.94.26.001.
7. Гурман М.А., Щербак Л.И., Александрова Т.Н. Флотационное обогащение бедной золото- и углеродсодержащей руды. // Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 70–74.
8. Курбанов Н.К., Арифуров Ч.Х., Кучеровский П.Г., Романов В.И., Кукшев В.И., Вишневская Н.А., Зверева Е.А. Геолого-генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах. // Руды и металлы. – 1994. – № 2. – С. 55–69.
9. Курбанов М.М., Богуш И.А., Бурцев А.А. Геохимические особенности золотонесущего сульфидного оруденения семейства черносланцевых фомаций в горном Дагестане. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 5 (163). – С. 106–109.

10. Михайлов Б.К., Седельникова Г.В., Беневольский Б.И., Романчук А.И. Инновационные технологии переработки упорных и бедных руд золота как основа рационального недропользования. // Руды и металлы. – 2014. – № 1. – С. 5–8.
11. Парада С.Г. Потенциально золотоносные минерализации в углеродистых породах Малка-Муштинского рудного узла (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 129–141. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.17.010.
12. Парада С.Г. Золотоносные и потенциально золотоносные минерализации в черносланцевой толще Арсикомского рудного поля (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 131–142. DOI: 10.46698/VNC.2024.57.92.010.
13. Потапенко Ю.Я. Бечасынская зона. Бечасынский метаморфический комплекс. / Петрология метаморфических комплексов Большого Кавказа. М.: Наука, 1991. – С. 9–18.
14. Прогнозирование и поиски месторождений золота. / Под редакцией Н.К. Курбанов, В.А. Нарсеев. М.: ЦНИГРИ, 1989. – 236 с.
15. Санакулов К.С., Мустакимов О.М., Эргашев У.А., Ахатов Н.А. О целесообразности применения комбинированных технологий для переработки особо упорных золотосульфидных руд. // Цветные металлы. – 2016. – № 2. – С. 9–14.
16. Черкашин В.И., Богуш И.А., Рябов Г.В., Исаева Н.А. Металлогеническая модель благородных металлов фанерозоя Северного Кавказа. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2022. – Т.91. № 4. – С. 4–9.
17. Шишкалов И.Ю. Условия локализации и генезис золотоносных минерализаций Малка-Муштинского рудного узла (Северный Кавказ). // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий. – 2017. – № 5. – С. 193–200.
18. Dunn J.G., Graham J., Linge H.G. The treatment of refractory gold ore. // Chemistry in Australia. – 1989. – Vol. 56. – pp. 401–404.
19. Gurbanov A.G., Bogatkov O.A., Leksin A.B., Gazeev V.M., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Ilaev V.E. First data on variations in the contents of macro- and microelements and precious metals in vertical sections in industrial wastes of the Fiagdon tailing dump (Republic of North Ossetia–Alania). // Doklady Earth Sciences. – 2019. – Vol. 487. No. 1. – pp. 782–785. DOI: 10.1134/S1028334X1907002X.
20. Hausen D.M., Bucknam C.H. Study of preg robbing in the cyanidation of carbonaceous gold ores from Carlin, Nevada. // Applied Mineralogy. – 1984. – pp. 833–856.
21. Karthikeyan O.P., Rajasekar A., Balasubramanian R. Bio-oxidation and biocyanidation of refractory mineral ores for gold extraction: a review. // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2015. – Vol. 45. No. 15. – pp. 1611–1643.
22. Mossman D.J. Carbonaceous substances in mineral deposits: implications for geochemical exploration. // Journal of Geochemical Exploration. – 1999. – Vol. 66. No. 1–2. – pp. 241–247.

References

1. Aleksandrova T.N., Tsiplakov V.N., Romashev A.O., Semenikhin D.N. Removal of sorption-active carboniferous components from difficultly-treated gold sulfide ores and concentrates of the Mayskoye deposit. *Obogashchenie Rud*. 2015. No. 4. pp. 3–7. (In Russ.)
2. Benevolsky B.I., Mikhailov B.K., Ivanov A.I., Vartanyan S.S. Problems of the mineral resource base of gold in Russia. *Ores and Metals*. 2015. No. 1. pp. 93–99. (In Russ.)
3. Bogush I.A., Burtsev A.A., Ryabov G.V. Minerals and sources of precious metals in the North Caucasus. *Science in the South of Russia*. 2017. Vol. 13 No. 2. pp. 34–40. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-34-40. (In Russ.)
4. Bybochkin A.M. Integrated geological and economic assessment of ore deposits. Moscow. Nedra. 1990. 267 p. (In Russ.)
5. Goncharov V.I., Bogush I.A., Burtsev A.A., Vaskov I.M. Search criteria and prospects for noble metals of the Devonian black shale strata in the North Caucasus. *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2007. Vol. 7. No. 3. pp. 19–24. (In Russ.)

6. Gurbanov A.G., Kusraev A.G., Dokuchaev A.Y., Gazeev V.M., Leksin A.B., Gurbanova O.A. Prospects for discovering noble metal mineralization on the territory of the Republic of South Ossetia. *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2023. Vol. 23. No. 2. pp. 54–70. DOI: 10.46698/VNC.2023.94.26.001. (In Russ.)
7. Gurman M.A., Scherbak L.I., Aleksandrova T.N. Flotation enrichment of poor gold- and carbon-containing ore. *Mining Journal*. 2017. No. 2. pp. 70–74. (In Russ.)
8. Kurbanov N.K., Arifulov Ch.H., Kucherevski P.G., Romanov V.I., Kukshev V.I., Vishnevskaya N.A., Zvereva E.A. Geological-genetic models of gold deposits in carbonaceous terrigenous complexes. *Ores and Metals*. 1994. No. 2. pp. 55–69. (In Russ.)
9. Kurbanov M.M., Bogush I.A., Burtsev A.A. Geochemical features of gold-bearing sulfide mineralization of the family of black shale formations in mountainous Dagestan. In: *Proceedings of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science*. 2011. No. 5(163). pp. 106–109. (In Russ.)
10. Mikhailov B.K., Sedelnikova G.V., Benevolsky B.I., Romanchuk A.I. Innovation technologies of gold refractory and low grade ores processing as basis of rational mineral resources using. *Ores and Metals*. 2014. No. 1. pp. 5–8. (In Russ.)
11. Parada S.G. Potentially gold-bearing mineralizations in carbonaceous rocks of the Malka-Mushta Ore node (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 129–141. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.17.010. (In Russ.)
12. Parada S.G. Gold-bearing and potentially gold-bearing mineralizations in the Black Shale thickness of the Arsikom ore field (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 131–142. DOI: 10.46698/VNC.2024.57.92.010. (In Russ.)
13. Potapenko Yu.Ya. Bechasyn zone. Bechasy metamorphic complex. In: *Petrology of metamorphic complexes of the Greater Caucasus*. Moscow. Nauka. 1991. pp. 9–18. (In Russ.)
14. Forecasting and prospecting of gold deposits. Eds. N.K. Kurbanov, V.A. Narseev. Moscow. TsNIGRI. 1989. 236 p. (In Russ.)
15. Sanakulov K.S., Mustakimov O.M., Ergashev U.A., Akhatov N.A. On the feasibility of combined technologies for the processing of very refractory gold-sulfide ores. *Non-Ferrous Metals*. 2016. No. 2. pp. 9–14. (In Russ.)
16. Cherkashin V.I., Bogush I.A., Ryabov G.V., Isaeva N.A. Metallogenic model of Phanerozoic noble metals of the Northern Caucasus. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022. Vol. 91. No. 4. pp. 4–9. (In Russ.)
17. Shishkalov I.Yu. Localization conditions and genesis of gold-bearing mineralizations of the Malka-Mushta ore cluster (North Caucasus). *Geology, geoecology and resource potential of the Urals and adjacent territories*. 2017. No. 5. pp. 193–200. (In Russ.)
18. Dunn J.G., Graham J., Linge H.G. The treatment of refractory gold ore. *Chemistry in Australia*. 1989. Vol. 56. pp. 401–404.
19. Gurbanov A.G., Bogatkov O.A., Leksin A.B., Gazeev V.M., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Ilaev V.E. First data on variations in the contents of macro- and microelements and precious metals in vertical sections in industrial wastes of the Fiagdon tailing dump (Republic of North Ossetia–Alania). *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 487. No. 1. pp. 782–785. DOI: 10.1134/S1028334X1907002X.
20. Hausen D.M., Bucknam C.H. Study of preg-robbing in the cyanidation of carbonaceous gold ores from Carlin, Nevada. *Applied Mineralogy*. 1984. pp. 833–856.
21. Karthikeyan O.P., Rajasekar A., Balasubramanian R. Bio-oxidation and biocyanidation of refractory mineral ores for gold extraction: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 45. No. 15. pp. 1611–1643.
22. Mossman D.J. Carbonaceous substances in mineral deposits: implications for geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*. 1999. Vol. 66. No. 1–2. pp. 241–247.

УДК 622.691.2

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

Оригинальная статья

Геологические и технико-экономические аспекты проектирования подземных хранилищ газа в пластах-коллекторах

Р.А. Гасумов¹, Э.Р. Гасумов², В.М. Валиев², Ф. Мусаева²

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355000,
г. Ставрополь, ул. Ленина, 419, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru;

² Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ 1073, г. Баку,
пр. Г. Джавида, 25, e-mail: e.gasumov@gmail.com

Статья поступила: 23.09.2024, доработана: 02.11.2024, принята к публикации: 04.11.2024

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрены геологические и технико-экономические вопросы создания подземных хранилищ газа (ПХГ) в геологических структурах, с учётом новых требований к технологическому проектированию подземных резервуаров в пластах-коллекторах, обусловленных фактической неравномерностью их эксплуатации. В работе изучены геологические структуры, где созданы ПХГ, и установлено, что подавляющее большинство созданных объектов приурочено к складчатым ловушкам. Результаты изучения геологических и технико-экономических аспектов важно учитывать при проектировании ПХГ, а также для обеспечения герметичности объекта за счет правильного выбора в геологической структуре комплекса непроницаемых пород (покрышек над продуктивной толщей с наличием контрольного горизонта), позволяющих исключить вертикальную миграцию газа из пластов-коллекторов. **Целью исследований** является определение требований к выбору геологической структуры при технологическом проектировании ПХГ в пластах-коллекторах (в истощённых месторождениях), позволяющих обеспечить оптимальный вариант работы ПХГ при неравномерности потребления газа с использованием результатов анализа геологических и технико-экономических факторов. **Методы исследований** включали систематизацию информации и аналитические исследования с использованием промысловой и статистической информации, полученной из различных источников, в том числе из электронных ресурсов. **Объектом исследования** является геологическая, промысловая, геофизическая, гидродинамическая информация о строении пласта-коллектора, для выбора объекта хранилища в геологической структуре для технологического проектирования ПХГ. **Результаты.** На основании анализа и обобщения геологической, промысловой, геофизической, гидродинамической информации предложены требования к выбору геологической структуры при технологическом проектировании ПХГ в пластах-коллекторах, позволяющие регламентировать оптимальную и безопасную эксплуатацию залежи в многофункциональных условиях (значительные изменения объёмов отбора-закачки газа, продолжительность периода отбора в условиях неравномерности потребления). Расчёт по матрице вариантов с привлечением балансовой модели, предусматривающий разное соотношение объёмов активного и буферного газа, позволяет оптимизировать процесс выбора приемлемых вариантов проектирования режима работы подземного хранилища по пластовой части.

Ключевые слова: геология, пласт-коллектор, ПХГ, горизонт, месторождения, водоносный, разрез, скважина.

Для цитирования: Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Валиев В.М., Мусаева Ф. Геологические и технико-экономические аспекты проектирования подземных хранилищ газа в пластах-коллекторах. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14.(4): 152-165. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

Original paper

Geological and technical-economic issues of designing underground gas storage facilities in reservoir formations

R.A. Gasumov¹, E.R. Gasumov², V.M. Veliyev², F. Musayeva²

¹ North Caucasian Federal University, 419 Lenina Str., Stavropol 355000, Russian Federation, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru;

² Azerbaijan Technical University, 25 G. Javid Ave., Baku AZ 1073, Azerbaijan, e-mail: e.gasumov@gmail.com

Received: 23.09.2024, revised: 02.11.2024, accepted: 04.11.2024

Abstract: Relevance. The article considers geological and technical-economic issues of creating underground gas storage facilities (UGS) in geological structures, taking into account new requirements for the technological design of underground reservoirs in carrier beds, due to the actual unevenness of their operation. The main UGS are built in depleted gas, gas condensate and oil fields and in aquifers, as well as in a small number of rock salt deposits, and are classified into objects of simple and complex geological structure. **The paper studies** the geological structures where UGS have been created, and it was found that the overwhelming majority of created objects are confined to fold traps and brachyanticlines. The results of the geological information analysis showed that most reservoir beds are represented by terrigenous rocks. The results of the study of geological and technical and economic aspects are important to take into account when designing UGS facilities, as well as to ensure the tightness of the facility through the correct choice of a complex of impermeable rocks in the geological structure, allowing to exclude vertical migration of gas from the reservoir beds. **The aim** of the research is to determine the requirements for the choice of a geological structure in the technological design of UGS in reservoir beds, allowing to ensure the optimal option for UGS operation with uneven gas consumption using the results of the analysis of geological and technical and economic factors. **The research methods** included systematization of information and analytical studies using field and statistical information obtained from various sources, including electronic resources. **Results.** Based on the analysis and generalization of geological, field, geophysical, hydrodynamic information, the requirements are proposed for selecting a geological structure in the technological design of UGS in reservoirs, allowing to regulate optimal and safe operation of the deposit in multifunctional conditions. Calculation according to the matrix of options using the balance model, providing for different ratios of active and buffer gas volumes, allows to optimize the process of selecting acceptable options for designing the operating mode of an underground storage facility for the reservoir part.

Keywords: geology, reservoir, underground gas storage, horizon, depleted field, aquifer, section, well.

For citation: Gasumov R.A., Gasumov E.R., Veliyev V.M., Musayeva F. Geological and technical-economic issues of designing underground gas storage facilities in reservoir formations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 152-165. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

Введение

Технология создания подземного хранилища природного газа (ПХГ) в геологической структуре (ГС) – это выбор пласта-коллектора (П-К) с соответству-

ющими параметрами (наличие ловушки, хорошей фильтрации и коллекторских свойств, необходимой ёмкости – объёма залежи, отсутствие несплошностей), отвечающими требованиям создания подземного резервуара [Gasumov et al., 2020; Mu et al., 2019]. Одной из основных задач технологического проектирования (ТП) сооружения ПХГ является, выбор в качестве ёмкости (объём хранилища) порового пространства П-К преимущественно истощённых углеводородных (УВ) месторождений или водоносных структур. При создании ПХГ основными обязательными условиями являются наличие: ловушки П-К, непроницаемых перекрывающих пород (покрышки). Ловушки П-К по условиям их образования подразделяются на складчатые, разрывные, стратиграфические и литологические, комбинированные.

В последние годы для создания ПХГ также используется ГС, состоящая из отложений каменной соли. Важными условиями при создании ПХГ, в независимости от выбранной ГС, являются обеспечение герметичности подземного резервуара и недопущение возможного негативного воздействия на окружающую среду (в том числе выбросов метана), а также соблюдение требований экологической безопасности.

Геологическая составляющая при ТП ПХГ является определяющей при выборе объекта, но, также, необходимо учитывать экономические, технические, технологические, экологические и другие факторы [Гасумов, Гасумов, 2023; Пономарев, 2016; Uliasz-Misiak, Misiak, 2024]. Сооружение ПХГ по своим технико-экономическим показателям (ТЭП) существенно отличается от разработки месторождений УВ, так как, работает в циклическом режиме и сезонно проводится закачка с последующим отбором. В связи с этим геологические и экономические аспекты ТП ПХГ в П-К имеют важное значение, так как, способствуют созданию подземного резервуара и обеспечивают надёжность, долговечность и герметичность объекта. А решение этих задач при ТП ПХГ требует выполнения определённых условий при выборе П-К, для чего является важным проведение исследований подземных резервуаров, созданных в различных ГС и регионах России. Актуальным является изучение опыта эксплуатации подземных резервуаров, с учётом влияния различных внешних и внутренних факторов на бесперебойность работы при неравномерном отборе газа, при этом особый интерес представляют результаты анализа аспектов геологического и технико-экономического характера (ТЭХ), присущих эксплуатируемым и проектируемым ПХГ в РФ.

Методы исследования

При проведении исследований и изучении проблемы использовались геологические, промысловые и статистические данные, анализировались горно-геологические условия эксплуатируемых и проектируемых ПХГ.

Результаты работы и их обсуждение

ПХГ представляют собой комплекс инженерно-технических сооружений, созданных в ГС, в том числе в истощённых месторождениях УВ, имеющих необходимые «природные» ёмкости для закачки газа в пласты под давлением, превышающим пластовое, позволяющие ему оставаться в П-К в газообразном состоянии. Находящийся в П-К объём газа оценивается как активный (отбираемый из залежи

при эксплуатации), и буферный (не подлежащий отбору и необходимый для обеспечения стабильной работы ПХГ). Объёмы определяются исходя из геометрических, горно-геологических параметров залежи (ГС), ФЕС П-К, минимального и максимального давлений в ПХГ при эксплуатации, а также режима работы (в том числе закачек-отборов газа), и а ТП рассчитываются теоретическим путем.

Основным обязательным условием сооружения ПХГ (underground gas storage – UGS) является наличие резервуара (ловушки) с непроницаемыми крышками. ПХГ классифицируются на объекты простого и сложного геологического строения и, как известно, ловушки П-К по условиям их образования подразделяются на складчатые, разрывные, стратиграфические и литологические, комбинированные [Ermolaev et al., 2022; Шиповалов и др., 2022].

Проведённый анализ показывает, что подавляющее большинство созданных ПХГ на территории России приурочено к складчатым ловушкам. Уникальными являются объекты хранения, созданные в мелкосопочной структуре с моноклиальным подъёмом (Гатчинское ПХГ) и в протяжённом валлообразном поднятии, осложнённом пятью куполами (Невское ПХГ). Характеристики структурных ловушек, действующих ПХГ с указанием ФЕС П-К приведены в таблице 1. Как видно из таблицы по промысловым данным, П-К в большинстве действующих ПХГ на территории РФ являются терригенными и карбонатными [Шиповалов и др., 2022; Пономарев, 2016; Alani, Okechukwu, 2019; Fyk, Donsky, 2019] (рис. 1).



Рис. 1. Показатели пластов-коллекторов действующих подземных хранилищ газа /

Fig. 1. Reservoir performance of operating underground gas storage facilities

Таблица 1 / Table 1

Сведения об эксплуатируемых подземных хранилищах газа на территории России /
Information on underground gas storage facilities in operation in Russia

Объект / Object	Начало создания / Start of creation	Объём газа, м³ / Gas volume, m³		Буферный объём газа, м³ / Buffer volume of gas, m³		Производительность отбора, млн м³ / Selection capacity, million m³		Пластовое давление, МПа / Reservoir pressure, MPa		Количество скважин, шт / Number of wells, pieces	
		общий general	активный / active всего / отбираемый / total selected	общий general	остаточ- ный / residual	максимальная maximal	минимальная / minimal	максимальное maximal	минимальное / minimal	эксплуа- тационных / operational	наблюда- тельных / observational
Песчано-Уметское / Peshchano-Umet'skoe	1966	4501,6	2400	2400	2101,6	496	21,6	12,74	4,50	125	11
Елшано-Курдюмское / Elshano-Kurdyum'skoe	1966	4979,2	2710	2710	1688,2	580,8	30,0	10,47	2,34	129	27
Степновское / Stepnovskoe г-т D ₂ V+VI г-т D ₂ IV ^a +IV ^b	1973 - -	10696 7186 3510	5516 3110 2406	5180 4076 1104	- - -	80,0 40,0 40,0	- - -	17,77 20,85	8,60 6,87	226 142 84	- - -
Кирюшинское / Kiryushinskoe	1973	1027,4	336,0	336,0	691,4	246,4	2,6	2,22	1,60	31	-
Аманакское / Amanak'skoe	1975	210,0	49,0	49,0	161,0	93,0	0,4	2,11	1,59	5	-
Дмитриевское / Dmitrievskoe	1995	270,4	95,0	95,0	175,4	175,4	0,8	3,92	2,63	26	-
Михайловское / Mikhailovskoe	1995	393,0	167,0	167,0	226,0	226,0	1,3	4,31	2,97	27	-
Щелковское / Shchelkovskoe	1961	3300	1300	1300	2000	-	13,0	10,5	7,60	118	-
Калужское / Kaluzhskoe	1965	630,0	410,0	410	220,0	-	15,0	11,27	4,90	38	-
Касимовское / Kasimovskoe	1978	22000	12000	11000	10000	-	130,0	11,27	4,21	331	-
Уязовское / Uvuzavovskoe	1998	5500	2500	2500	3000	-	23,0	11,27	5,39	95	33
Невское / Nevskoe	1980	4670	2000	2000	2670	-	28,0	14,70	7,84	90	77
Гачинское / Gatchinskoe	1963	512	200	200	309	-	1,6	4,30	2,75	42	-
Северо-Ставропольское / North-Stavropol'skiy - Хадумский горизонт / Khadum horizon - Зеленая свита / Zelionaya Svita	-	99500	62930	24450	36570	-	200,0	-	-	847	-
Краснодарское / Krasnodar	1984	90000	56830	20000	33170	16770	160,0	4,06	-	667	9
Кущевское / Kushchevskoe	1991	13300	6800	6800	6500	1438	42,1	12,15	7,30	155	38
Канчуринское / Kanchurin'skoe	1972	6742	4290	4290	2452	724	54,2	16,92	4,90	142	-
Музинское / Musinskoe	1988	687	440	440	247	47	5,17	16,92	4,90	25	--
Пунгинское / Punginskoe	1985	22100	9863	3500	12237	9937	43,0	7,65	6,28	50	13
Удмуртский / Udmurtskiy	2001	2260	1070	1070	1190	-	15,2	-	-	-	-
Карашурское / Karashurskoe: - Тульский горизонт / Tulskey horizon - Бобриковский горизонт / Bobrikovsky horizon	-	890	430	430	460	-	7,5	14,71	8,19	24	-
Совхозное / Sovkhoznoe	1984	1370	640	640	730	-	7,7	14,71	9,12	25	-
		9900	7000	5000	2900	1617	70,0	15,10	3,92	110	-

Герметичность ПХГ обеспечивается за счёт наличия в рассматриваемой ГС (ловушке) комплекса непроницаемых пород (покрышек), что препятствует вертикальной миграции природного газа. Результаты анализа показали, что на всех эксплуатируемых ПХГ над продуктивной толщей имеются контрольные горизонты, а фонд контрольных скважин, позволяет судить о наличии межпластовых (вертикальных) перетоков. Исключение составляет Краснодарское ПХГ, особенностью которого является отсутствие проницаемых горизонтов над продуктивной толщей и, следовательно, отсутствие контрольных скважин, что ограничивает возможности увеличения активного объёма закачиваемого газа в ГС. Результаты проведённого анализа показали, что 70% ПХГ на территории России созданы в истощённых газовых месторождениях (ГМ), а оставшуюся долю из общего баланса составляют подземные резервуары, сооружённые в водоносных структурах [Гасумов, Гасумов, 2023; Fyk, Donsky, 2019; Мендебаев и др., 2021; Хан и др., 2015].

С использованием геологической, геофизической, гидродинамической и промысловой информации о строении П-К, с учётом имеющегося у них свойства аккумулировать значительные объёмы газа для регулирования его подачи в соответствии с сезонной неравномерностью газопотребления, был проведён анализ показателей П-К на различных ПХГ. Например, Кушевское ПХГ создано на базе истощенного ГKM, где ФЕС пласта-коллектора значительно хуже, чем на других объектах хранения (пористость – 24–29 %, проницаемость колеблется в диапазоне 19–34,6 мД) [Fyk, Donsky, 2019; Шиповалов и др., 2022; Хан и др., 2015].

По количеству объектов эксплуатации Северо-Ставропольское ПХГ относится к многопластовым (Хадумский горизонт и Зелёная свита) и является самым крупным подземным хранилищем газа в Европе. Ловушкой П-К Хадумского горизонта являются два структурных поднятия платформенного типа, разделенных неглубокой седловиной. Ловушкой для П-К Зеленой свиты является брахиантиклинальная складка субширотного простирания, а отложения в литологическом отношении подразделяются на две части: пласт I (является коллектором газа), представлен песками и алевролитами; пласт 2 сложен песчаниками алевролитистыми, глубина залегания отложений составляет 1000 м.

Большой интерес представляет Касимовское ПХГ, являющееся самым крупным газохранилищем в мире, созданным в водоносном пласте. В структурном плане ловушкой П-К является вытянутая в северо-западном направлении асимметричная складка, имеющая крутое северо-восточное и пологое юго-западное крылья [Хан и др., 2015]. Большинство ПХГ предусматривает циклическую эксплуатацию объекта. При этом возникает необходимость обеспечивать кратковременный максимальный суточный отбор из хранилищ для покрытия повышенных потребностей в газе в связи с резким похолоданием или нарушениями в системе газоснабжения.

Эти факторы должны быть учтены при ТП ПХГ, так как от бесперебойной работы отдельных объектов зависит эффективность работы всей газотранспортной системы. Все эти факторы существенно влияют на параметры П-К и приводят к изменениям призабойной зоны пласта (ПЗП), так как, объект находится в циклическом процессе закачки и отбора газа происходит П-К, обусловленное периодическими деформациями, что отрицательно влияет на режим работы объекта [Brkic et al., 2021; Гарайшин, Кантюков, 2017; Maniuk et al., 2020; Троицкий и др., 2019; Karev, Kovalenko, 2023]. Одной из основных целей проведённых исследований по изучению работы эксплуатируемых ПХГ в различных регионах и ГС, существенно

отличающихся активными и буферными объёмами газа в хранилище, является получение результатов, которые могли бы быть использованы при ТП ПХГ на новых территориях страны. В настоящее время реализуются новые проекты на территории РФ (табл. 2), а в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке намечен большой объем ГРП для поиска структур под создание подземных хранилищ газа и гелиевого концентрата.

Таблица 2 / Table 2

**Проекты по развитию подземных хранилищ газа на территории РФ /
Projects for the development of underground gas storage facilities in the territory
of the Russian Federation**

Подземные хранилища газа / Underground gas storage	Тип ПХГ / Type UGS	Год начала проекта / Year of project start	Проектные характеристики / Design characteristics	
			Объем оперативного резерва газа, млрд м ³ / Volume of operational gas reserve, billion m ³	Максимальная суточная производительность, млн м ³ / Maximum daily productivity, million m ³
Калининградское / Kaliningrad	отложения каменной соли / rock salt deposits	2001	0,26	12
Волгоградское / Volgograd		2011	0,35	25
Беднодемьяновское / Bednodemyanovskoye	водоносные структуры / aquifers	2011	5,0	70,0
Карашурское / Karashurskoye	истощённое месторождение / depleted deposit	1999	1,07	15,2

Установлено, что предшествующие циклы с неравномерными периодами отбора (закачки) газа оказывают влияние на выполнение заданных режимов в последующие годы эксплуатации. В ПХГ, созданных в истощённых ГМ, разрабатываемых ранее при проявлении газового режима, снижение объёма закачиваемого газа приводит к перераспределению давления. В условиях незначительных темпов отбора или закачки, простоя хранилища наблюдается выравнивание давления по объёму залежи [Воробьёв и др., 2014; Гусейнов, 2018]. ПХГ, созданные в водоносных структурах и в истощённых ГМ, приуроченных к активному водонапорному бассейну, эксплуатируются в условиях проявления водонапорного режима. Эксплуатация таких объектов в циклическом режиме обеспечивает минимальные пластовые потери заземлённого газа. Режим циклической эксплуатации сопровождается близкими объёмами внедряемой и оттесняемой пластовой воды в объекте хранения. Проявление водонапорного режима в хранилище создаёт условия, при которых скважины работают при более высоком пластовом давлении в течение всего периода отбора газа. Величина перепада давления между водоносной частью пласта и отдельными зонами газонасыщенной части П-К может иметь разные предельные значения, что может создать условия для продвижения воды в пласт. При гидравлическом разрыве П-К в скважинах ПХГ, расположенных на водоносной структуре, на распределение отборов газа по объекту серьёзное влияние оказывает относительная толщина вскрытия пласта.

Проведённые исследования показывают, что развитие ПХГ требует реализации новых инновационных методов при ТП ПХГ, разработанных в том числе, с учётом результатов изучения опыта эксплуатации действующих подземных резервуаров,

причин возникновения внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на бесперебойность их работы при неравномерном отборе газа. При этом особый интерес представляет изучение вопросов, связанных с разработкой альтернативной технологии эксплуатации ПХГ созданных ГС, в зависимости от значения пластовой энергии, что является одним из инновационных направлений, и должно проводиться для хранилищ с проявлением различных режимов работы залежи (водонапорного или газового) [Воробьев и др., 2014; Сидорчук, Добрынина, 2024; Heinemann et al., 2021].

Как известно этап циклической эксплуатации ПХГ начинается с выхода хранилища на утверждённые проектные показатели и продолжается до её ликвидации, а расчёт режима осуществляется в соответствии с технологической моделью хранилища на планируемый сезон (закачка-отбор газа). Эффективность этапа циклической эксплуатации связана с важными причинами – геологического, технико-технологического и технико-экономического характера, что важно для его оценки (рис. 2 и 3).

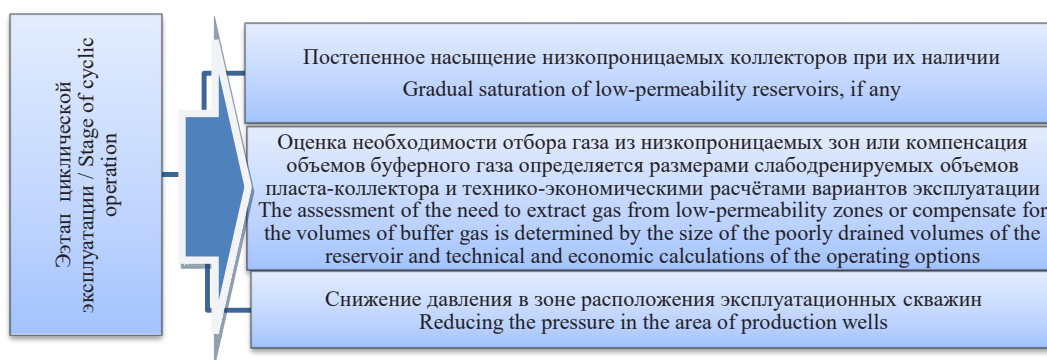


Рис. 2. Показатели этапа циклической эксплуатации подземных хранилищ газа /

Fig. 2. Indicators of the cyclic operation stage of underground gas storage facilities

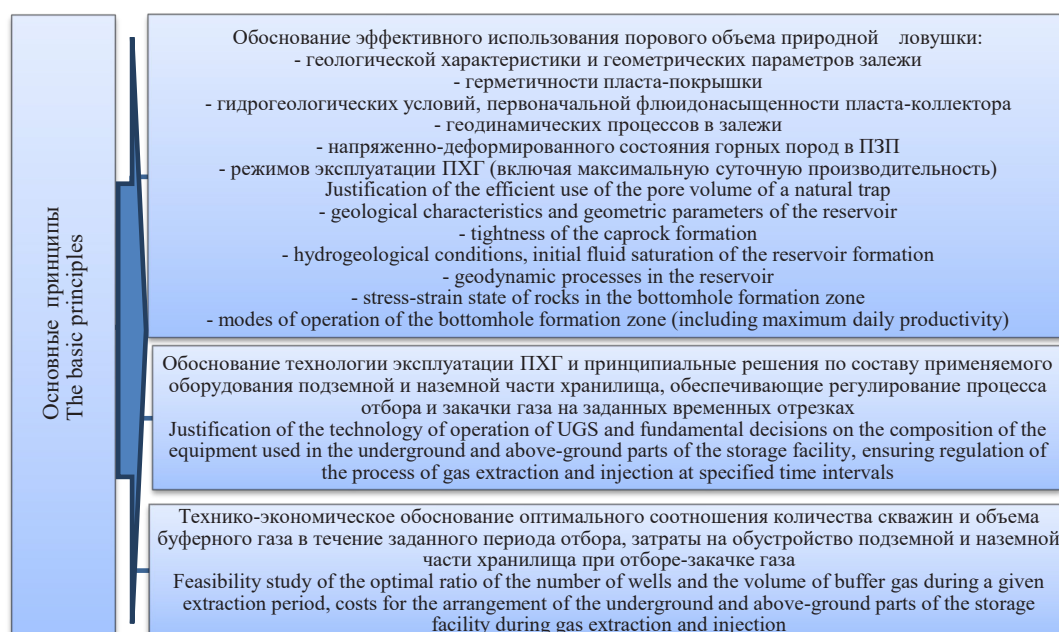


Рис. 3. Основные принципы этапа циклической эксплуатации подземного хранилища /

Fig. 3. Basic principles of the cyclic operation stage of the underground storage facility

Для обеспечения надёжности и герметичности подземного резервуара для хранения газа на выбранном оптимальном варианте эксплуатации ПХГ при неравномерном отборе газа, а также с учётом вышерассмотренных факторов в ТП ПХГ необходимо предусматривать осуществление контроля и мониторинга за состоянием залежи и целого ПХГ, на различных этапах циклической эксплуатации объекта. Возможным инструментом для этого является использование геологической модели ПХГ, которая должна быть учтена в процессе ТП объекта. Геологическая модель, построенная в истощённых ГМ, должна учитывать геологическую, геофизическую, гидродинамическую и промысловую информацию о строении П-К, а также технологические и технико-экономические сведения, накопленные в процессе эксплуатации месторождения. Расчёты по матрице вариантов возможны с привлечением балансовой модели с целью оптимизации процесса выбора приемлемых вариантов эксплуатации ПХГ по пластовой части хранилища, в сравнительном объёмном балансе активного и буферного газа [Шиповалов и др., 2022; Fyk, Donsky, 2019].

В истощённых месторождениях УВ со сложными горно-геологическими условиями при ТП ПХГ должны проводиться уточнения распределения остаточной флюидонасыщенности (пластового флюида) по всей рассматриваемой ГС. В структурах с трещиновато-поровыми породами, при разработке залежи необходимо учитывать её структурно-текстурные особенности, что позволит оптимизировать схемы вскрытия П-К скважинами сложного профиля, обеспечивающими максимальную суточную производительность и исключая избирательное её обводнение, снижение ФЕС пласта-коллектора в процессе эксплуатации ПХГ [Гарайшин, Кантюков, 2017; Хан и др., 2015]. Для обеспечения необходимого объема и периодичности проведения исследований важно создать системы контроля технологических процессов и за герметичностью ПХГ в ГС, где должно быть предусмотрено достаточное количество и расположение наблюдательных скважин на П-К, законтурной зоне (пьезометрические скважины), ниже- и вышележащих контрольных водоносных пластах и приповерхностных отложениях.

В процессе эксплуатации ПХГ происходит увеличение дренируемых объёмов газа, как показала опытная закачка газа в водоносных пластах, в связи чем, следует корректировать комплекс исследований, позволяющих более детально охарактеризовать процессы распределения давления по напластованию и вертикали, обводнения залежи и скважин. Необходимо применять инновационные методы изучения с направленностью и частотой проведения для конкретных геологических условий в зависимости от геометрических, горно-геологических параметров залежи, направленности движения пластовых вод. Рассматриваемые факторы важны для качественного ТП ПХГ, где особое значение имеет наличие полноты и достоверности исходных данных (рис. 4).

Результаты исследования ФЕС пласта по площади и разрезу, активности водонапорной системы и направленности продвижения пластовых вод с учётом расположения поверхностных природных и инфраструктурных объектов позволяет выбрать рациональные схемы размещения эксплуатационных скважин на ПХГ [Gasumov et al., 2020; Гасумов, Гасумов, 2023; Гарайшин, Кантюков, 2017]. Расчёт интерференции (взаимовлияния) скважин и обоснование плотности размещения эксплуатационного фонда при размещении их в предоставляемом горном отводе позволяет прогнозировать гидрогеодинамические связи между объектами, так как,

выбор схемы вскрытия П-К обеспечивает максимально допустимый охват дренирования газонасыщенного порового объёма с учётом резерва скважин.

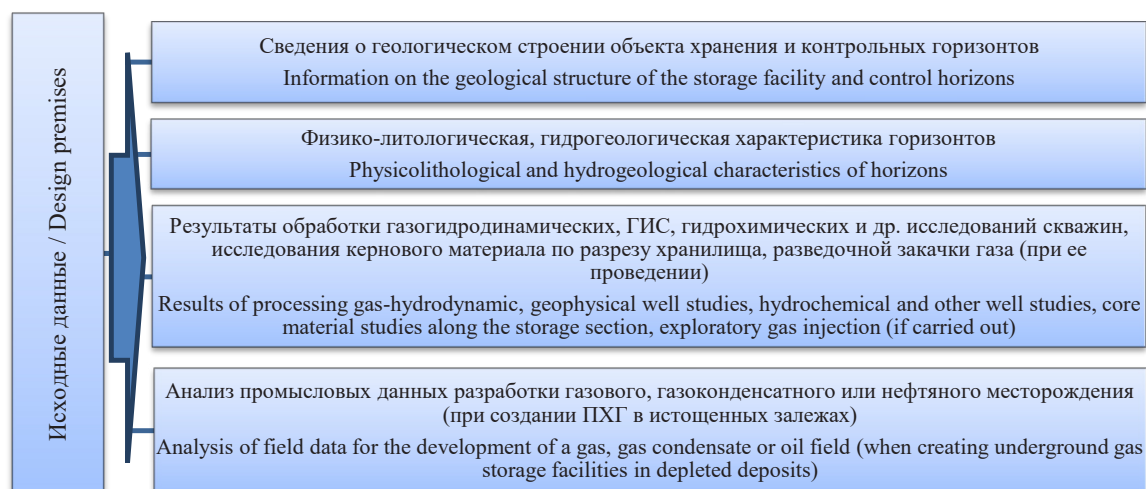


Рис. 4. Необходимые данные для проектирования подземного хранилища /
Fig. 4. Necessary data for designing an underground storage facility

С целью повышения технологической эффективности и рентабельности эксплуатации отдельных П-К за счёт сокращения фонда скважин комбинированный вариант эксплуатации ГС является оправданным, это важно и в том случае, когда многопластовая залежь выделена как эксплуатационный объект [Gasumov et al., 2020; Гасумов, Гасумов, 2023; Гарайшин, Кантюков, 2017]. Для эксплуатационных скважин ПХГ, работающих в циклическом режиме, конструкция их забоя постоянно находится под напряжением в системе «скважина-пласт-скважина», вследствие процесса «закачка-отбор». В связи с чем конструкции забоя скважин при ТП ПХГ уделяется особое внимание.

Научно обоснованный выбор конструкции скважин, в том числе её забоя при ТП ПХГ с использованием горно-геологической и промысловой информации о строении П-К, и результаты изучения опыта по сооружению подземных резервуаров с аналогичными характеристиками, с учётом возможных свойств аккумуляции значительных объёмов газа и необходимых действий в процессе закачки-отбора газа в ГС, обеспечивают эффективную, надёжную и долговечную работу объекта, являющегося сложным подземным инженерным сооружением. Правильный выбор конструкции скважин, также является важным фактором обеспечения герметичности ПХГ в ГС, и минимизации выбросов метана в атмосферу. А также при выборе конструкции забоя скважины необходимо учитывать, что, принимая за основу промысловую практику, при недостаточном отборе всего активного объёма газа за 3–5 сезонов возникают угрозы выхода газа за замыкающую изогипсу, и вследствие отбора газа в последующие сезоны происходит в другом диапазоне давлений и объёмов, с учётом закаченного в новом сезоне, что особенно характерно для ПХГ с активным водонапорным режимом. Данное обстоятельство должно быть учтено при ТП ПХГ и выборе режима его эксплуатации. Установлено, что изменение термобарических условий при выработке залежи приводит к выпадению конденсата нефти, образованию гидратов, залповому росту водного фактора, наличию агрессивных компонентов в составе флюида, изменению положения и формы ГВК при разных

темпах закачки, как на этапе формирования искусственной газовой залежи, так и при выводе на циклическую эксплуатацию [Шиповалов и др., 2022].

Для оптимизации схемы вскрытия П-К в скважинах ПХГ со сложным профилем, что особенно важно в пластах с трещиновато-поровыми коллекторами, наличие информации о структурно-текстурных особенностях пород-коллектора позволяет обеспечить максимальную суточную производительность и исключить избирательное обводнение скважин по отдельным проницаемым каналам, снижение ФЕС в процессе ее эксплуатации.

Исследования информации о строении аккумулирующей залежи, оценку максимального газонасыщенного порового объема и характера изменения ФЕС П-К при ТП ПХГ, рекомендуется осуществлять с использованием геологической модели залежи, что важно для выбора режима оптимальной и безопасной эксплуатации объекта в многофункциональных промысловых условиях. Для ТП ПХГ геологическая модель, построенная в истощённых месторождениях, должна учитывать геологическую, геофизическую, гидродинамическую и промысловую информацию о строении пласта-коллектора, а также технологические и технико-экономические сведения, накопленные в процессе эксплуатации месторождения. А на перспективной площади, в водоносных пластах в исходной информации используются данные ГРП, с постоянной адаптацией при получении новых геологических данных [Гусейнов, 2018; Хан и др., 2015, Matos et al., 2019].

Если геологические аспекты при ТП ПХГ позволяют правильно выбрать П-К (хранилище), то ТЭО решает ряд других задач, в том числе возможность оценить уровень капвложений по рассматриваемым вариантам; оценить уровень затрат на эксплуатацию с учётом особенностей реализации рассматриваемых вариантов; технико-экономическое сравнение рассматриваемых вариантов и рекомендация наиболее предпочтительного. При ТЭО буферный газ рассматривается как капитальное вложение на обустройство подземной части хранилища, а поставки газа учитываются по годам. Суточная производительность хранилища зависит не только от общего количества газа в пласте, но и от наземного обустройства, пропускной способности линейной части, оборудования по подготовке газа, мощности газоперекачивающего агрегата [Поварова и др., 2022; Михайловский, Лобанова, 2023].

Заключение

Большинство созданных ПХГ на территории России приурочено к складчатым ловушкам, где коллекторы сложены терригенными и карбонатными породами. При ТП ПХГ обязательным условием является герметичность объекта, которая может быть обеспечена при наличии в геологической структуре комплекса непроницаемых пород (покрышек), позволяющих исключить вертикальную миграцию газа из П-К. Наличие в ГС контрольных горизонтов над продуктивной толщей, достаточное количество фонда контрольных скважин и их оптимальное расположение по площади ПХГ, позволяет оценивать и прогнозировать возможные межпластовые перетоки и образование техногенных залежей. Проблемы, связанные с герметичностью покрышек над продуктивной толщей, являются препятствующим фактором при строительстве ПХГ в водоносных структурах с требуемым объемом активного газа.

Установлено, что при циклической работе (закачка и отбор) ПХГ создаётся серьёзная нагрузка в ПЗП, которая приводит к изменению ФЕС и разрушению П-К. Эксплуатация ПХГ, созданных в истощённых газовых месторождениях и водонос-

ных структурах и приуроченных к активному водонапорному бассейну, эксплуатируемых в циклическом режиме и в условиях водонапорного режима, обеспечивает минимальные пластовые потери заземлённого газа. Оптимизация процесса выбора приемлемых вариантов эксплуатации ПХГ по пластовой части хранилища, предусматривающих разное соотношение объёмов активного и буферного газа, возможна на основе расчёта по матрице вариантов с привлечением балансовой модели, что имеет практическую значимость и может быть использовано при ТП ПХГ в ГС.

Литература

1. Воробьёв А.Е., Малюков В.П., Иванова А.И. Инновационная ресурсопроизводящая технология использования подземных хранилищ. // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2014. – № 1. – С. 117–131.
2. Гарайшин А.С., Кантюков Р.Р. Выбор пласта-коллектора для захоронения промышленных стоков Арбузовского. // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. № 1. – С. 82–86.
3. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт, формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 108–123.
4. Гусейнов Т.Н. Характерные проблемы адаптации гидродинамических моделей нефтяных месторождений к истории разработки и возможные пути решения. // Молодёжный научный вестник. – 2018. – Т. 37. № 12. – С. 13–19.
5. Мендебаев Т.Н., Третьяк А.Я., Смашов Н.Ж., Мохов А.В., Бурцев А.А. Освоение месторождений подземных вод инжекторно-принудительным способом. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 160–171.
6. Михайловский А.А., Лобанова А.Н. Состояние и актуальные направления технологического развития системы ПХГ ПАО «Газпром». // Научный журнал Российского газового общества. – 2023. – Т. 38. № 2. – С. 6–13.
7. Поварова Л.В., Самарин М.А., Соловьёв М.Д., Саввон Я.В. Оценка экологической опасности при разработке Южно-Черноерковского месторождения. // Булатовские чтения. – 2022. – Т. 2. – С. 117–120.
8. Пономарев О.П. Геоэкологические особенности эксплуатации подземных хранилищ природного газа. // Вестник РГУ им. И. Канта. – 2016. – Вып. 1. – С. 69–77.
9. Сидорчук Е.А., Добрынина С.А. Геодинамическая природа размещения нефтегазовых месторождений (на примере территории Ставропольского края). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 179–194.
10. Троицкий В.М., Григорьев Б.А., Рассохин С.Г., Соколов А.Ф., Мизин А.В., Ваньков В.П. Физическое моделирование циклов закачки и отбора газа при разработке и эксплуатации ПХГ. Гистерезис фазовых проницаемостей. // Вести газовой науки. – 2019. – Т. 38. № 1. – С. 18–28.
11. Хан С.А., Костиков С.Л., Сеиенов О.Г., Акчурин И.Д. Разработка и внедрение эффективных технологий при создании эксплуатации Касимовского ПХГ. // Газовая промышленность. – 2015. – Т. 718. № 2. – С. 83–88.
12. Шиповалов А.Н., Земенков Ю.Д., Торопов С.Ю., Подорожников С.Ю., Земенкова М.Ю., Тырылгин И.В., Павлов В.П. Аспекты технологической надёжности и экономической хранилищ природного газа Западной Сибири. Тюмень: ТИУ, 2022. – 344 с.
13. Alani O.K., Okechukwu C.A. Analysis of geological and technical condition for creation of underground gas storage in a depleted gas reservoir of Yuzhno-Lugovskoye field in Russia. // Petroleum and Coal. – 2019. – Vol. 61. No. 1. – pp. 10–20.
14. Brkic V., Zelenika I., Mijic P., Medved I. Underground gas storage process optimisation with respect to reservoir parameters and production equipment. // Energies. – 2021. – Vol. 20. No. 14. – Art. No. 4324. DOI: 10.3390/en14144324.

15. Ermolaev A., Latipov A., et al. Optimal well placement model for underground gas storages. // In: Proceedings 15 International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, 26-28 September 2022. – 2022. pp. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934383.
16. Fyk M.I., Donsky D. Fundamentals of technology R & D design and operation of oil and gas underground storage. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2019. –164 p.
17. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko J.S. Features of the underground storages construction in depleted oil and gas condensate fields. // Notes of the Mining Institute. – 2020. – Vol. 244. – pp. 418–427.
18. Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M., et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – The scientific challenges. // Energy Environmental Science. – 2021. – No. 14. – pp. 853–864. DOI: 10.1039/D0EE03536J.
19. Maniuk V.M., Dubei N.V., Mykhailiv I.R., Boiko A.P. On the study of geological characteristics of underground gas storage objects. // In: Proceedings of the European Association of Geoscientists & Engineers Source: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020. – 2020. – Vol. 2020. – pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2020geo145.
20. Matos C.R., Carneiro J.F., Silva P.P. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification. // Journal of Energy Storage. – 2019. – Vol. 21. – pp. 241–258. DOI: 10.1016/j.est.2018.11.023.
21. Mu L., Liao X., Yu Q. et al. Study on operation strategy of aquifer underground gas storage using CO₂ as cushion gas. // In: Proceedings of the Carbon Management Technology Conference, Houston, TX, USA, 15–18 July 2019. DOI: 10.7122/CMTC-552947-MS.
22. Karev V., Kovalenko Y. Geomechanical modelling of the stress-strain state in UGS reservoirs during cyclic changes in reservoir pressure and downhole pressure. // Geomechanical Aspects of Operation of Underground Gas Storage. – 2023. – pp. 37–67.
23. Uliasz-Misiak B., Misiak J. Underground gas storage in saline aquifers: geological aspects. // Energies. – 2024. – Vol. 17. No. 7. – Art. No. 1666. DOI: 10.3390/en17071666.

References

1. Vorobyov A.E., Malyukov V.P., Ivanova A.I. Innovative resource-reproducing technology for using underground storage facilities. Vestnik of RUDN. Series: Engineering Research. 2014. No. 1. pp. 117–131. (In Russ.)
2. Garayshin A.S., Kantyukov R.R. Selection of a reservoir for the disposal of industrial wastewater from Arbuzovsky. Georesources. 2017. Vol. 19. No. 1. pp. 82–86. (In Russ.)
3. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Assessment of the hydrodynamic perfection of the well-formation system formed at the stage of opening the productive formation. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 108–123. (In Russ.)
4. Guseinov T.N. Characteristic problems of adaptation of hydrodynamic models of oil fields to the history of development and possible solutions. Youth Scientific Bulletin. 2018. Vol. 37. No. 12. pp. 13–19. (In Russ.)
5. Mendebaev T.N., Tretyak A.Ya., Smashov N.Zh., Mokhov A.V., Burtsev A.A. Development of groundwater deposits by the forced-injection method. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 160–171. (In Russ.)
6. Mikhailovsky A.A., Lobanova A.N. Status and current directions of technological development of the UGS system of PJSC Gazprom. Scientific Journal of the Russian Gas Society. 2023. Vol. 38. No. 2. pp. 6–13. (In Russ.)
7. Povarova L.V., Samarin M.A., Soloviev M.D., Savvon Ya.V. Assessment of the environmental hazard during the development of the Yuzhno-Chernoyerkovskoye field. Bulatovskie Readings. 2022. Vol. 2. pp. 117–120. (In Russ.)

8. Ponomarev O.P. Geoecological features of operation of underground natural gas storage facilities. *Bulletin of the Russian State University named after I. Kant*. 2016. Issue 1. pp. 69–77. (In Russ.)
9. Sidorchuk E.A., Dobrynina S.A. Geodynamic nature of oil and gas field placement (using the Stavropol Territory as an example). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 179–194. (In Russ.)
10. Troitsky V.M., Grigoriev B.A., Rassokhin S.G., Sokolov A.F., Mizin A.V., Vankov V.P. Physical modeling of gas injection and withdrawal cycles during development and operation of UGS. Hysteresis of phase permeabilities. *Vesti gazovoy nauki*. 2019. Vol. 38. No. 1. pp. 18–28. (In Russ.)
11. Khan S.A., Kostikov S.L., Seienov O.G., Akchurin I.D. Development and implementation of effective technologies in the creation and operation of the Kasimovskoye UGS facility. *Gas industry*. 2015. Vol. 718. No. 2. pp. 83–88. (In Russ.)
12. Shipovalov A.N., Zemenkov Yu.D., Toropov S.Yu., Podorozhnikov S.Yu., Zemenkova M.Yu., Tyrylgina I.V., Pavlov V.P. Aspects of technological reliability and economics of natural gas storage facilities in Western Siberia. Tyumen. Tyumen Industrial University. 2022. 344 p. (In Russ.)
13. Alani O.K., Okechukwu C.A. Analysis of geological and technical condition for creation of underground gas storage in a depleted gas reservoir of Yuzhno-Lugovskoye field in Russia. *Petroleum and Coal*. 2019. Vol. 61. No. 1. pp. 10–20.
14. Brkic V., Zelenika I., Mijic P., Medved I. Underground gas storage process optimisation with respect to reservoir parameters and production equipment. *Energies*. 2021. Vol. 20. No. 14. Art. No. 4324. DOI: 10.3390/en14144324.
15. Ermolaev A., Latipov A., et al. Optimal well placement model for underground gas storages. In: *Proceedings 15 International Conference Management of large-scale system development (MLSD)*. Moscow. 26–28 September 2022. 2022. pp. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934383.
16. Fyk M.I., Donsky D. Fundamentals of technology R & D design and operation of oil and gas underground storage. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. 2019. 164 p.
17. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko J.S. Features of the underground storages construction in depleted oil and gas condensate fields. *Notes of the Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 418–427.
18. Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M., et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – The scientific challenges. *Energy Environmental Science*. 2021. No. 14. p. 853–864. DOI: 10.1039/D0EE03536J.
19. Maniuk V.M., Dubei N.V., Mykhailiv I.R., Boiko A.P. On the study of geological characteristics of underground gas storage objects. In: *Proceedings of the European Association of Geoscientists & Engineers Source: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*. 2020. Vol. 2020. pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2020geo145.
20. Matos C.R., Carneiro J.F., Silva P.P. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification. *Journal of Energy Storage*. 2019. Vol. 21. pp. 241–258. DOI: 10.1016/j.est.2018.11.023.
21. Mu L., Liao X., Yu Q. et al. Study on operation strategy of aquifer underground gas storage using CO₂ as cushion gas. In: *Proceedings of the Carbon Management Technology Conference*, Houston. TX. USA. 15–18 July 2019. DOI: 10.7122/CMTC-552947-MS.
22. Karev V., Kovalenko Y. Geomechanical modelling of the stress-strain state in UGS reservoirs during cyclic changes in reservoir pressure and downhole pressure. *Geomechanical Aspects of Operation of Underground Gas Storage*. 2023. pp. 37–67.
23. Uliasz-Misiak B., Misiak J. Underground gas storage in saline aquifers: geological aspects. *Energies*. 2024. Vol. 17. No. 7. Art. No. 1666. DOI: 10.3390/en17071666.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014

Оригинальная статья

Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона

О.Г. Бурдзиева¹, М.О. Ревазов¹, А.Л. Кортиев², Р.Р. Гогичев¹

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

² Северокавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44

Статья поступила: 18.09.2024, доработана: 03.12.2024, принята к публикации: 04.12.2024

Резюме: Активное развитие внутреннего туризма в России в последние годы способствует активной застройке ранее неиспользуемых высокогорных территорий Северного Кавказа, одновременно повышая и геоэкологическую нагрузку, определяет **актуальность** ее оценок. **Целью** работы является выявление и оценка факторов, формирующих нагрузку на природную систему, подвергающуюся регулярному и длительному антропогенному воздействию. **Методы.** В исследовании используются методы экспертных оценок воздействий различной природы. В основу методологического обоснования проведенных исследований положены современные теоретические и эмпирические представления о геодинамических процессах региона, их классификационное представительство на территории, структурно-тектонические и литологические особенности геологической среды, а также физико-механические, петрофизические и геохимические характеристики горных пород. **Результаты.** Эндогенная активность является причинным фактором активизации экзогенных процессов и одним из признаков этого является устойчивая приуроченность последних к тектоническим нарушениям и узлам разноранговых разрывных структур, очаговым зонам сейсмической и вулканоплутонической активности. Оценка уровня геоэкологической нагрузки и соответствующего геоэкологического риска предполагает необходимость выявления факторов, формирующих их. С помощью экспертных оценок были введены количественные характеристики воздействий, обусловленных литологическими, геоморфологическими, эндогенными, экзогенными геологическими и природно-климатическими факторами. Появляется возможность прогноза уровня воздействия природно-техногенной нагрузки и разработки мероприятий по смягчению тяжести последствий развития опасных природных процессов и проявления опасных экзогенных процессов: оползней, селей, обвалов при практическом строительстве.

Ключевые слова: геодинамические воздействия и их факторы, эндогенные и экзогенные процессы, природно-техногенное воздействие, экспертные оценки, геоэкологические нагрузки и риски.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект «Разработка инновационных методов диагностирования и прогнозирования лавинно-селевых явлений, деградации горного оледенения и разработка рекомендаций по защите от их негативного воздействия на рекреационные комплексы ВТРК «Мамисон», № 23-17-20001).

Для цитирования: Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 166-179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014

DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014

Original paper

Influence of geodynamic processes on the geoecological load of mountain region

O.G. Burdzieva¹, M.O. Revazov¹, A.L. Kortiev², R.R. Gogichev¹

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

² North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation

Received: 18.09.2024, revised: 03.12.2024, accepted: 04.12.2024

Abstract: Active development of domestic tourism in Russia in recent years contributes to the active development of previously unused high-mountainous territories of the North Caucasus, simultaneously increasing the geo-ecological load, determines the relevance of its assessments. The aim of the work is to identify and assess the factors that form the load on the natural system subjected to regular and long-term anthropogenic impact. **Methods.** The study uses methods of expert assessments of impacts of different nature. The methodological basis of the study is based on modern theoretical and empirical concepts of geodynamic processes of the region, their classification representation in the territory, structural-tectonic and lithological features of the geological environment, as well as physical-mechanical, petrophysical and geochemical characteristics of rocks. **Results.** Endogenous activity is a causal factor in the activation of exogenous processes and one of the signs of this is the stable confinement of the latter to tectonic faults and nodes of differently ranked discontinuous structures, focal zones of seismic and volcanic-plutonic activity. Assessment of the level of geo-ecological load and the corresponding geo-ecological risk implies the need to identify the factors that form them. With the help of expert assessments, quantitative characteristics of impacts caused by lithological, geomorphological, endogenous, exogenous geological and natural-climatic factors were introduced. This approach makes it possible to predict the level of impact of natural and technological load and to develop necessary measures to prevent the severity of possible consequences for the development of hazardous natural processes and manifestation of dangerous exogenous processes: landslides, mudflows, rockslides in practical construction.

Keywords: geodynamic impacts and their factors, endogenous and exogenous processes, natural – technological impacts, expert assessments, geoecological loads and risks.

Acknowledgement: This work was supported by the Russian Science Foundation (Development of innovative methods for diagnosing and predicting avalanche and mudflow phenomena, degradation of mountain glaciation and development of recommendations for protection against their negative impact on the recreational complexes of the ATRC “Mamison”, project No. 23-17-20001).

For citation: Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoecological load of mountain region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(4): 166-179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014

Введение

Активное развитие внутреннего туризма в России в последние годы способствует стремительной застройке ранее неиспользуемых высокогорных территорий Северного Кавказа, одновременно повышая геоэкологическую нагрузку, и, несо-

мненно, определяет актуальность ее оценок. В этой связи, исходя из нынешней тенденции развития республики Северная Осетия-Алания, предполагающей также ускоренное развитие туристической инфраструктуры, в том числе, создание новых горных маршрутов для автотранспорта, повышается уровень антропогенного и техногенного воздействия, тем самым увеличивая и уровень геоэкологической нагрузки на территорию.

Геодинамический процесс, исходя из принципа наименьшей энергии любой физической системы, следует рассматривать как единственное решение самой системой возникшего энергетического дисбаланса. Эндогенная активность является причинным фактором активизации экзогенных процессов и одним из признаков этого является устойчивая приуроченность последних к тектоническим нарушениям и узлам разноранговых разрывных структур, очаговым зонам сейсмической и вулканоплутонической активности [Яроцкий, Чотчаев, 2019].

Уровень воздействия на геоэкологическую среду эндогенных и экзогенных геодинамических процессов характеризует широко развитые по площади различные генетические типы четвертичных образований, формирующие многочисленные очаги экзогенных опасных геологических процессов [Бурдзиева и др., 2023; Заалишвили, Чотчаев, 2022; Zaalishvili et al., 2019].

Территория Северной Осетии характеризуется целым рядом опасных геологических процессов (вулканы, землетрясения, ледники, оползни, лавины, наводнения и др.) [Атлас ..., 2007; Гончаренко и др., 2008]. Такая напряженность геодинамической нагрузки предполагает определение областей распределения воздействия геодинамических источников различной природы в пространстве по типу сейсмического микрорайонирования [Hamzehloo et al., 2007; Walling, Mohanty, 2009], реализуя их детальное изучение.

Методы

Особенности формирования и взаимосвязь эрозионных опасных геологических процессов, и их влияние на геоэкологию высокогорных территорий объединяют характерные опасные природные экзогенные геологические процессы, определяющие геоэкологическое состояние высокогорных территорий (рис. 1).

Геоморфологические условия местности, являясь структурой эндогенного проявления, отображают основные элементы тектонической деятельности. Исчерпывающее изучение геоморфологических характеристик позволяет прогнозировать изменение ландшафта и эволюцию речной системы в результате природной (тектонической) деятельности [Zaalishvili, Gogmachadze, 2000].

На горные регионы также значительное влияние оказывают различные проявления техногенных воздействий. Обособленное воздействие техногенных процессов как частного фактора антропогенеза, способствующего негативному воздействию на ландшафт и геоморфологические структуры, а также на геологические условия территории, повышает уровень геоэкологической напряженности вплоть до опасного [Svalova et al., 2019].

Высокогорные селения в Северной Осетии (Фиагдон, Кармадон, Даргавс и др.) в большинстве своем находятся в местах аккумуляции экзогенного материала в виде делювия, пролювия и коллювия, накапливающихся в долинах и на склонах горных рек [Бурдзиева и др., 2023].

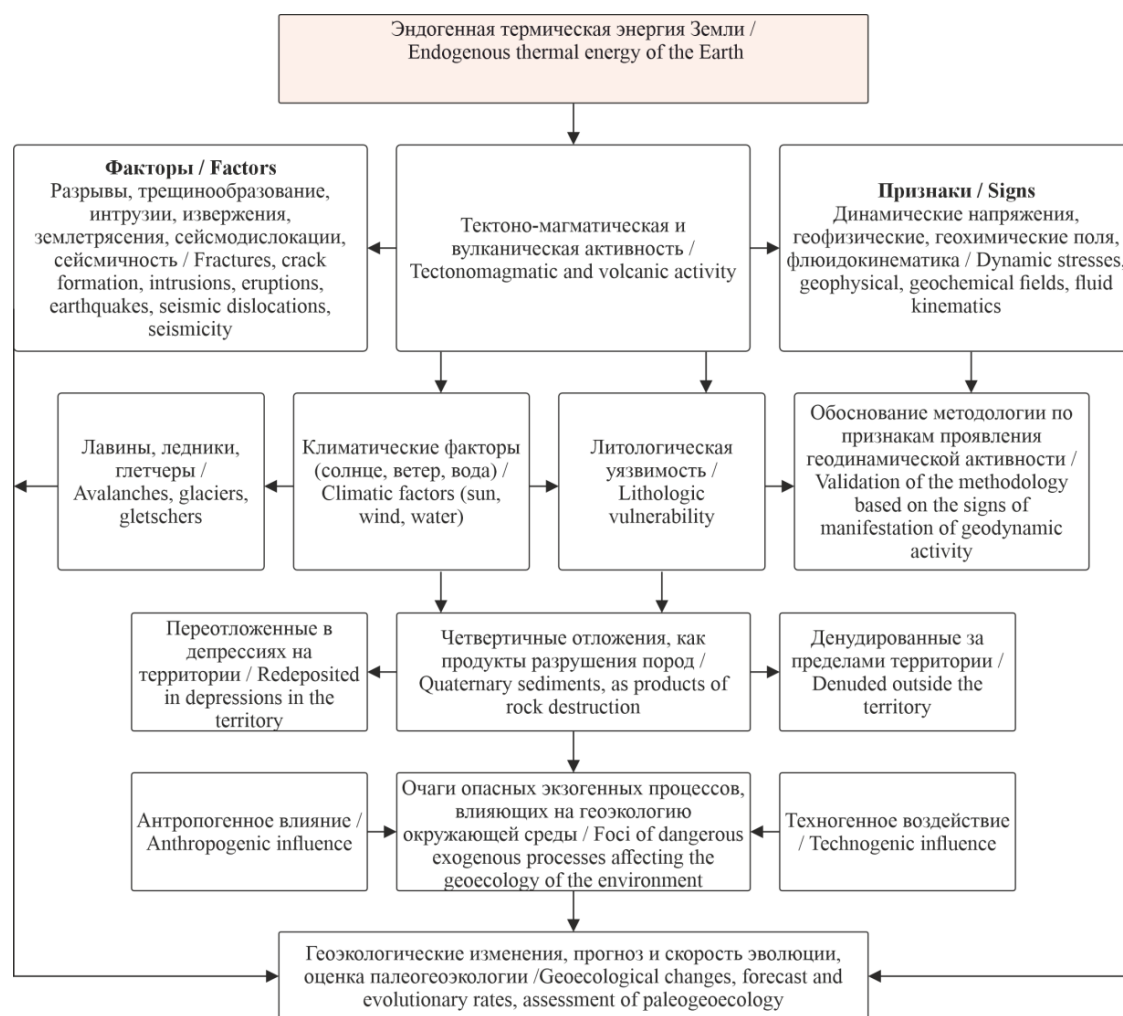


Рис. 1. Признаки и факторы геодинамического воздействия на геоэкологическое состояние окружающей среды [Чотчаев и др., 2020] /

Fig. 1. Signs and factors of geodynamic impact on the geoeological state of the environment [Chotchaev et al., 2020]

В этой связи представляет интерес исследование наиболее застраиваемой территории, а именно, долины р. Фиагдон и склонов ее ущелья с ее естественным ядром – с. Фиагдон.

Селение Фиагдон расположено в чаше Фиагдонской антиклинали, которая находится между Садон-Унальским горстом и зоной Киммерийской складчатости, разделяет их Западный Шаумагархский разлом с запада и Дагомский и Ахсаудонский разломы с востока. Фиагдонская антиклиналь расположена в центральной части Центрально-Кавказской зоны и занимает долины рек Фиагдон и ее левого притока Цазиудон. Представляющая собой сундучную складку антиклиналь, протягивается в юго-восточном направлении практически на 10 км (Ольховский, Тибилов, 1998). Данная зона из-за особенности геологического строения (сложена среднелейасовой морской терригенной формацией), и режимов осадконакопления является опасной благодаря преобладанию крутопадающих с образованием оползней склонов: Кадатский, Авсандурский, Ханикомский и т.д. [Агibalова, 1983] (рис. 2). В этой связи, необходимо также отметить, что через территорию с. Фиагдон проходит Садонская шовно-депрессионная зона, концентрирующая напряжения между двумя

микроплитами и их зонами поднятий – Лесистым и Скалистым хребтами.



Рис. 2. Надпойменные террасы и палеоползневые склоны в долине р. Фиагдон /

Fig. 2. Upland terraces and paleoslide slopes in the Fiagdon River valley

Для количественной оценки геоэкологического воздействия геодинамических факторов сделана выборка всех проявляющихся геодинамических и климатических факторов, интенсивность воздействия каждого из которых на окружающую среду приведена по пятибалльной системе. При этом в основе ранга рассматривается не сила сотрясения, а способность того или иного геодинамического фактора к ускорению денудации пород, ослаблению их инженерных свойств, развитию четвертичных отложений, опасных геологических процессов и, в конечном счете, ускоренному изменению геоэкологической обстановки.

Максимальный ранг воздействия отдельного фактора устанавливался на основе методологии экспертных оценок [Гольцман, 1976, 1980] в виде учета массопереноса (обвалы-осыпи, сели, оползни и т.п.), ландшафтно-геоморфологических изменений (подвижки ледников, сход лавин), длительных или краткосрочных ожидаемых последствий (тектонические, вулкано-плутонические проявления, землетрясения, сейсмодислокации). Принято, что воздействие на геоэкологическую ситуацию N факторов, каждого интенсивностью в один ранг или единичный ранг соответствует наименьшему влиянию фактора на геоэкологическое состояние, а уровень 5 ранга – наибольшему по аналогии с работами Заалишвили В.Б. [Заалишвили, 2000].

Для расчета риска R реализации воздействия использовалось следующее соотношение [Чотчаев и др., 2021]:

$$R = W \times D \quad (1)$$

где: W – суммарное, максимально возможное воздействие всех учтенных факторов $W = \sum W_{\max i}$, ранг;

D – уязвимость или геоэкологическое состояние конкретной локальной площадки, ранг;

R_i – риск проявления воздействия отдельного фактора W_i и реакция локальной площадки на воздействие данного фактора D_i , соответственно, $R_i = W_i \times D_i$, ранг.

$$R = \sum R_i \quad (2)$$

Необходимо отметить, что при оценке весового вклада геодинамического фактора, элемент субъективизма присутствует, однако чем больше факторов используется в комплексе, тем более суммарная ошибка за субъективизм приближается к минимуму.

На основе анализа результатов изучения комплекса геодинамических факторов, наблюдаемых на территории проектируемого комплекса, были разработаны две таблицы. В таблице 1 введены количественные характеристики воздействий геодинамических процессов на геоэкологическое состояние площадки, обусловленных литологическими, геоморфологическими, эндогенными, экзогенными геологическими и природно-климатическими факторами. Далее рассчитываются риски R_i проявления воздействия отдельного фактора с потенциалом W_i на площадку и ее геоэкологической уязвимостью D_i к соответствующему фактору [Чотчаев и др., 2021].

Таблица 1 / Table

Количественные характеристики воздействий геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий /
Quantitative characteristics of impacts of geodynamic processes on geo-ecological state of high-mountainous territories

№п/п	Виды воздействия / Types of impacts	Уровень воздействия / Exposure level			
		Слабый / Weak	Средний / Medium	Высокий / High	Регрессивный / Regressive
1	2	3	4	5	6
1	Землетрясения в ближней зоне ($R=50$ км), сейсмическая интенсивность, баллы / Earthquakes in the near zone ($R=50$ km), seismic intensity, points	<6	6-7	7-8	8-9
2	Зона активного нарушения (плотность нарушений, в $\text{км}/\text{км}^2$) / Active disturbance zone (disturbance density, in km/km^2)	0,01	0,02	0,03	0,04
3	Зона пересечения субширотных и субмеридиональных нарушений от одного до четырех и выше (пересечение), N / Zone of intersection of sublatitudinal and submeridional disturbances one to four and above (intersection), N	1	2	3	>3
4	Зона развития трещинной тектоники, $\text{км}/\text{км}^2$ / Fracture tectonics development zone, km/km^2	0,03	0,05	0,07	>0,07
5	Зоны, подверженные воздействию статических геофизических, геохимических полей в радиусе действия событий: 10-20; 20-30; 30-40; 40-50, R, км / Areas affected by static geophysical, geochemical fields within the event radius: 10-20; 20-30; 30-40; 40-50, R, km	3	4	5	6
6	Зоны проявления событий сейсмодислокаций в пределах структурного блока, N / Zones of manifestation of seismodislocation events within the limits of structural block, N	1	2	3	>3

7	Распространение четвертичных отложений в интервалах высот, H, м / Distribution of Quaternary sediments in height intervals, H, m	1700-2000	2000-2300	2300-2600	>2600
8	Коренные породы мягкие (до 50 МПа), обнаженность, проценты / Root rocks soft (up to 50 MPa), bareness, percent	40	50	60	>60
9	Базис эрозии 1000 м и более, на высотах от 2000 и выше, с учетом оледенения, h, м / Erosion base 1000 m and more, at altitudes from 2000 and higher, taking into account glaciation, h, m	2000-2500	2500-3000	3300-3500	3500-4000
10	Базис эрозии 500 м на высотах от 1500 и выше, h, м / Erosion base 500 m at elevations from 1500 and above, h, m	1500-1700	1700-1800	1800-1900	1900-2000
11	Базис эрозии до 500 м на высотах от 1500 м и ниже, h, м / Erosion base up to 500 m at altitudes from 1500 m and below, h, m	1300-1500	1100-1300	1000-1100	>1000
12	Рельеф с углами наклона до 15° по генетическим типам грунтов. Процессы / Relief with slope angles up to 15° by genetic soil types, processes	Обвалы – осыпи / Landslides - rockslides	Морены / Moraines	Сели / Mudflows	Оползни / Landslides
13	Рельеф с углами наклона 15-20° по генетическим типам грунтов, процессы / Relief with slope angles 15-20° by genetic types of soils, processes	Обвалы – осыпи / Landslides - rockslides	Обвалы – осыпи / Landslides - rockslides	Сели / Mudflows	Оползни / Landslides
14	Рельеф с углами наклона >20° по генетическим типам грунтов. Процессы / Relief with slope angles >20° by genetic soil types, processes	Обвалы – осыпи / Landslides - rockslides	Обвалы – осыпи / Landslides - rockslides	Сели / Mudflows	Оползни / Landslides
15	Мощность четвертичных отложений 0-5 м, при разных углах наклона рельефа, град / Quaternary sediment thickness 0-5 m, at different slope angles relief slope, deg	12-15	15-20	20-25	>25
16	Мощность четвертичных отложений 5-12 м, при различных углах наклона рельефа, град / Quaternary sediment thickness 5-12 m, at different relief slope angles, deg	12-15	15-20	20-25	>25
17	Мощность четвертичных отложений более 12 м, при различных углах наклона рельефа, град / Quaternary sediment thickness more than 12 m, at different relief slope angles, deg	12-15	15-20	20-25	>25
18	Сели за год, объемом от 10 тыс. м³ и более, N / Selye per year, volume from 10 thousand m³ and more, N	1	3	5	>5
19	Оползни за год, объем, V, м³ / Landslides per year, volume, V, m³	10	50	100	>100
20	Обвалы – осыпи, объем, V, тыс. м³ / Landslides - rockslides, volume, V, m³	75	100	150	>150
21	Плоскостной смыв, на один км², S, км² / Flat flush, per km², S, km²	0,05	0,07	0,10	>0,10
22	Эрозионная деятельность рек «боковая эрозия», 1 м/час / Erosion activity of rivers “lateral erosion”, 1 m/hour	1,0	2,5	4,0	>4,0
23	Солифлюкция при мощности захвата процессом по вертикали, h, м / Solifluction at capturing power by the process vertically, h, m	1,0	2,0	4,0	>4,0

24	Струйная эрозия на склонах с углами рельефа, град / Stream erosion on slopes with relief angles, deg	20	25	30	>30
25	Карстообразование, проявления на км ² площади, N / Karst formation, occurrences per km ² area, N	1	2	3	>3
26	Лавины, за год, N / Avalanches, per year, N	1	2	3	>3
27	Ледники и глетчеры, события паводкового типа, за год, N / Glaciers and glaciers, events of flood type, per year, N	1	2	3	>3

Таким образом, реализуется ранжирование рисков потенциала воздействий на геоэкологическое состояние высокогорных территорий по уровням их проявления от литологических, геоморфологических, эндогенных, экзогенных геологических и природно-климатического факторов или условий [Бондаренко и др., 2020; Стогний и др., 2019].

Обсуждение результатов

Участок №1 (рис. 3, обозначен белым квадратом) находится в долине реки Цариитдон в узком ущелье, сложенном коллювиальными и пролювиальными отложениями, накапливавшимися при диагенезе на коренных интрузиях кайнозоя. При сопоставлении состояния участка 1 во временном периоде 8 лет (рис. 3а, б) хорошо видно, что на космоснимке 2024 года участка 1 видны новые строения, находящиеся непосредственно в регрессивной зоне, что говорит о высоком потенциальном риске развития опасных геоэкологических процессов.

Геоэкологические нагрузки, согласно введенной ранее классификации [Чотчаев и др., 2020] на основе использования экспертных оценок, условно подразделяются на слабые, средние, высокие и регрессивные. Термин «регрессионный» был введен ранее в качестве показателя неустойчивости и опасного состояния толщи с высокой геоэкологической опасностью и риском [Чотчаев и др., 2021; Заалишвили, Чотчаев, 2022].



Рис. 3. Геоморфологические особенности участка 1: а) 2016 год, б) 2024 год /

Fig. 3. Geomorphologic features of site 1: (a) 2016, (b) 2024

Наиболее активно экзогенные процессы проявляются весной во время паводков, когда происходит активный перенос материала. При наложении карты геоэкологической нагрузки (рис. 4) хорошо видно преобладание регрессионного уровня, свидетельствующего об усиленном осадконакоплении и возможных опасных геоэкологических рисках проявления оползней и селей на участке 1.

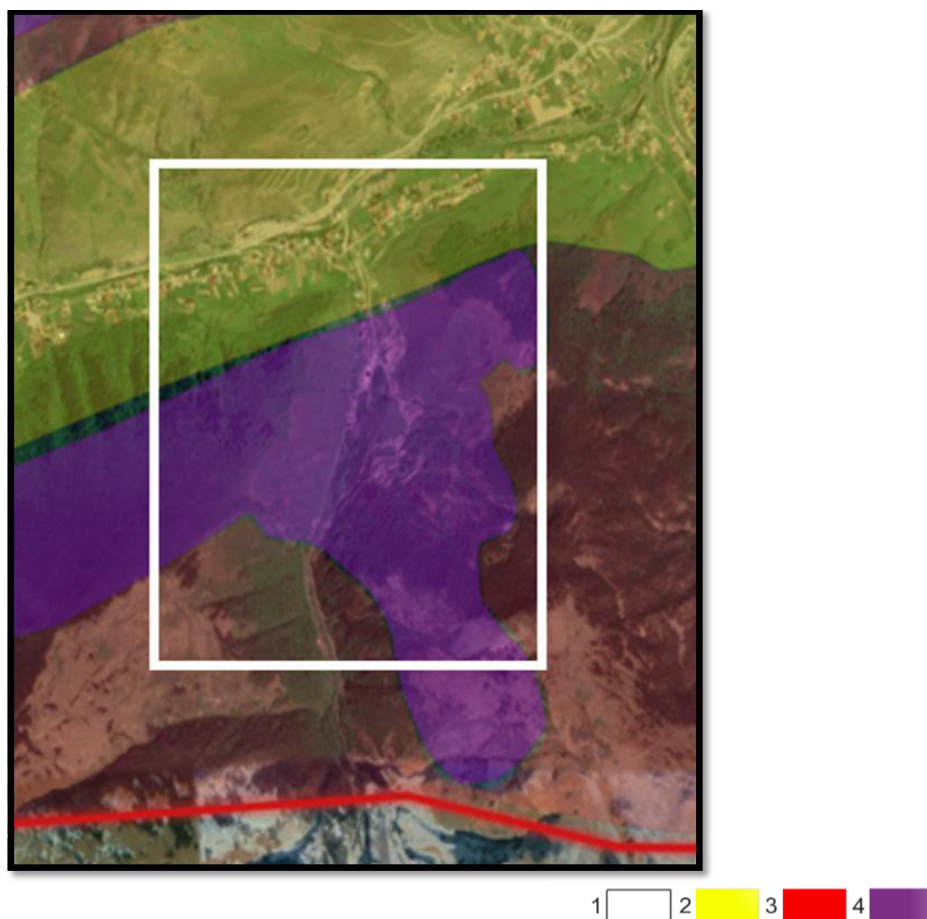


Рис. 4. Геоэкологические нагрузки на участке 1.

1 – слабая нагрузка, 2 – средняя нагрузка, 3 – высокая нагрузка,
4 – регрессивная нагрузка /

Fig. 4. Geo-ecological loads at site 1.

1 – weak load, 2 – medium load, 3 – high load, 4 – regressive load

Участок 2 находится в долине реки Фиагдон, где левый склон образовался из древних палеооползней, с начинающими свое образование эрозионными врезами, и состоит из четвертичных отложений и подстилающих их аргиллитов и алевролитов юрского периода. Палеооползни можно полагать устойчивыми, и для их активизации необходима аккумуляция много большего объема осадочного материала и более активная эрозия вдоль подошвы оползня. На космоснимках участка 2 за 2024 г. (рис. 5) хорошо видно, что появилось большое число новых строений, склоны палеооползней подрезаны дорогами и застройками, в некоторых местах вдоль эрозионных врез, тем самым нарушая естественный эрозионный процесс, и соответственно ускоряя его.



Рис. 5. Геоморфологические особенности участка 2: а) 2016 год, б) 2024 год /

Fig. 5. Geomorphologic features of site 2: (a) 2016, (b) 2024

При наложении на космоснимок соответствующих факторов геоэкологической нагрузки (рис. 6) видно, что участок находится в средней зоне по уровню геоэкологической нагрузки, соответствующей расположению палеоползней, что может говорить о возможной активизации процессов при аномальных метеорологических условиях (сильные продолжительные дожди, паводки, увеличение уровня рек).

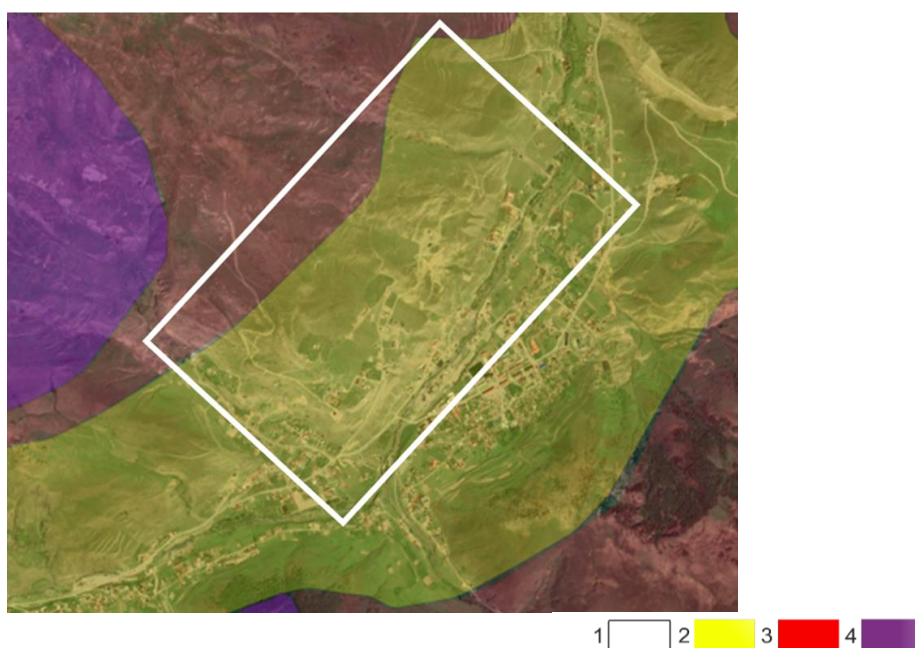


Рис. 6. Геоэкологические нагрузки на участке 2.

1 – слабая нагрузка, 2 – средняя нагрузка, 3 – высокая нагрузка, 4 – регрессивная нагрузка /

Fig. 6. Geo-ecological loads at site 2.

1 – weak load, 2 – medium load, 3 – high load, 4 – regressive load

Таким образом, на участках с дополнительными к природным антропогенными и техногенными воздействиями зона со слабой нагрузкой отсутствует (рис. 4 и 6) [Заалишвили, Чотчаев, 2022].

Климат в последние десятилетия заметно меняется, находясь, очевидно, на пути к очередному повышению температур. Так, если в 1968 г. максимальная температура, например, в г. Махачкале составляла 38 °С, а в 1983 г. она упала до 34 °С, то к 2020 году температура вновь повысилась до 40 °С. Аналогично ведет себя среднее значение температуры, например, в г. Ставрополе. Так, в теплый период 1952 г. (апрель–октябрь) ее значение составило 18 °С, а с 1953 до 1990 - 16 °С, то к 2020 г. температура вновь повысилась, и в среднем составила 19 °С. Необходимо отметить, что почти аналогично ведут себя колебания средней температуры и в холодное время года (ноябрь–март) [Глобальное ..., 2021].

Горные массивы не только влияют на климат, но и сами зависят от него. Более того, горные регионы одними из первых реагируют на изменения климатических условий. При этом основным индикатором изменения климата в горах являются ледники, которые уменьшаются или увеличиваются в объеме. Таким надежным индикатором, в частности, являются ледники Северной Осетии [Ледник Колка ..., 2014]. Указанные изменения, очевидно, непосредственно влияют на увеличение геоэкологической нагрузки (удлинение сезона паводков), что является негативным фактором. Таким образом, большое значение начинает обретать климатический фактор.

Для безопасного использования инфраструктуры необходимо оценивать уровень воздействия геодинамической активности геотектонических и геоморфологических структур на этих территориях с помощью новейших программ для создания 3D-моделей и анализа ситуации на территориях (Scoops3D и т.д.) [Мельков, Реватов, 2021]. Для строительства в горном регионе необходимо проводить детальные геофизические исследования и геолого-инженерные изыскания, что позволит исключить катастрофические последствия при возможной активизации экзогенных и иных процессов.

Выводы

1. Территория Северной Осетии характеризуется целым рядом опасных геологических процессов (вулканы, землетрясения, ледники, оползни, лавины, наводнения и др.). Активное развитие туризма на Северном Кавказе, создание новых горных маршрутов для автотранспорта, застройка ранее неиспользуемых горных территорий, обуславливают стремительное увеличение уровня антропогенного и техногенного воздействия и, соответственно, геодинамического воздействия, обуславливая повышение геоэкологической опасности и риска в горных регионах. Это обуславливает необходимость их детального изучения.

2. Эндогенная активность является причинным фактором активизации экзогенных процессов и одним из признаков этого является устойчивая приуроченность последних к тектоническим нарушениям и узлам разноранговых разрывных структур, очаговым зонам сейсмической и вулканоплутонической активности.

3. На горные регионы значительное влияние оказывают различные проявления техногенных воздействий. Такие дополнительные к природным антропогенные и техногенные воздействия исключают слабые геоэкологические нагрузки. Обособленное воздействие техногенных процессов как частного фактора антропогенеза, способствующего негативному воздействию на ландшафт и геоморфологические структуры, а также на геологические условия территории, повышает уровень геоэкологической напряженности вплоть до опасного.

4. Горные массивы не только влияют на климат, но и сами зависят от него. Более того, горные регионы одними из первых реагируют на изменения климатических условий. При этом основным индикатором изменения климата в горах являются ледники, которые уменьшаются или увеличиваются в объеме. Таким надежным индикатором, в частности, являются ледники Северной Осетии.

5. Для безопасного использования разрабатываемой инфраструктуры необходимо выявление факторов, формирующих уровень воздействия геодинамических процессов. При инженерно-геологических изысканиях рекомендовать установление глубинных причинно-следственных связей на исследуемой площадке между воздействиями геодинамических процессов и геоэкологическими рисками, что позволит смягчить или исключить при проведении практического строительства катастрофические последствия, обусловленные возможной активизацией экзогенных процессов.

6. Экспертная оценка ожидаемого уровня геоэкологического риска предполагает возможность прогнозирования опасных геологических процессов и является основой для разработки и организации необходимых мероприятий по смягчению тяжести возможных последствий развития опасных природных процессов и проявления опасных экзогенных процессов: оползней, селей, обвалов при строительстве.

Литература

1. Агибалова В.В. Сели в Северной Осетии. Орджоникидзе: Ир, 1983. – 115 с.
2. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций РФ. Южный федеральный округ. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2007. – 384 с.
3. Бондаренко Н.А., Любимова Т.В., Стогний В.В. Интегральная оценка потенциальных геологических рисков Краснодарского края. // ИНТЕРКАРТО. ИНТЕРГИС. – 2020. – Т. 26. № 2. – С. 188–200.
4. Бурдзиева О.Г., Мельков Д.А., Ревазов М.О. Модели протекания опасных геологических процессов и оценка ожидаемых масштабов их проявления. // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». М.: ИИЕТ РАН, 2023. – С. 229–236.
5. Глобальное изменение климата и Северо-Кавказский федеральный округ. На пути к адаптации. Климатический центр Росгидромета. С.–Пб.: Наукоемкие технологии, 2021. – 12 с.
6. Гольцман Ф.М. Информационная содержательность эксперимента и учет корреляции нечисловых признаков при распознавании геофизических объектов. // Физика Земли. – 1980. – № 10. – С. 71–85.
7. Гольцман Ф.М. Комплексирование наблюдений при распознавании геофизических объектов. // Физика Земли. – 1976. – № 7. – С. 40–54.
8. Гончаренко О.А., Заалишвили В.Б., Караев Ю.И., Никитин М.Ю. Опасные геологические процессы Северного Кавказа. // В сборнике: Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А, 2008. – С. 160–166.
9. Заалишвили В.Б. Методологические аспекты сейсмического микрорайонирования. // Теория сооружений и сейсмостойкость. ИСМИС им. К.С. Завриева АН Грузии. – Тбилиси, 2000. – С. 182–188.
10. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – 230 с.
11. Ледник Колка: вчера сегодня, завтра: монография. / Отв. редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А, 2014. – 432 с.

12. Мельков Д.А., Ревазов М.О. Оценка потенциальной оползневой опасности территории РСО-Алания по геоморфологическим и геологическим данным. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2021. – № 2 (85). – С. 48–54.
13. Стогний В.В., Стогний Г.А., Волкова Т.А., Любимова Т.В. Геоэкологические риски Северо-Западного Кавказа и их оценка. // Материалы VII Международной конференции «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии». Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2019. – С. 768–772.
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.
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.
16. Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Геолого-геофизическая система «тектоника-сейсмичность» уникального Хаилинского центра высокомагнитудного роя. Юго-запад Корякского сейсмического пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 4. – С. 49–62.
17. Hamzehloo H., Vaccari F., Panza G.F. Towards a reliable seismic microzonation in Tehran, Iran. // *Engineering Geology*. – 2007. – Vol. 93. – pp. 1–16.
18. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2019. – Vol. 9. No. 2. – pp. 109–126.
19. Walling M.Y., Mohanty W.K. An overview on the seismic zonation and microzonation studies in India. // *Earth-Science Reviews*. – 2009. – Vol. 96. – pp. 67–91.
20. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Shempelev A.G., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Parada S.G., Dzeranov B.V., Dzhgamadze A.K. Geodynamic situation in Central Caucasus and structural complexes on depth section of Genaldon profile. // *Advances in Engineering Research*. (CIGGG 2018). – 2019. – Vol. 182. – pp. 1–7.
21. Zaalishvili V.B., Gogmachadze S.A. Geomorphological aspects of earthquake intensity effect in highlands earthquake hazard and seismic risk reduction. Kluwer academic Publishers. – Dordrecht/Boston/London, 2000. – pp. 137–144.

References

1. Agibalova V.V. Mudflows in North Ossetia. Ordzhonikidze. Ir. 1983. 115 p.
2. Atlas of natural and technogenic hazards and risks of emergency situations of the Russian Federation. Southern Federal District. Moscow. Design. Information. Cartography. 2007. 384 p.
3. Bondarenko N.A., Lyubimova T.V., Stogniy V.V. Integrated assessment of potential geological risks in the Krasnodar Region. INTERCARTO. INTERGIS. 2020. Vol. 26. No. 2. pp. 188–200.
4. Burdzieva O.G., Melkov D.A., Revazov M.O. Models of dangerous geological processes and assessment of the expected scale of their manifestation. // In: Proceedings of the XIII All-Russian Sc. and Tech. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Moscow. IIET RAS. 2023. pp. 229–236.
5. Global climate change and the North Caucasian Federal District. On the way to adaptation. Climate Center of Roshydromet. Saint Petersburg. Science-intensive technologies. 2021. 12 p.
6. Goltsman F.M. Information content of the experiment and consideration of correlation of non-numerical features in the recognition of geophysical objects. *Physics of the Earth*. 1980. No. 10. pp. 71–85.
7. Goltsman F.M. Compiling observations in recognizing geophysical objects. *Physics of the Earth*. 1976. No. 7. pp. 40–54.
8. Goncharenko O.A., Zaalishvili V.B., Karaev Y.I., Nikitin M.Y. Dangerous geologic processes of the North Caucasus. In: Proc. Dang. nat. and tech. geological processes in mountainous

and foothill areas of the North Caucasus. Vladikavkaz. CGI VSC RAS and RNO-A. 2008. pp. 160–166.

9. Zaalishvili V.B. Methodological aspects of the seismic microzonation. Theory of Structures and Earthquake Resistance. ISMIS named after K.S. Zavriev. Academy of Sciences of Georgia. Tbilisi. 2000. pp. 182–188.

10. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high-mountain territories. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. 230 p.

11. The Kolka Glacier: past, present, future. Eds. Y.G. Leonov, V.B. Zaalishvili. Vladikavkaz. CGI VSC RAS and RNO-A. 2014. 432 p.

12. Melkov D.A., Revazov M.O. Assessment of potential landslide hazard of the territory of RNO-Alania based on geomorphologic and geologic data. Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS. 2021. No. 2(85). pp. 48–54.

13. Stogniy V.V., Stogniy G.A., Volkova T.A., Lyubimova T.V. Geoecological risks of the North-West Caucasus and their assessment. In: Proc. of the VII Int. Conf. Dang. nat. and tech. processes in mountain regions: models, systems, technologies. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2019. pp. 768–772.

14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high-mountainous areas. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70–100.

15. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high-mountain territories by geoecological loads caused by geodynamic and climatic impacts. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94.

16. Yarotskii G.P., Chotchaev Kh.O. Geological and geophysical system “tectonics-seismicity” of the unique Khailinsk center of high-magnitude swarm. South-west of the Koryak seismic belt. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 49–62.

17. Hamzehloo H., Vaccari F., Panza G.F. Towards a reliable seismic microzonation in Tehran, Iran. Engineering Geology. 2007. Vol. 93. pp. 1–16.

18. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 2. pp. 109–126.

19. Walling M.Y., Mohanty W.K. An overview on the seismic zonation and microzonation studies in India. Earth-Science Reviews. 2009. Vol. 96. pp. 67–91.

20. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Shempelev A.G., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Parada S.G., Dzeranov B.V., Dzhgamadze A.K. Geodynamic situation in Central Caucasus and structural complexes on depth section of Genaldon profile. Advances in Engineering Research. (CIGGG 2018). 2019. Vol. 182. pp. 1–7.

21. Zaalishvili V.B., Gogmachadze S.A. Geomorphological aspects of earthquake intensity effect in highlands earthquake hazard and seismic risk reduction. Kluwer academic Publishers. Dordrecht/Boston/London. 2000. pp. 137–144.

УДК 528.8:582.091

DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

Оригинальная статья

Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»)

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

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный,
пр. Х. Исаева, 100, e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Статья поступила: 11.09.2024, доработана: 05.11.2024, принята к публикации: 06.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Данная статья посвящена собственным результатам получения и обработки данных мультиспектральной, лидарной и аэрофотограмметрической съемок сверхвысокого разрешения. В статье представлены результаты оценки древостоя (высота и объем крон деревьев), состояния растительного покрова в периоды начала и спада вегетации, и рельефа местности по материалам указанных съемок с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Геоскан 401. Использование БПЛА для мониторинга лесов на сегодняшний день является одним из самых актуальных и быстроразвивающихся направлений слежения за состоянием лесного покрова. **Цель исследования.** Целью исследования было получение качественного ортофотоплана, цифровой модели рельефа (ЦМР), карт растительности (NDVI), а также картограмм максимальных и средних значений высот и объемов крон деревьев, которые в дальнейшем будут использованы при решении задачи оценки потоков парниковых газов. **Методы исследования.** В качестве полезной нагрузки к БПЛА применены лазерный сканер АГМ МС 1.2, цифровая мультиспектральная камера высокой производительности Geoscan Pollux и фотоаппарат Sony. Съемки проведены в прошлом году на участке «Рошни-Чу» Карбонового полигона Чеченской Республики. Исследуемый участок покрыт, преимущественно, широколиственными лесами, имеет площадь около 243 га и относится к переходному типу от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-лугово-кустарниковому подтипу. Отличительную особенность растительного покрова составляют дикорастущие виды плодовых деревьев и кустарников. Мультиспектральная съемка производилась с высоты 229 метров, лидарная съемка – с высоты 120 метров. Полученные в процессе съемок качественные исходные материалы обработаны в программах Agisoft Metashape и LiDAR 360, краткое описание которых также дается в данной статье. **Результаты исследования.** Представлен конечный результат в виде ортофотоплана и ЦМР, карт вегетационного индекса NDVI, картограмм высот деревьев и объемов их крон. Анализ карт NDVI, построенных в начале и конце вегетации, показал, что индексы растительности на исследуемом участке находятся в диапазоне значений, характерном для здоровых лиственных деревьев.

Ключевые слова: мультиспектральная съемка, лидарная съемка, БПЛА, NDVI, участок «Рошни-Чу».

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № FZNU-2024-0002.

Для цитирования: Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 180-191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

Original paper

Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site “Roshni-Chu”)

I.A. Kerimov , A.S. Elzhaev , A.A. Doduev 

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 Ave. Kh. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Received: 11.09.2024, revised: 05.11.2024, accepted: 06.11.2024

Abstract: Relevance. This article is devoted to our own results of obtaining and processing data from multispectral, lidar and aerial photogrammetric ultra-high resolution surveys. The article presents the results of assessing the forest stand (height and volume of tree crowns), the state of the vegetation cover during the periods of the beginning and decline of the growing season, and the terrain based on the materials of the specified surveys using an unmanned aerial vehicle (UAV) Geoscan 401. The use of UAVs for forest monitoring today is one of the most relevant and rapidly developing areas for monitoring the state of forest cover. **Aim.** The purpose of the study was to obtain a high-quality orthophotoplan, digital elevation model (DEM), vegetation maps (NDVI), as well as cartograms of maximum and average heights and volumes of tree crowns, which later will be used to solve the problem of estimating greenhouse gas flows. **Methods.** An AGM MS 1.2 laser scanner, a Geoscan Pollux high-performance digital multispectral camera and a Sony camera were used as payloads for the UAV. Filming was carried out this year at the Roshni-Chu site of the Carbon Polygon of the Chechen Republic. The studied area is covered mainly by deciduous forests, has an area of about 243 hectares and belongs to the transitional type from low-mountain landscapes of the mountain forest zone to the mountain-valley forest-meadow-shrub subtype. A distinctive feature of the vegetation cover is wild species of fruit trees and shrubs. Multispectral photography was carried out from a height of 229 meters, lidar photography - from a height of 120 meters. The high-quality source materials obtained during the filming process were processed in the Agisoft Metashape and LiDAR 360 programs, a brief description of which is also given in this article. **Results.** The final result is presented in the form of an orthophotomap and DEM, maps of the NDVI vegetation index, cartograms of tree heights and the volume of their crowns. Analysis of NDVI maps constructed at the beginning and end of the growing season showed that vegetation indices in the studied area are in the range of values typical for healthy deciduous trees.

Keywords: multispectral survey, lidar survey, UAV, NDVI, Roshni-Chu site.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of a state assignment No. FZNU-2024-0002.

For citation: Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site “Roshni-Chu”). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(4): 180-191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

Введение

В мире наблюдается устойчивая тенденция развития рынка беспилотных авиационных систем (БАС) [Домрачев, Ануфриев, 2019; Рис, 2006; Измestьев, 2017; Jiao et al., 2021] и активного использования беспилотных технологий в экономике для решения различных задач [Друзь и др., 2023]. Так, с 2018 года

среднегодовой темп роста мирового рынка беспилотных авиационных систем составил 21 %.

В России развитие рынка беспилотных авиационных систем началось только в начале XXI века, хотя первые БАС для гражданских целей появились еще в 1960–1970 годах. С 2018 по 2024 годы рост российского рынка в среднегодовом выражении увеличился более чем на 27 процентов.

Спрос на услуги с применением беспилотных авиационных систем наблюдается в геологоразведке и добыче полезных ископаемых, строительстве, сельском и лесном хозяйствах, топливно-энергетическом комплексе и др.

Государственный сектор вносит существенный вклад в использование беспилотных авиационных систем и предоставление услуг с их применением. С 2018 по 2022 годы в рамках государственных закупок было заключено почти 2 тыс. контрактов на сумму более 13 млрд рублей. 26 % заказчиков относятся к сфере науки и образования («Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года». Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р).

На участках Карбонового полигона Чеченской Республики [Керимов и др., 2021] сбор и передача данных, дистанционный мониторинг осуществляются, в основном, с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Геоскан 401. Данный БПЛА – отечественный комплекс с встроенным GNSS-приемником, снимки с которого позволяют создавать точные геопривязанные ортофотопланы и 3D-модели. В качестве полезной нагрузки к БПЛА нами используются лазерный сканер АГМ МС 1.2 с инерциальной системой ПС.М-33, цифровая мультиспектральная камера высокой производительности Geoscan Pollux, фотоаппарат Sony ZV-e10 с креплением к АГМ-МС.

Вид и методика исследования

На участке «Рошни-Чу», краткая информация о котором представлена в табл. 1, с целью получения качественного ортофотоплана, цифровой модели рельефа (ЦМР), карты индекса растительности (NDVI), а также информации о древостое в прошлом году нами проведены лидарная и мультиспектральная съемки в мае (период начала вегетации) и в октябре (конец вегетационного периода). Участок «Рошни-Чу» покрыт, преимущественно, широколиственными лесами, имеет площадь около 243 га и относится к переходному типу от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-лугово-кустарниковому подтипу. Отличительной особенностью растительного покрова является присутствие диких плодовых видов древесной и кустарниковой растительности [Керимов и др., 2021].

Мультиспектральная съёмка проводилась на высоте 229 м с разрешением 10.1 см/пикс. Скорость полёта – 10 м/с. Площадь покрытия съёмкой составила 3,43 км². Во избежание разрывов местности на снимках съёмка производилась с перекрытием: продольное перекрытие снимков составляло 80 %, поперечное – 60 %.

Использованная нами мультиспектральная камера Geoscan Pollux позволила вести съёмку одновременно в пяти узких (12–40 нм) диапазонах. Помимо основных каналов видимого спектра (синего, красного и зеленого) камера способна регистрировать дальний красный и ИК спектры, что позволяет рассчитывать различные индексы вегетации: SAVI, NDVI, NDRE, LAI и др. Всего получено 12210 снимков, обработка которых осуществлялась в программе Agisoft Metashape (Руководство поль-

зователя: Professional Edition, версия 1.8). ПО Agisoft Metashape позволяет обрабатывать изображения в видимом диапазоне RGB, мультиспектральные снимки, а также структурированные облака точек лазерных отражений (ТЛО) и неструктурированные облака ТЛО аэросъёмки. Результаты обработки представляют собой различные типы пространственных данных: облака точек, текстурированные полигональные модели, ортофотопланы и цифровые модели местности [Курков и др., 2021].

Для визуализации и практического применения материалов мультиспектральной съемки используются разные индексы [Bannari et al., 1995; Jiao et al., 2021; Silleos et al., 2006; Vidican et al., 2023]. Состояние растительности определяется с помощью вегетационных индексов, наиболее распространённым из которых является нормализованный вегетационный индекс (NDVI), впервые введенный в 1973 году [Rouse, 1973]. NDVI предназначен для определения количества фотосинтетически активной биомассы [Гутовский и др., 2019; Asrar et al., 1984; Filgueiras et al., 2019; Khan et al., 2024].

Таблица 1 / Table 1

**Характеристика эталонного участка «Рошни-Чу» /
Characteristics of the reference site “Roshni-Chu”**

Географические координаты/ Geographic coordinates	северная граница/ northern border	южная граница/ southern border	восточная граница/ eastern border	западная граница/ western border
	45.433733 ВД/ EL 43.067742 СШ/ NL	45.427040 ВД/ EL 43.037827 СШ/ NL	45.437365 ВД/ EL 43.066476 СШ/ NL	45.419490 ВД/ EL 43.054111 СШ/NL
Площадь, га/ Area, ha	243			
Абсолютные высотные отметки, м/ Absolute elevations, m	Минимальная / minimum		Максимальная / maximum	
	418		550	
Тип ландшафта/ Type of landscape	Низкогорные ландшафты горнолесной зоны представлены смешанными лесами. Основа этих лесов – дикие фруктовые деревья с хорошо сомкнутыми буково-грабовыми лесами. Территория сложена, в основном, песчано-глинистыми, сланцевыми и известняковыми отложениями палеоген-неогеновой системы / Low-mountain landscapes of the mountain forest zone are represented by mixed forests. The basis of these forests is wild fruit trees with well-closed beech and hornbeam forests. The territory is composed mainly of sandy-clayey, shale and limestone deposits of the Paleogene-Neogene system			
Тип растительности/ Vegetation type	Растительность представлена дубом, ольхой черной и бородавчатой, кленом полевым, буком восточным, грабом кавказским. Отличительную особенность растительного покрова составляют дикие плодовые виды древесной и кустарниковой растительности / The vegetation is represented by oak, black and warty alder, field maple, eastern beech, and Caucasian hornbeam. A distinctive feature of the vegetation cover is wild fruit species of trees and shrubs.			
Тип почвы/ Soil type	Преобладают горнолесные бурые, местами оподзоленные почвы в сочетании с перегнойно-карбонатными и лугово-аллювиальными почвами / Mountain forest brown, locally podzolized soils predominate in combination with humus-carbonate and meadow-alluvial soils			

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) проводилось с целью получения точных и детальных ЦМР эталонного участка «Рошни-Чу» и построения карт высот

деревьев и объема крон для последующего определения количественных значений этих параметров. ВЛС обеспечивает быстрое получение точных и детальных цифровых моделей местности [Кочнева, Мальченко, 2017; Kim et al., 2022], в том числе и труднодоступной, для последующего картографирования растительного покрова и проведения измерений высоты деревьев, объема биомассы и других измерений.

Лазерное сканирование (лидарная съемка) осуществлялось одновременно с цифровой аэрофотосъемкой, что позволило создать трехмерную точечную модель (облако точек), состоящую из массива точек лазерных отражений (ТЛО) плотностью до нескольких сотен точек на 1 м² и точностью определения их координат до 5 см в плане и по высоте. Данные аэрофото- и лидарной (ВЛС) съемок обрабатывались в программе LiDAR 360. ПО LiDAR 360 – это комплексное программное обеспечение для постобработки облаков точек с инструментами визуализации, редактирования и создания значимых геопространственных данных.

Материалы, полученные по данным вышеописанных съемок, успешно используются при моделировании потоков парниковых газов [Ольчев и др., 2023; Dagg, Lafleur, 2010; Nikosaka, Tsujimoto, 2021].

Результаты исследования

После загрузки снимков в программу и их выравнивания было построено плотное облако точек для лучшей детализации рельефа и построения модели местности. В результате получен ортофотоплан изучаемого участка (рис. 1).

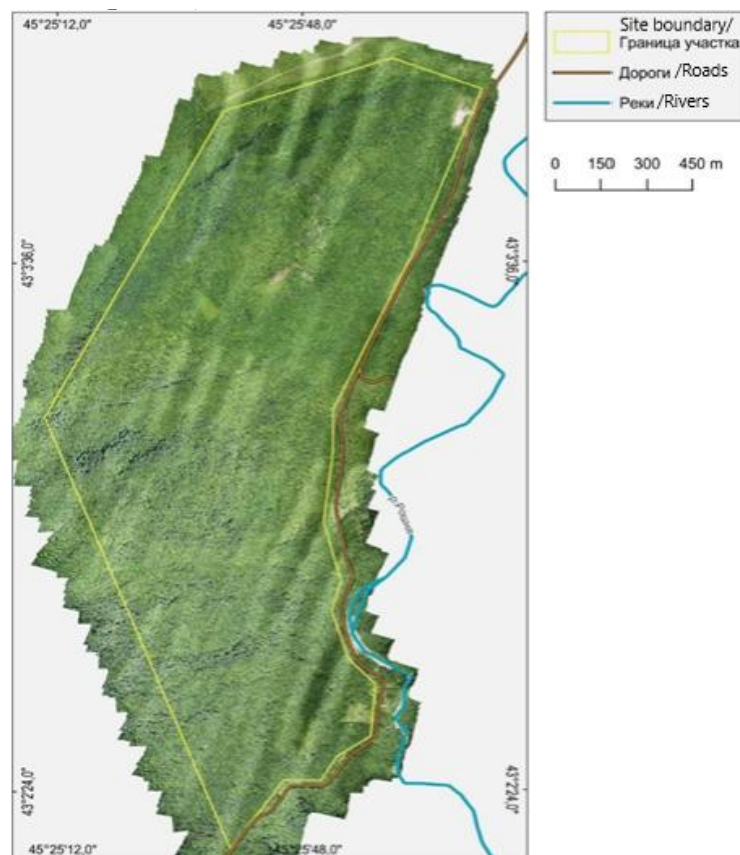


Рис. 1. Ортофотоплан участка «Рошни-Чу» /

Fig. 1. Orthophotomap of the “Roshni-Chu” site

Нами был рассчитан индекс NDVI и построены карты для оценки активности вегетации растений (рис. 2, 3).

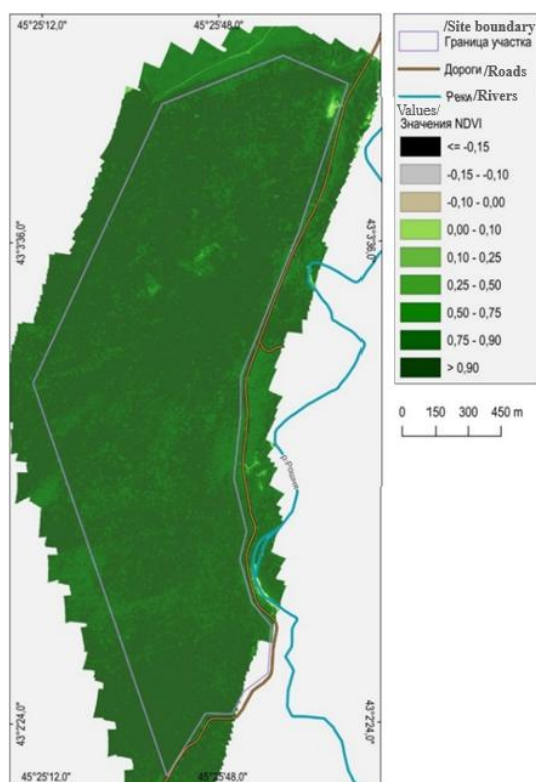


Рис. 2. Карта NDVI (май, 2023 г.) /
Fig. 2. NDVI Map (May, 2023)

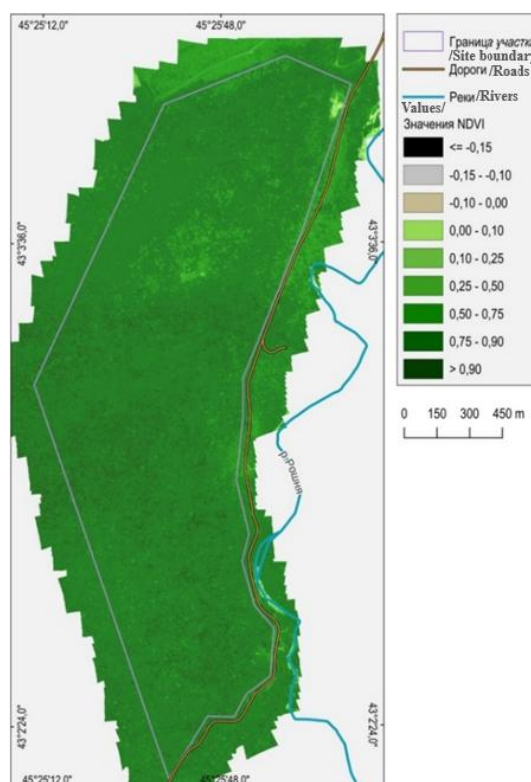
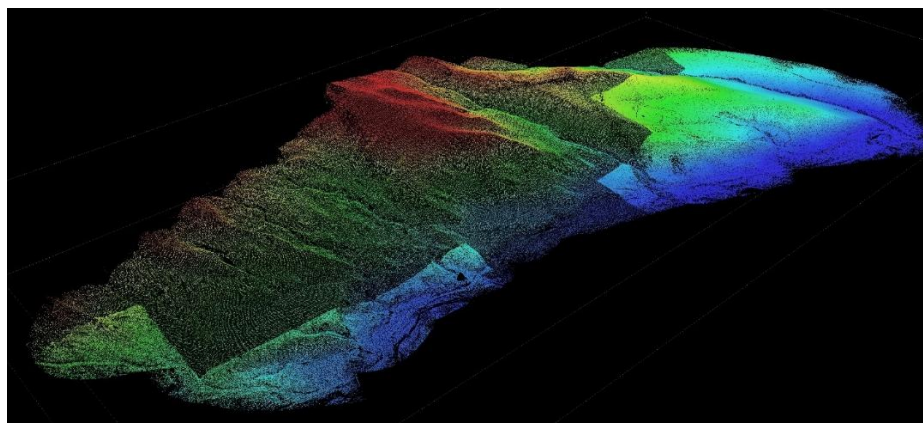


Рис. 3. Карта NDVI (октябрь, 2023 г.) /
Fig. 3. NDVI map (October, 2023)

На рисунке 2 представлена карта NDVI, построенная по данным мультиспектральной съемки, проведенной в мае 2023 года. Из рисунка видно, что на участке «Рошни-Чу» преобладают высокие значения индекса NDVI, характерные для физиологически здоровой зеленой лиственной растительности и укладывающиеся в диапазон 0,75–0,90. Значения получены в начале периода максимальной вегетации. На рисунке 3 представлена карта NDVI, построенная по данным мультиспектральной съемки, проведенной в октябре 2023 года на том же участке. Здесь прослеживается уменьшение значений индекса NDVI, что закономерно связано с осенним спадом вегетационной активности растений. Значения преимущественно находятся в диапазоне 0,25–0,50. Следует отметить, что на исследуемом участке растительность распределена с довольно однородной плотностью при отсутствии значительных по площади оголенных участков земли.

В результате совместного использования лазерного сканирования и аэрофотосъемки получен массив точек лазерных отражений (ТЛО), представленный в данной статье в виде трехмерной точечной модели (рис. 4).

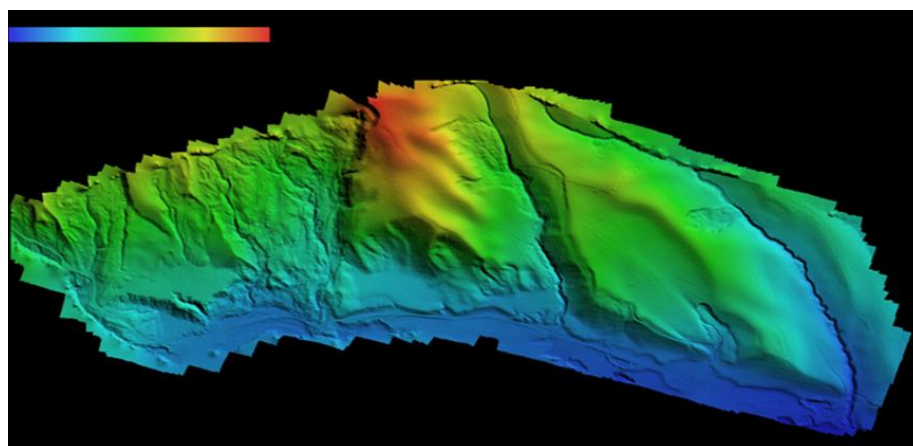
Дальнейшая обработка включала автоматическую классификацию ТЛО с использованием таких модулей программы LiDAR360 как Forestry и Terrain. Получены трехмерные цифровые модели рельефа. На рис. 5 представлена 3D модель рельефа, обработанная в модуле Forestry, на рис. 6 – в модуле Terrain.



*Рис. 4. Трехмерная точечная модель участка /
Fig. 4. Three-dimensional point model of the site*



*Рис. 5. Трехмерная модель участка с учетом лесной растительности /
Fig. 5. Three-dimensional model of the site taking into account forest vegetation*



*Рис. 6. Цифровая модель рельефа /
Fig. 6. Digital elevation model*

Произведены расчеты высоты деревьев и объема крон. Территория эталонного участка «Рошни-Чу» была разбита на шестиугольные ячейки размером 50х50 м, затем для каждой из ячеек считывались максимальное и среднее значения высоты деревьев и объема крон (рис. 7–10).

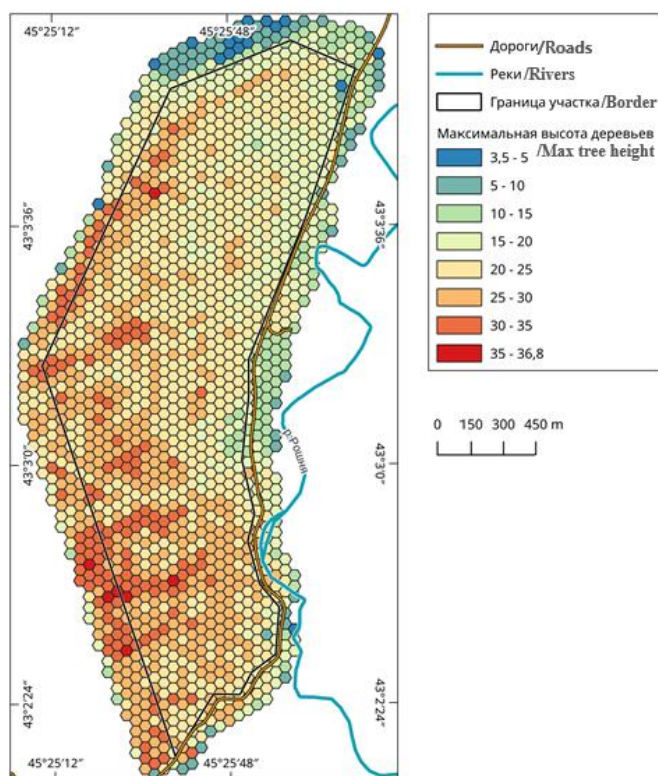


Рис. 7. Максимальные значения высоты деревьев /

Fig. 7. Maximum tree heights

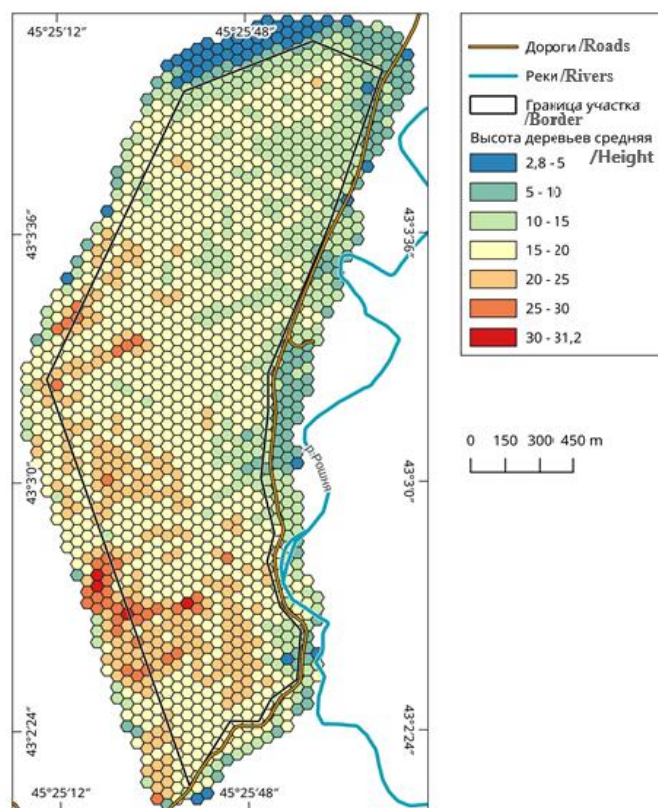
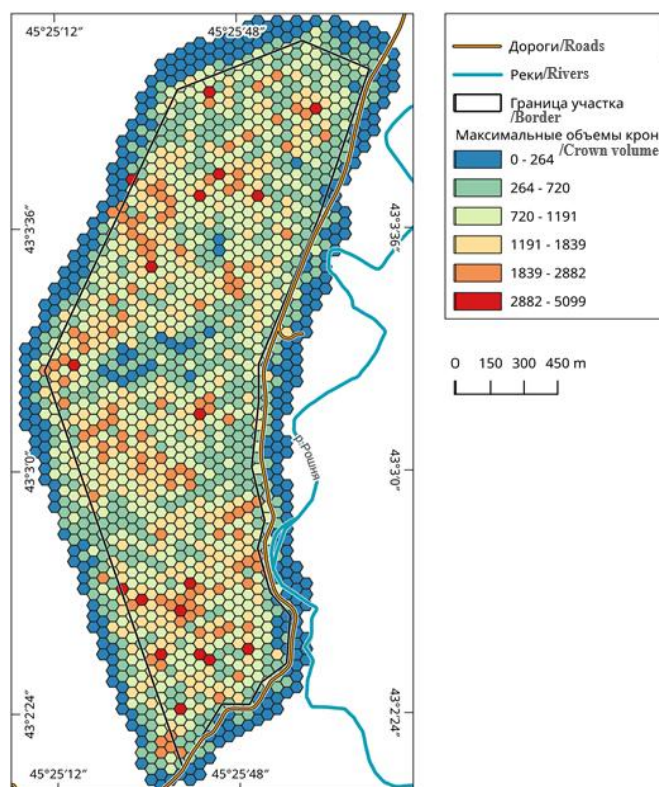
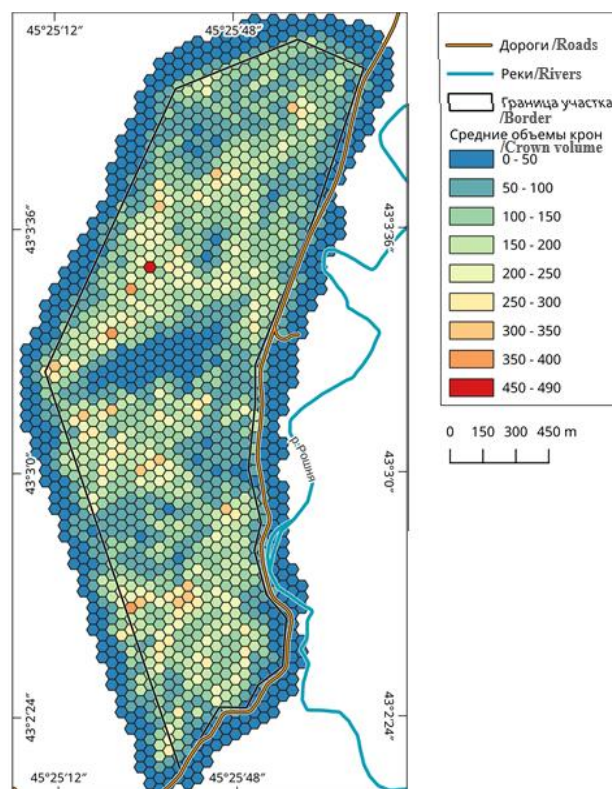


Рис. 8. Средние значения высоты деревьев /

Fig. 8 Average tree heights

*Рис. 9. Максимальные значения объема крон /**Fig. 9. Maximum volumes of crowns**Рис. 10. Средние значения объема крон /**Fig. 10. Average volumes of crowns*

На рис. 7 представлена картограмма максимальных высот деревьев, из которой видно, что на участке преобладают деревья с фактическими значениями высот 20–30 м. На рис. 8 представлена картограмма со средними значениями высот.

Выводы

По результатам мультиспектральных съемок с использованием БПЛА Геоскан 401, проведенных в начале активной вегетации деревьев и в период спада их вегетационной активности, построены карты NDVI, из которых видно, что спектральные значения на эталонном участке «Рошни-Чу» находятся в диапазонах 0,75–0,90 (в период активной вегетации) и 0,25–0,50 (в конце вегетации) и характерны для здорового лиственного древостоя.

По результатам ВЛС построены детальные модели рельефа, рассчитаны количественные показатели высоты деревьев и объема крон. Сделан вывод о репрезентативности полученных в ходе ВЛС данных о высоте деревьев и объеме крон. На участке «Рошни-Чу» преобладают деревья со значениями высот 20–30 м.

Литература

1. Гутовский Д.А., Каменев Д.С., Хрущёва Е.О. Обработка мультиспектральных данных аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата SOVZOND AIR-CON 3. // Материалы республиканского научно-практического семинара студентов и молодых ученых «ГИС-технологии в науках о Земле». / Отв. ред. Н.В. Жуковская. – 2019. – С. 114–117.
2. Домрачев А.А., Ануфриев М.А. Основы дистанционного зондирования Земли (на примере ENVI4.8): Практикум. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. – 154 с.
3. Друзь Р.А., Протасова А.В., Охунов Ш.Р., Кшановская А.В. Сравнительная оценка воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 130–141.
4. Измestьев А.Г. Фотограмметрия и дистанционные методы земли: учебное пособие. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – 119 с.
5. Керимов И.А., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. № 3(25). – С. 35–47.
6. Кочнева А.А., Мальченко Е.Л. Оценка качества цифровых моделей рельефа, построенных по данным воздушного лазерного сканирования. // Сборник научных трудов по материалам VI международной научной конференции «Научные тенденции: вопросы точных и технических наук». СПб.: ЦНК МНИФ «Общественная наука». – 2017. – С. 48–51.
7. Курков М.В., Клестов Д.А., Брусило В.А., Курков В.М., Киселева А.С. Опыт применения комплекса «Геоскан 401 лидар» в качестве беспилотной топографической системы воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки. // Геопрофи. – 2021. – № 6. – С. 17–23.
8. Ольчев А.В., Мухартова Ю.В., Керимов И.А., Гибадуллин Р.Р. 3D-гидродинамическое моделирование потоков CO₂ и CH₄ в приземном слое атмосферы (На примере лесного участка «Рошни-Чу»). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 408–418.
9. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
10. Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. // Agronomy Journal. – 1984. – Vol. 76. No. 2. – pp. 300–306.
11. Bannari A.A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. A review of vegetation indices. // Remote Sensing Reviews. – 1995. – Vol. 13. No. 1. – pp. 95–120.

12. Dagg J., Lafleur P. An application of plot-scale NDVI in predicting carbon dioxide exchange and leaf area index in heterogeneous subarctic tundra. // *Canadian Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 36(S1). – pp. 111–123.
13. Filgueiras R., Mantovani E.C., Althoff D., da Cunha F.F., Fernandes Filho E.I. Crop NDVI monitoring based on Sentinel 1. // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – Art. No. 1441.
14. Hikosaka K., Tsujimoto K. Linking remote sensing parameters to CO₂ assimilation rates at a leaf scale. // *Journal of Plant Research*. – 2021. – Vol. 134. No. 4. – pp. 1–17.
15. Jiao W., Wang L., McCabe M.F. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. // *Remote Sensing of Environment*. – 2021. – Vol. 256. No. 8. – Art. No. 112313.
16. Kim M., Stoker J., Irwin J., Danielson J., Park S. Absolute accuracy assessment of lidar point cloud using amorphous objects, USA. // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. No. 19. – Art. No. 4767.
17. Khan M.N., Tan Yu., Gul A.A., Abbas S., Wang J. Forest aboveground biomass estimation and inventory: evaluating remote sensing-based approaches. // *Forests*. – 2024. – Vol. 15. No. 6. – Art. No. 1055.
18. Rouse J.W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFCT. Type II Report. Greenbelt: Maryland, 1973. – 87 p.
19. Silleos N.G., Alexandridis T.K., Gitas I.Z., Perakis K. Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. // *Geocarto International*. – 2006. – Vol. 21. No. 4. – pp. 21–28.
20. Vidican R., Mălinaş A., Ranta O., Moldovan C., Marian O. et al. Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: a critical review. // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13. No. 12. – Art. No. 3040.

References

1. Gutovsky D.A., Kamenev D.S., Khrushcheva E.O. Processing of multispectral aerial photography data from an unmanned aerial vehicle SOVZOND AIR-CON 3. In: *Proceedings of the Republican scientific and practical seminar of students and young scientists “GIS technologies in Earth sciences”*. Ed. N.V. Zhukovskaya. 2019. pp. 114–117. (In Russ.)
2. Domrachev A.A., Anufriev M.A. Fundamentals of remote sensing of the Earth (using the example of ENVI4.8): Workshop. Yoshkar-Ola. VSUT. 2019. 154 p. (In Russ.)
3. Druz R.A., Protasova A.V., Okhunov Sh.R., Kshanovskaya A.V. Comparative assessment of airborne laser scanning and aerial photography from unmanned aerial vehicles. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023. No. 5. pp. 130–141. (In Russ.)
4. Izmestev A.G. Photogrammetry and remote sensing methods of the earth. Textbook. Kemerovo. KuzGTU. 2017. 119 p. (In Russ.)
5. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon test site of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3(25). pp. 35–47. (In Russ.)
6. Kochneva A.A., Malchenko E.L. Assessing the quality of digital terrain models constructed from airborne laser scanning data. In: *Proceedings VI International Scientific Conference “Scientific trends: issues of exact and technical sciences”*. Saint Petersburg. Central Scientific Research Institute of Scientific Research Institute “Social Science”. 2017. No. 6. pp. 17–23. (In Russ.)
7. Kurkov M.V., Klestov D.A., Brusilo V.A., Kurkov V.M., Kiseleva A.S. Experience in using the Geoscan 401 lidar complex as an unmanned topographic system for airborne laser scanning and aerial photography. *Geoprofi*. 2021. No. 6. pp. 17–23. (In Russ.)
8. Olchev A.V., Mukhartova Yu.V., Kerimov I.A., Gibadullin R.R. 3D-hydrodynamic modeling of CO₂ and CH₄ flows in the ground layer of the atmosphere (On the example of the

Roshni-Chu forest area). Sustainable Development of Mountain Territories. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 408–418. (In Russ.)

9. Ris W.G. Fundamentals of remote sensing. Moscow. Technosphere. 2006. 336 p. (In Russ.)

10. Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal. 1984. Vol. 76. No. 2. pp. 300–306.

11. Bannari A.A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews. 1995. Vol. 13. No. 1. pp. 95–120.

12. Dagg J., Lafleur P. An application of plot-scale NDVI in predicting carbon dioxide exchange and leaf area index in heterogeneous subarctic tundra. Canadian Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 36(S1). pp. 111–123.

13. Filgueiras R., Mantovani E.C., Althoff D., da Cunha F.F., Fernandes Filho E.I. Crop NDVI monitoring based on Sentinel 1. Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Art. No. 1441.

14. Hikosaka K., Tsujimoto K. Linking remote sensing parameters to CO₂ assimilation rates at a leaf scale. Journal of Plant Research. 2021. Vol. 134. No. 4. pp. 1–17.

15. Jiao W., Wang L., McCabe M.F. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 256. No. 8. Art. No. 112313.

16. Kim M., Stoker J., Irwin J., Danielson J., Park S. Absolute accuracy assessment of lidar point cloud using amorphous objects, USA. Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 19. Art. No. 4767.

17. Khan M.N., Tan Yu., Gul A.A., Abbas S., Wang J. Forest aboveground biomass estimation and inventory: evaluating remote sensing-based approaches. Forests. 2024. Vol. 15. No. 6. Art. No. 1055.

18. Rouse J.W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFCT. Type II Report. Greenbelt: Maryland. 1973. 87 p.

19. Silleos N.G., Alexandridis T.K., Gitas I.Z., Perakis K. Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. Geocarto International. 2006. Vol. 21. No. 4. pp. 21–28.

20. Vidican R., Mălinaş A., Ranta O., Moldovan C., Marian O. et al. Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: a critical review. Agronomy. 2023. Vol. 13. No. 12. Art. No. 3040.

УДК 551.5+504.3

DOI: 10.46698/VNC.2024.81.30.016

Оригинальная статья

Долгосрочные изменения режима атмосферных осадков как фактора формирования опасностей гидрологического характера в горной зоне Республики Дагестан

Е.А. Корчагина 

Центр географических исследований Кабардино-Балкарского научного центра РАН,
Россия, 360002, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2,
e-mail: helena.a.k@mail.ru

Статья поступила: 28.08.2024, доработана: 27.11.2024, принята к публикации: 28.11.2024

Резюме: **Актуальность** обусловлена необходимостью выявления долгосрочных тенденций регионального изменения осадков как фактора формирования опасных природных процессов. **Цель** настоящего исследования – выявить статистически значимые изменения в современном режиме атмосферных осадков в горной зоне Республики Дагестан, способные оказать влияние на активность неблагоприятных гидрометеорологических и гидрологических явлений, приводящих к экономическому и социальному ущербу. **Методы.** Использован аппарат математико-статистического моделирования. Наличие статистически значимых долгосрочных трендов оценивалось с помощью набора параметрических и непараметрических методов. **Результаты.** Обнаружено, что в высокогорной зоне подавляющее число обнаруженных статистически значимых долгосрочных трендов отрицательные. Значимые положительные тенденции выявлены в марте и июле. В среднегорной зоне выявлен рост месячных сумм осадков с января по март, а также в июле. Исследование изменения числа дней с осадками различной интенсивности показало, что в регионе снижается число дней с интенсивными осадками в апреле, мае, июне, августе и сентябре, ноябре и декабре. Растет число дней с интенсивными осадками в феврале, марте и июле. Проведенный анализ числа явлений гидрометеорологического (дожди, ливни, град) и гидрологического (сели) характера, приведших к материальному и социальному ущербу, показал, что их динамика с 1991 по 2023 годы имеет статистически незначимый отрицательный тренд. **Выводы.** Сопоставляя результаты исследования динамики и годового распределения опасных явлений с анализом изменения режима осадков, можно ожидать, что дождевая составляющая формирования селей в марте и в июле будет расти, а с апреля по июнь, а также в августе-сентябре снижаться.

Ключевые слова: изменение климата, атмосферные осадки, Восточный Кавказ, Республика Дагестан, непараметрические методы математической статистики, опасные природные явления гидрометеорологического и гидрологического характера, ливень, сели.

Для цитирования: Корчагина Е.А. Долгосрочные изменения режима атмосферных осадков как фактора формирования опасностей гидрологического характера в горной зоне Республики Дагестан. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 192-205. DOI: 10.46698/VNC.2024.81.30.016

DOI: 10.46698/VNC.2024.81.30.016

Original paper

Long-term changes in the precipitation regime as a factor of the hydrological hazards' formation in the mountainous zone of the Dagestan Republic

E.A. Korchagina 

Center of Geographical Research, Kabardino-Balkar Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2 Balkarova Str., Nalchik 360002, Russian Federation,
e-mail: helena.a.k@mail.ru

Received: 28.08..2024, revised: 27.11.2024, accepted: 28.11.2024

Abstract: The **relevance** is defined by the need to identify long-term trends in regional precipitation changes as a factor in the formation of hazardous natural processes. The **aim** of this study is to identify statistically significant changes in the current regime of precipitation in the Dagestan Republic mountainous zone, which can affect the activity of hazardous hydrometeorological and hydrological phenomena causing the economic and social damage. **Methods.** Mathematical and statistical modeling of historical daily precipitation changes were conducted. The presence of statistically significant long-term trends was assessed using a set of parametric and nonparametric methods. **Results.** It was found that in the high-altitude zone, the overwhelming number of statistically significant trends are negative. Significant positive trends were revealed in March and July. In the mid-mountain zone, an increase in monthly precipitation was revealed from January to March, and in July. The number of days with intense precipitation is decreasing in April–June, August, September, November and December. The number of days with intense precipitation in February, March and July is increasing. The dynamics of the number of hydrometeorological (rains, showers, hail) and hydrological (mudslides) phenomena that led to material and social damage has a statistically insignificant negative trend. **Conclusions.** Comparing the dynamics and annual distribution of hazardous phenomena with the changes in the precipitation regime, it can be expected that the rain component of the mudflows formation in March and July will grow. The decrease in precipitation from April to June, as well as in August–September, occurs due to a decrease in the number of days with high-intensity precipitation, which reduces the contribution of the hydrometeorological component to the formation of mudflows in these months.

Keywords: climate change, atmospheric precipitation, Eastern Caucasus, Republic of Dagestan, nonparametric methods of mathematical statistics, hazardous natural phenomena of hydrometeorological and hydrological nature, rainfall, mudflows.

For citation: Korchagina E.A. Long-term changes in the precipitation regime as a factor of the hydrological hazards' formation in the mountainous zone of the Dagestan Republic. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 192–205. DOI: 10.46698/VNC.2024.81.30.016

Введение

Рост освоенности горных территорий и развитие туризма и хозяйственной деятельности неизбежно приводят к увеличению числа объектов, подвергающихся воздействию природных опасностей. Осадки в горных районах играют решающую роль в формировании гидрологических природных опасностей. Наводнения ливне-

вого генезиса, сели, оползни, снежные лавины и усиление эрозионных процессов – все эти явления тесно связаны с характером и интенсивностью осадков [Blöschl et al., 2019; Кюль, 2017; Tabari, 2020]. Прогнозируемое увеличение частоты и интенсивности проливных дождей, основанное на климатических моделях, должно способствовать увеличению числа вызванных ими местных наводнений [Trenberth, 2011; Khlebnikova et al., 2019; Kundzewicz et al., 2013]. Сезонное перераспределение осадков приводит к изменению условий протекания сезона половодья в весенний период и резкому подъему уровня рек в сезон паводков [Korchagina, 2021; Ташилова и др., 2024]. Например, в [Разумов и др., 2018] установлено, что 67% всех чрезвычайных ситуаций на Северном Кавказе, связанных с явлениями гидрологического характера, приходится на летние месяцы.

Пространственное распределение изменений интенсивности экстремальных осадков показывает, что экстремальные осадки увеличиваются равномерно во всех климатических режимах [Trenberth, 2011]. Исследование современных индексов экстремальности осадков в период с 1961 по 2018 гг. [Вышкваркова, 2022], рассчитанных по данным метеостанций Северного Кавказа, показало, что они убывают от Черноморского побережья к побережью Каспийского моря.

Понимание взаимосвязей между режимом атмосферных осадков и формированием природных опасных явлений гидрологического характера важно для обеспечения безопасности горных территорий. В связи с этим исследование направления изменений режима осадков и расчет их количественных характеристик в условиях быстро меняющегося климата остается высоко актуальной задачей.

Цель настоящего исследования – выявить изменения в режиме атмосферных осадков в горной зоне Республики Дагестан (РД), способные оказать влияние на степень активности неблагоприятных гидрометеорологических и гидрологических явлений, причиняющих ущерб хозяйственной деятельности и безопасности населения.

Материалы и методы исследования

Изменение средних и максимальных за месяц суточных сумм, месячных сумм, средних за сезон месячных осадков (далее среднесезонных) и средних за год месячных сумм (далее среднегодовых) атмосферных осадков на территории РД исследовалось на основе исторических данных, приведенных в специализированных наборах Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). Характеристики рассчитаны на основе результатов обработки суточных данных метеостанций. Кроме вышеперечисленных характеристик, исследованы ряды, содержащие число дней с осадками более 1 мм, 5 мм, 10 мм, 15 мм и 20 мм с 1961 г. по 2023 г. Такие же ряды сформированы с 1976 года по 2023 г. Всего проанализировано 96 временных рядов различных климатических характеристик режима осадков.

Использование линейной модели данных нашло широкое применение в исследованиях долгосрочной динамики климатических характеристик [Tashilova et al., 2022; Panda, Sahu, 2019; Ali et al., 2019; Korchagina, 2022], где изменения, хотя и сложные, имеют общую восходящую или нисходящую тенденцию. Поэтому выбор линейной модели для поставленных целей представляется обоснованным. Пред-

варительно ряды были исследованы на структуру и наличие выбросов, процент которых не превысил 9%. Робастные (устойчивые к выбросам) методы построения линейной регрессии начинают показывать свои преимущества при наличии от 10% выбросов и выше. Однако конкретные результаты могут зависеть от распределения выбросов и природы данных, поэтому были проведены расчеты и сравнение качества моделей линейной регрессии методами наименьших квадратов (МНК) и рядом робастных методов, реализованных в виде библиотек языка python, которые показали преимущество в качестве моделей, полученных с помощью МНК. В настоящем исследовании отобраны модели с оценками уравнения регрессии, значимыми на уровне 0,1 и меньше.

Следующий этап – вычисление остатков регрессии и проверка остатков на подчинение нормальному закону распределения. При отклонении от нормального распределения оценки значимости тренда не надежны. В этом случае использованы непараметрические методы определения наличия тенденции (коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла).

Дополнительно исследовались тенденции в сглаженных рядах, что позволяет более отчетливо увидеть долгосрочные тренды, исключив влияние краткосрочных колебаний. Сглаживание проводилось методом скользящего среднего, окно сглаживания (отрезок осреднения) выбрано так, чтобы остатки регрессии подчинялись нормальному закону распределения у наибольшего числа временных рядов. В данном случае окно сглаживания равно 7. Из сравнения коэффициентов наклона линейных трендов и их значимости до и после сглаживания выявлены дополнительные значимые тенденции, не видные в зашумленных рядах.

В заключение на основе информации, представленной в обновляемой базе данных (Шамин С.И. и др. Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России), проанализировано годовое распределение и временной ход с 1991 по 2023 годы числа опасных гидрометеорологических и гидрологических явлений. Полученная картина сопоставлена с выявленными долгосрочными тенденциями атмосферных осадков.

Результаты и их обсуждение

Высокогорная зона. Метеостанция Сулак, высокогорная расположена на высоте 2923 м над уровнем моря, 42° 22' с.ш., 46° 15' в.д. Динамика годового хода рассчитана для климатически значимых 30-летних периодов с шагом в 10 лет (рис. 1). Годовое распределение носит континентальный характер и имеет один максимум, который в настоящее время наблюдается в июне, тогда как в периоде, который принят Всемирной метеорологической организацией (ВМО) как базовый для отслеживания современных изменений климата, максимум наблюдался в мае. Минимум наблюдается зимой и в базовый период суммы зимних месяцев с декабря по февраль были практически равны и составляли 37 мм. Последняя климатическая норма 1981–2000 годов имеет выраженный минимум в январе и составляет 30 мм. Понимание того, являются ли наблюдаемые изменения статистически достоверными, можно получить из результатов исследования статистически значимых тенденций на уровне значимости 0,1 в период 1961–2023 гг. (табл. 1).

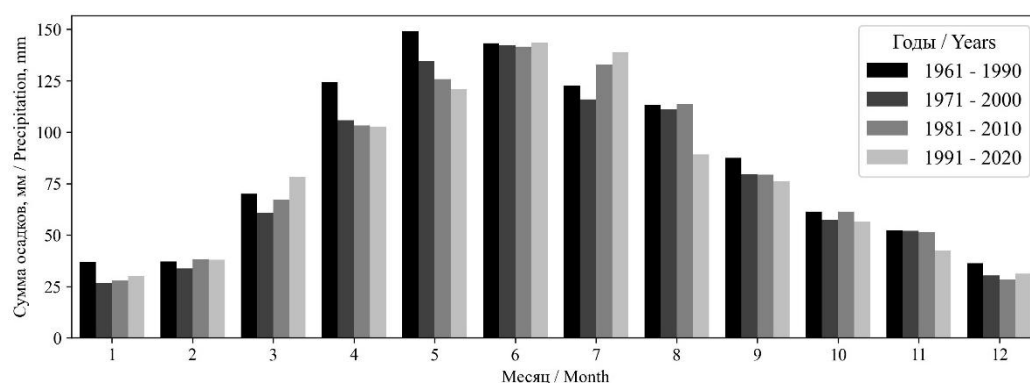


Рис. 1. Годовой ход осадков по 30-летним периодам, метеостанция Сулак, высокогорная /
Fig. 1. Annual precipitation distribution averaged for thirty years, meteorological station Sulak,
vysokogornaya

Таблица 1/ Table 1

Статистически значимые тенденции климатических характеристик, метеостанция Сулак, высокогорная 1961-2023 гг. / Statistically significant trends of the climatic characteristics, Sulak, Vysokogornaya Weather Station, 1961-2023

Мес./ Сезон Month/ Season	I_{mean}	s	Normal	$t_{Kendall}$	p-value	r_s	p-value	b_{Line}	p-value
Месячные суммы, мм /Monthly amounts, mm									
4	113,48	45,82	False	-0,27	0,0028	-0,38	0,0033	-9,32	0,0051
5	135,58	50,85	False	-0,12	0,1779	-0,18	0,1813	-7,18	0,0532
12	33,49	20,99	True	-0,15	0,0922	-0,2	0,122	-1,82	0,2377
Средние сезонные суммы, мм/ Average seasonal amounts, mm									
Весна/ Spring	107,62	26,67	False	-0,16	0,0681	-0,25	0,0535	-4,77	0,0149
Год/ Year	82,68	14,18	False	-0,22	0,0145	-0,31	0,0197	-2,85	0,0069
Число дней с осадками более 1 мм/ Number of days with precipitation more than 1 mm									
4	12,44	4,32	True	-0,22	0,0154	-0,31	0,0138	-0,8	0,0098
5	14,33	4,04	False	-0,24	0,0096	-0,35	0,0062	-0,68	0,0199
6	14,66	4,04	True	-0,22	0,0165	-0,32	0,0132	-0,71	0,0145
11	5,52	3,06	True	-0,15	0,1075	-0,22	0,0923	-0,33	0,1425
12	5,11	2,56	True	-0,19	0,039	-0,26	0,0395	-0,38	0,0406
Число дней с осадками более 5 мм/ Number of days with precipitation more than 5 mm									
4	6,67	2,95	True	-0,27	0,0038	-0,36	0,0038	-0,56	0,0077
5	8,25	3,13	True	-0,14	0,1174	-0,21	0,0968	-0,41	0,0728
6	8,93	2,65	True	-0,17	0,0619	-0,24	0,059	-0,36	0,0585
Число дней с осадками более 10 мм/ Number of days with precipitation more than 10 mm									
6	4,87	2,13	True	-0,16	0,0764	-0,23	0,0765	-0,23	0,144
Число дней с осадками более 15 мм/ Number of days with precipitation more than 15 mm									
4	2,05	1,4	True	-0,21	0,0274	-0,28	0,0285	-0,23	0,0215
9	1,41	1,32	False	-0,17	0,078	-0,2	0,1132	-0,08	0,3982

Здесь: I_{mean} – среднее за указанный период месячное (среднесезонное) значение суммы осадков, мм/ average monthly (seasonal average) value of precipitation for the specified period, mm;
s – среднее квадратическое отклонение исследуемого ряда/ standard deviation;

$t_{Kendall}$ – коэффициент ранговой корреляции Кендалла/ Kendall rank correlation coefficient;
 r_S – коэффициент ранговой корреляции Спирмэна/ Spearman rank correlation coefficient;
 b_{Line} – оценки линейной регрессионной модели, мм/10 лет/ regression coefficient of the linear model, mm per decade;

$p-value$ – вероятность того, что отклонение оценки тренда от нуля является случайным/ the probability that the trend deviation from zero is insignificant;

Normal – логический признак нормального распределения ряда, равен True, если выборка происходит из нормального распределения/ a logical sign of the normal distribution of the series, equal to True if the sample comes from a normal distribution.

В обозначенный период статистически значимыми среди месячных сумм осадков оказались только отрицательные тренды в апреле, мае и декабре. Число дней с осадками более 1 мм снижалось не только в указанные месяцы, но и в июне и ноябре. Число дней с осадками более 15 мм снижалось в сентябре. Такой параметр, как максимальные суточные осадки в марте росли со скоростью 1,48 мм/10 лет, что составляет 7% от среднего значения. Средние суточные суммы снижались в апреле и в мае. В период 1976 – 2023 гг. появляется положительная тенденция роста осадков в марте, который обусловлен ростом числа дней с осадками более 5–20 мм. Увеличивается число дней с осадками более 10–15 мм в июле и более 20 мм в феврале.

Результаты расчета долговременных трендов для сглаженных рядов приведены в таблице 2. В левой части таблицы представлены метрики качества и оценки трендов для исходных рядов, в правой – для сглаженных. В таблицу вошли записи со статистически значимыми оценками трендов после сглаживания на уровне 0,1.

Таблица 2 / Table 2

Линейные тренды 1961-2023 гг. и метрики качества до и после сглаживания.

Сулак, высокогорная / Linear trends of 1961-2023 and quality metrics before and after smoothing. Weather Station Sulak, vysokogornaya

Месяц/Сезон Month/Season	b_{Line}	$p-val$	MSE	R^2	Norm	b_{Line}	$p-val$	MSE	R^2	Norm
	исходные ряды/ original series					сглаженные ряды/ smoothed series				
3	2,84	0,26	1138,4	0,02	True	4,1	0,01	261,9	0,14	True
4	-8,94	0,01	1748,4	0,12	False	-7,8	0,00	249,2	0,38	True
5	-7,1	0,05	2303,5	0,06	False	-7,6	0,00	145,7	0,50	True
7	2,4	0,58	3529,0	0,01	True	6	0,00	231,1	0,28	True
8	-6,4	0,14	3271,1	0,04	False	-7,9	0,00	528,5	0,23	True
9	-1,6	0,62	1992,5	0,01	False	-3,4	0,00	112,7	0,20	True
11	-2,5	0,32	1106,4	0,02	False	-2,6	0,02	160,6	0,09	True
Весна/Spring	-4,55	0,01	600,5	0,1	True	-4,0	0,00	87,6	0,31	True
Осень/ Autumn	-1,57	0,29	396,6	0,02	True	-1,6	0,00	46,6	0,17	True
Год/Year	-2,62	0,01	160,1	0,12	False	-2,6	0,00	26,9	0,30	True

По результатам построения и оценки трендов для сглаженных рядов месячных сумм осадков подтверждается тенденция к росту осадков в марте с 1961 года, ранее обнаруженная только с 1976 г. Кроме этого, анализ оценок трендов сглаженных рядов числа дней с осадками более определенного порога показал, что структура изменения осадков в марте следующая: более 1 мм рост статистически значим на уровне 0,05 и относительная скорость прироста в процентах от среднего значения исходного ряда составляет 1%/10 лет; более 5 мм рост статистически значим на уровне 0,01, что составляет 5%/10 лет; более 10 мм и более 15 мм рост со скоростью

8%/10 лет. Также добавилась информация о росте числа дней с осадками более 5 мм, 10 мм, 15 мм в июле (6%/10 лет, уровень значимости 0,0001), более 15 мм в июне, более 10 мм в октябре (3%/10 лет).

Среднегорная зона. Метеостанция Ахты расположена на территории РД, 1016 м, 41°28' с.ш., 47°45' в.д. Годовой ход месячных сумм приведен на рисунке 2. В отличие от высокогорной зоны, годовое распределение осадков по данным метеостанции Ахты имеет два максимума за период 1981–2020 гг. Первичный максимум приходится на июнь, ярко выражен и составляет 15% от годового количества. Вторичный максимум появляется с 1971–2000 гг. Последние уровни ряда, начиная с 1981–2010 гг. и особенно в 1991–2020 гг., показывают, что вторичный максимум хорошо выражен в сентябре и равен 43 мм, что составляет 11% от годового количества осадков (398 мм).

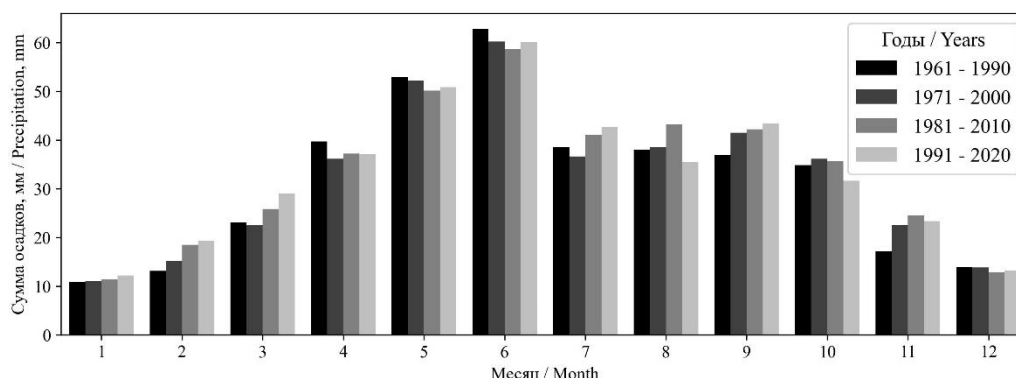


Рис. 2. Годовой ход осадков по 30-летним периодам, метеостанция Ахты /

Fig. 2. Annual precipitation distribution averaged for thirty years, Akhty weather station

Таблица 3 / Table 3

Статистически значимые тенденции климатических характеристик, метеостанция Ахты 1961–2023 гг. / Statistically significant trends of the climatic characteristics, Akhty Weather Station, 1961–2023

Мес./Сезон Month/Season	I_{mean}	s	Normal	$t_{Kendall}$	$p-value$	r_S	$p-value$	b_{Linear}	$p-value$
Месячные суммы, мм / Monthly amounts, mm									
2	16,15	10,93	False	0,14	0,1166	0,2	0,1195	1,62	0,0412
3	26,6	14,48	False	0,15	0,0928	0,25	0,0613	2,17	0,0394
Средние сезонные суммы, мм / Average seasonal amounts, mm									
Зима/Winter	13,87	6,05	True	0,14	0,1166	0,19	0,1356	0,83	0,0606
Число дней с осадками более 1 мм / Number of days with precipitation more than 1 mm									
3	5,08	2,34	True	0,15	0,0955	0,23	0,0807	0,27	0,1152
12	2,92	1,81	True	-0,16	0,0873	-0,23	0,0688	-0,22	0,1025
Число дней с осадками более 5 мм / Number of days with precipitation more than 5 mm									
2	0,92	0,99	False	0,18	0,0654	0,23	0,0729	0,14	0,0531
6	4,05	2,02	True	-0,18	0,0587	-0,23	0,0749	-0,25	0,0827
Число дней с осадками более 10 мм / Number of days with precipitation more than 10 mm									
3	0,41	0,62	False	0,0336	0,28	0,0299	0,08	0,065	0,0336
6	1,82	1,32	True	-0,15	0,1074	-0,22	0,0886	-0,18	0,0684
Число дней с осадками более 15 мм / Number of days with precipitation more than 15 mm									
3	0,18	0,47	False	0,19	0,0776	0,23	0,072	0,06	0,0673

В обозначенный период статистически значимыми для месячных сумм осадков оказались только положительные тренды в феврале и марте. По структуре осадков можно сказать, что в марте рост месячных сумм обусловлен возрастанием числа дней с осадками более 1 мм и 10–15 мм. Рост месячных сумм в феврале обусловлен увеличением числа дней с осадками более 5 мм. Снижение зимних сезонных сумм связано, в числе прочего, и со снижением числа дней с осадками более 1 мм в декабре.

В период 1976–2023 гг. сохраняется обнаруженная ранее положительная тенденция роста осадков в марте и рост числа дней с осадками более 1 мм и 10 мм. В феврале растет число дней с осадками более 15 мм. В феврале и марте также обнаружен рост средних за месяц суточных сумм. Снижение числа дней с осадками наблюдается в декабре (более 1 мм), в августе (более 5 мм и 10 мм) и в июне (более 10 мм).

Результаты расчета долговременных трендов для сглаженных рядов месячных сумм по данным метеостанции Ахты приведены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Линейные тренды 1961–2023 гг. и метрики качества до и после сглаживания, Ахты
/ **Linear trends of 1961–2023 and quality metrics before and after smoothing, weather Station Akhty**

Месяц/ Month	b_{Line}	$p-val$	MSE	R ²	Normal	b_{Line}	$p-val$	MSE	R ²	Normal
	исходные ряды/ original series					сглаженные ряды/ smoothed series				
1	0,72	0,22	62,8	0,03	False	0,8	0	4,0	0,3	True
2	1,61	0,04	107,5	0,07	False	1,7	0	5,4	0,6	True
3	2,15	0,04	185,1	0,07	False	2,5	0	22,5	0,4	False
4	-2,21	0,13	386,3	0,04	False	-2,3	0	30,3	0,3	True
6	-2,75	0,15	637,9	0,04	True	-1,9	0,014	72,8	0,1	True
7	1,43	0,43	591,6	0,01	True	1,1	0,063	43,1	0,1	True

К отмеченному ранее росту осадков в феврале и марте добавились значимые положительные изменения в январе и июле. При этом оценка скорости роста в июле уменьшилась на 23% от величины не сглаженного ряда, а в январе увеличилась на 11%. Подтвердились тенденции роста в феврале и марте. При этом скорость роста в феврале увеличилась на 6% относительно оценки не сглаженного ряда, а в марте – на 16%. Оценка скорости снижения месячных сумм в июне уменьшилась на 30%, а в апреле увеличилась на 4%.

Выделенные после сглаживания тенденции в рядах месячных сумм с 1961 г. соответствуют значимым тенденциям в рядах с 1976 года, либо рядах числа дней с осадками более определенного порога. Например, число дней с осадками более 10 мм в июле в 1976–2023 гг. по данным метеостанции Сулак нашло подтверждение в росте июльских сумм в сглаженных рядах с 1961 г. Снижение числа дней с осадками в июне (1961–2023 гг.) по данным метеостанции Ахты объясняет уменьшение месячных сумм в июне по оценкам трендов сглаженного ряда.

Если рассмотреть выявленные изменения в контексте мировых и региональных трендов, то можно сказать следующее. Долгосрочные тенденции в глобальном среднем количестве осадков в целом статистически незначительны. На основе исследований выявляются крупные региональные тенденции с положительными

и отрицательными значениями по всему миру [Gu, Adler, 2022]. Исследования в различных странах показывают, что при преобладающем росте количества экстремальных осадков выявляются значительные локальные тренды противоположной направленности [Gentilucci et al., 2020; Risser et al., 2021; Valdivieso-García et al., 2024; Khlebnikova et al., 2019]. При характеристике регионов Российской Федерации по характеру трендов осадков и температуры с 1976 по 2020 годы, РД отнесена к группе территорий с незначительно растущими средними годовыми суммами [Demichev et al., 2024]. Динамика режима осадков в горных районах РД не противоречит глобальным и региональным тенденциям. При этом детально выявленные особенности локальных тенденций важны при прогнозе развития опасных склоновых явлений в горной зоне Республики Дагестан.

Опасные природные процессы гидрометеорологического и гидрологического характера в горной зоне РД. На основании данных об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, приведенных ВНИИГМИ-МЦД, сформированы выборки явлений, имеющих место на территории РД. Для выбранных сведений рассчитаны числа различных явлений, имеющих отношение к атмосферным осадкам (снег, град, ливень, дождь, смешанные осадки). Результаты расчета годового хода неблагоприятных явлений гидрометеорологического характера, зафиксированных на территории РД суммарно с 1991 по 2023 годы, приведены на рисунке 3 (вверху).

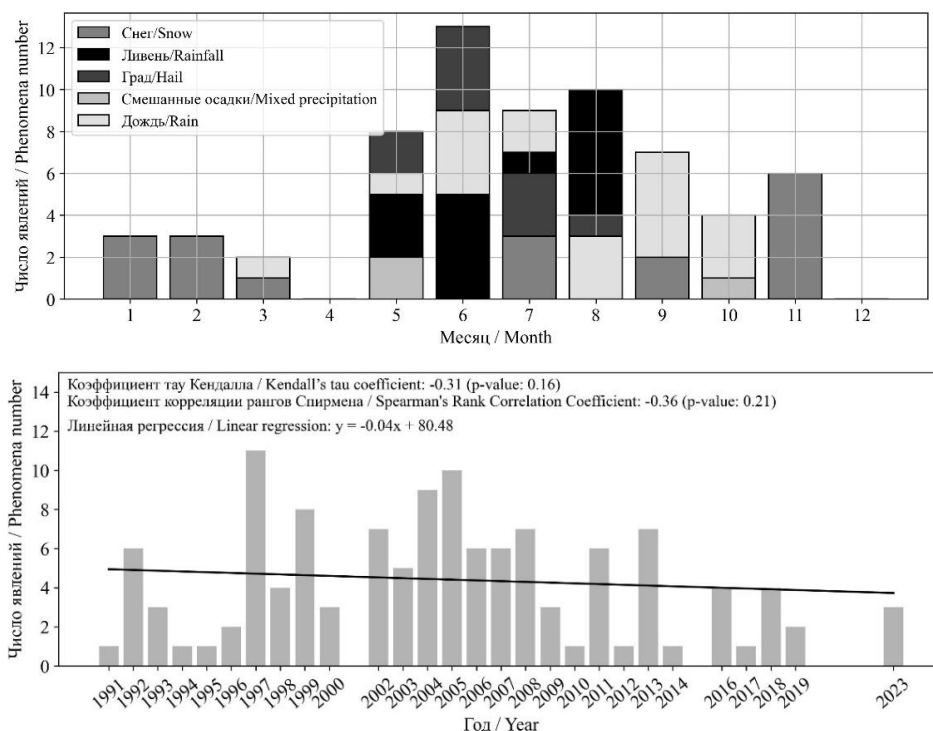


Рис. 3. Годовое распределение числа опасных явлений гидрометеорологического характера (вверху). Динамика неблагоприятных гидрометеорологических явлений, принесящих ущерб (внизу) /
Fig. 3. Annual distribution of the hydrometeorological hazards (on the top). Dynamics of hazardous hydrometeorological phenomena that caused damage (at the bottom)

Максимальное число неблагоприятных явлений зарегистрировано в июне и относится к градобитию. Самые безопасные с этой точки зрения месяцы в регионе – апрель и декабрь. Неблагоприятные явления, связанные с дождем, имеют главный максимум в июне-июле и вторичный в сентябре, что соответствует годовому ходу

осадков в среднегорной зоне. Динамика суммарного числа вышеперечисленных неблагоприятных явлений приведена на рисунке 3 (внизу). Как видно из расчетов, динамический ряд имеет небольшой отрицательный тренд, который по результатам тестов статистически не значим. Наибольшее число явлений зафиксировано в 1997 году. Период времени с непрерывно высокой активностью неблагоприятных природных явлений гидрометеорологического характера наблюдался с 2002 по 2008 годы. К настоящему времени активность снизилась.

Примером опасных явлений гидрологического характера могут служить наводнения, сели. Остановимся на селях, характерных для горных территорий. Рассчитанное на основе данных, представленных на сайте ВНИИГМИ-МЦД, распределение зафиксированных случаев схода селей на территории Республики Дагестан с 1991 г. по 2023 г., причинивших ущерб, приведено на рисунке 4 (вверху).

Случаи зафиксированы с марта по октябрь (период селевой опасности). При этом время наибольшей активности – с мая по сентябрь, максимальной – июнь-июль. Наибольшее число случаев наблюдалось в июле – всего 40 случаев и 39 случаев в июне. Сезонный ход числа проявления селей соответствует сезонному ходу осадков в высокогорной зоне (см. рис. 1).

Как и в случае с явлениями гидрометеорологического характера, обнаружен статистически не значимый отрицательный тренд. Наибольшее число селей, нанесших урон хозяйству и жизни людей, зафиксировано (в порядке убывания) в 2009, 2005 и 1997 годах. В 2005 году также зафиксировано второе по значению число опасных метеорологических явлений (ливень, дождь, град, снег, смешанные осадки), в 1997 году – первое.

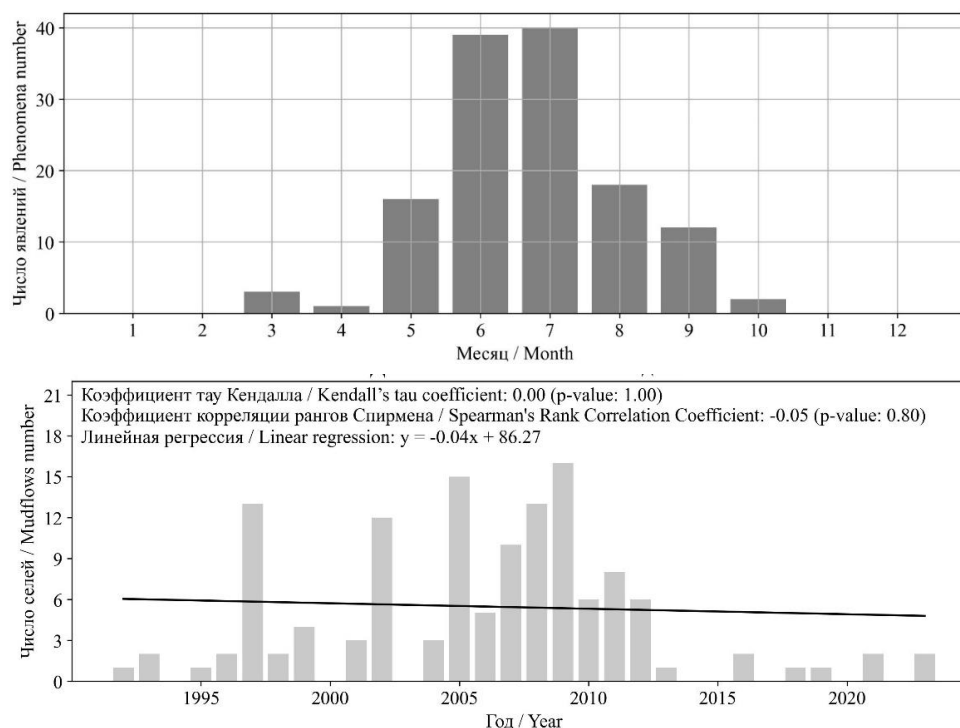


Рис. 4. Распределение числа селей по месяцам (вверху). Динамика числа селей, причинивших ущерб на территории Республики Дагестан с 1991 по 2023 гг. (внизу) /

Fig. 4. Monthly distribution of the mudflows' number (on the top). Mudflows' number dynamics in the territory of the Republic of Dagestan from 1991 to 2023 (at the bottom)

При сопоставлении с динамикой явлений гидрометеорологического характера необходимо иметь в виду, что факторами формирования селей, кроме атмосферных осадков, является температура воздуха, которая неуклонно растет в последние годы, состояние оледенения, которое деградирует [Петрушина и др., 2023] и другие природные условия. Также важна освоенность территории и предпринимаемые защитные меры.

Заключение

Исследование изменения режима осадков в высокогорной зоне РД показало, что подавляющее число обнаруженных с 1961 года статистически значимых долгосрочных трендов климатических характеристик отрицательные. Значимо уменьшаются средние годовые и весенние суммы. Вместе с тем, анализ временных рядов месячных сумм, подвергнутых сглаживанию, позволил выделить статистически значимые положительные тенденции в марте и июле. В среднегорной зоне выявлен рост месячных сумм осадков в феврале и марте, а также в зимний сезон. Анализ сглаженных рядов позволил выявить значимый рост месячных сумм в июле (аналогично высокогорной зоне) и январе. Исследование изменения числа дней с осадками различной интенсивности показало, что в регионе снижается число дней с интенсивными осадками в апреле, мае, июне, августе и сентябре, ноябре и декабре. Растет число дней с интенсивными осадками в феврале, марте и июле.

В связи с тем, что в высокогорной зоне обнаружен долгосрочный тренд к росту месячных сумм осадков в марте и в июле (со скоростью 4 мм/10 лет и 6 мм/10 лет соответственно), можно ожидать, что дождевая составляющая формирования селей в эти месяцы будет расти.

Рост средних месячных сумм осадков с января по март со скоростью от 1 до 2,5 мм/10 лет вносит вклад в рост накопления снега, который затем участвует в процессе таяния и формировании связанных с ним опасных явлений гидрологического характера. Снижение сумм осадков с апреля по июнь, а также в августе-сентябре происходит за счет уменьшения числа дней с осадками большой интенсивности, что снижает вклад гидрометеорологической составляющей в формирование селей в эти месяцы.

Литература

1. Вышкваркова Е.В. Тенденции экстремальных осадков над Северным Кавказом и Крымским полуостровом за период 1961-2018 гг. // Материалы IV Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова «Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии)». Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2022 – С. 207–209.
2. Кюль Е.В. Вопросы комплексной оценки фактической природной опасности территории Кабардино-Балкарской Республики (на примере бассейна р. Чегем). // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 1. – С. 24–32.
3. Петрушина М.Н., Гуня А.Н., Колбовский Е. Ю., Пуреховский А.Ж. Динамика горных ландшафтов Северного Кавказа при современном изменении климата и усилении антропогенного воздействия. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87. № 7. – С. 1032–1049. DOI: 10.31857/S2587556623070130.
4. Разумов В.В., Беккиев М.Ю., Разумова Н.В., Шагин С.И. Масштабы и опасность наводнений на Северном Кавказе. // Наука. Инновации. Технологии. – 2018. – № 1. – С. 143–160.

5. Ташилова А.А., Федченко Л.М., Залиханов М.Ч., Кондратьева Н.В. Анализ динамики селей на фоне климатических изменений в высокогорной зоне Кабардино-Балкарии. // Наука. Инновации. Технологии. – 2024. – № 1. – С. 71–90. DOI: 10.37493/2308-4758.2024.1.4.
6. Ali R., Kuriqi Al., Abubaker Sh., Kisi Oz. Long-Term Trends and Seasonality Detection of the Observed Flow in Yangtze River Using Mann-Kendall and Sen's Innovative Trend Method. // Water. – 2019 – Vol. 11. No. 9. – Art. No. 1855. DOI: 10.3390/w11091855.
7. Blöschl G., Hall J., Viglione A., Perdigão R.A.P., et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. // Nature. – 2019. – Vol. 573. No. 7772. – pp. 108–111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
8. Demichev V., Dashieva B., Filatov I. Characterization of Russian regions by variation in average temperature, precipitation, and agricultural development. // SABRAO Journal of Breeding and Genetics. – 2024. – Vol. 56. No. 2. – pp. 616–627. DOI: 10.54910/sabrao2024.56.2.14.
9. Gentilucci M., Barbieri M., D'Aprile F., Zardi D. Analysis of extreme precipitation indices in the Marche region (central Italy), combined with the assessment of energy implications and hydrogeological risk. // Energy Reports. – 2020. – No. 6. – pp. 804–810. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.006.
10. Gu G., Adler R.F. Observed variability and trends in global precipitation during 1979–2020. // Climate Dynamics. – 2022. – No. 61(1-2). – pp. 131–150. DOI: 10.1007/s00382-022-06567-9.
11. Khlebnikova E.I., Rudakova Y.L., Shkolnik I.M. Changes in Precipitation Regime over the Territory of Russia: Data of Regional Climate Modeling and Observations. // Russian Meteorology and Hydrology. – 2019. – No. 44. – pp. 431–439. DOI: 10.3103/S106837391907001X.
12. Korchagina E.A. Long-term dynamics of the climatic factors of the natural hazards' formation in the Northern Caucasus. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Art. No. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/840/1/012036.
13. Korchagina E.A. Modern changes in the precipitation and air temperature regime in the mountainous regions of the Dagestan Republic. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2022. – Vol. 22. No. 5. DOI: 10.2205/2022ES01SI04.
14. Kundzewicz Z.W., Kanae S., Seneviratne S.I., Handmer J., Nicholls N., et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. // Hydrological Sciences Journal. – 2013. – Vol. 59. No. 1. – pp. 1–28.
15. Panda A., Sahu N. Trend analysis of seasonal rainfall and temperature pattern in Kalahandi, Bolangir and Koraput districts of Odisha, India. // Atmospheric Science Letters. – 2019. – Vol. 20. No. 1. – pp. 1–10. DOI: 10.1002/asl.932.
16. Risser M.D., Wehner M.F., O'Brien J.P., Patricola C.M., O'Brien T.A., Collins W.D., Paciorek C.J., Huang H. Quantifying the influence of natural climate variability on in situ measurements of seasonal total and extreme daily precipitation. // Climate Dynamics. – 2021. – No. 56(9-10). – pp. 3205–3230. DOI: 10.1007/s00382-021-05638-7.
17. Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. // Scientific Reports. – 2020. – No. 10. – Art. No. 13768. DOI: 10.1038/s41598-020-70816-2.
18. Tashilova A.A., Ashabokov B. A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Modern Climate Changes in the North Caucasus Region. // Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. – 2022. – pp. 289–297.
19. Trenberth K. Changes in precipitation with climate change. // Climate Research. – 2011. – Vol. 47. Nos.1-2. – pp. 123–138. DOI: 10.3354/cr00953.
20. Valdivieso-García K., Vázquez-Patiño A., Saritama H., Contreras J., Avilés A., García F. Influence of climate change on precipitation extremes in Ecuador. // Climatic Change. – 2024. – Vol. 177. No. 11. DOI: 10.1007/s10584-024-03820-4.

References

1. Vyshkvarkova E.V. Trends in extreme precipitation over the North Caucasus and the Crimean Peninsula for the period 1961–2018. In: Proceedings of the IV International Scientific Conference in Memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D.G. Matishov “Development of Water Transport Highways under the Conditions of Global Climate Change in the Russian Federation (Eurasia). Rostov-on-Don. SSC. 2022. pp. 207–209. (In Russ)
2. Kyul E.V. Issues of a comprehensive assessment of the actual natural hazard of the territory of the Kabardino-Balkarian Republic (on the example of the Chegem River basin). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 24–32. (In Russ)
3. Petrushina M.N., Gunya A.N., Kolbovsky E.Yu., Purehovsky A.Zh. Dynamics of Mountain Landscapes of the North Caucasus under Modern Climate Change and Increased Anthropogenic Impact. *Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2023. Vol. 87. No. 7. pp. 1032–1049. DOI: 10.31857/s2587556623070130. (In Russ)
4. Razumov V.V., Bekkiev M.Yu., Razumova N.V., Shagin S.I. The scale and danger of floods in the North Caucasus. *Science. Innovation. Technologies*. 2018. No. 1. pp. 143–160. (In Russ)
5. Tashilova A.A., Fedchenko L.M., Zalikhanov M.Ch., Kondratyeva N.V. Analysis of the dynamics of mudflows against the background of climatic changes in the high-altitude zone of Kabardino-Balkaria. *Science. Innovation. Technologies*. 2024. No. 1. pp. 71–90. DOI: 10.37493/2308-4758.2024.1.4. (In Russ)
6. Ali R., Kuriqi Al., Abubaker Sh., Kisi Oz. Long-Term Trends and Seasonality Detection of the Observed Flow in Yangtze River Using Mann-Kendall and Sen’s Innovative Trend Method. *Water*. 2019 Vol. 11. No. 9. Art. No. 1855. DOI: 10.3390/w11091855.
7. Blöschl G., Hall J., Viglione A., Perdigão R.A.P., et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*. 2019. Vol. 573. No. 7772. pp. 108–111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
8. Demichev V., Dashieva B., Filatov I. Characterization of Russian regions by variation in average temperature, precipitation, and agricultural development. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2024. Vol. 56. No. 2. pp. 616–627. DOI: 10.54910/sabrao2024.56.2.14.
9. Gentilucci M., Barbieri M., D’Aprile F., Zardi D. Analysis of extreme precipitation indices in the Marche region (central Italy), combined with the assessment of energy implications and hydrogeological risk. *Energy Reports*. 2020. No. 6. pp. 804–810. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.006.
10. Gu G., Adler R.F. Observed variability and trends in global precipitation during 1979–2020. *Climate Dynamics*. 2022. No. 61(1-2). pp. 131–150. DOI: 10.1007/s00382-022-06567-9.
11. Khlebnikova E.I., Rudakova Y.L., Shkolnik I.M. Changes in Precipitation Regime over the Territory of Russia: Data of Regional Climate Modeling and Observations. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019. No. 44. pp. 431–439. DOI: 10.3103/S106837391907001X.
12. Korchagina E.A. Long-term dynamics of the climatic factors of the natural hazards’ formation in the Northern Caucasus. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Art. No. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/840/1/012036.
13. Korchagina E.A. Modern changes in the precipitation and air temperature regime in the mountainous regions of the Dagestan Republic. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2022. Vol. 22. No. 5. DOI: 10.2205/2022ES01SI04.
14. Kundzewicz Z.W., Kanae S., Seneviratne S.I., Handmer J., Nicholls N. et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*. 2013. Vol. 59. No. 1. pp. 1–28.
15. Panda A., Sahu N. Trend analysis of seasonal rainfall and temperature pattern in Kalahandi, Bolangir and Koraput districts of Odisha, India. *Atmospheric Science Letters*. 2019. Vol. 20. No. 1. pp. 1–10. DOI: 10.1002/asl.932.
16. Risser M.D., Wehner M.F., O’Brien J.P., Patricola C.M., O’Brien T.A., Collins W.D., Paciorek C.J., Huang H. Quantifying the influence of natural climate variability on in situ

measurements of seasonal total and extreme daily precipitation. *Climate Dynamics*. 2021. No. 56(9-10). pp. 3205–3230. DOI: 10.1007/s00382-021-05638-7.

17. Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*. 2020. No. 10. Art. No. 13768. DOI: 10.1038/s41598-020-70816-2.

18. Tashilova A.A., Ashabokov B. A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Modern Climate Changes in the North Caucasus Region. *Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring*. 2022. pp. 289–297.

19. Trenberth K. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*. 2011. Vol. 47. Nos.1-2. pp. 123–138. DOI: 10.3354/cr00953.

20. Valdivieso-García K., Vázquez-Patiño A., Saritama H., Contreras J., Avilés A., García F. Influence of climate change on precipitation extremes in Ecuador. *Climatic Change*. 2024. Vol. 177. No. 11. DOI: 10.1007/s10584-024-03820-4.

УДК 556.114(6+679)

DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017

Оригинальная статья

Влияет ли добыча полезных ископаемых открытым способом на загрязнение речных экосистем тяжелыми металлами и природным радионуклидом Po-210 (исследования на примере реки Фатала, Гвинейская Республика)?

Н.Ю. Мирзоева¹, В.Ю. Проскурнин¹, И. Кейта², А.И.П. Диалло²,
Р.В. Горбунов¹, А.А. Коротков¹, Т.Ю. Горбунова¹, М.О. Вахрушев¹,
Н.Н. Терещенко¹

¹ Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН,
Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2,
e-mail: gorbunovaty@ibss-ras.ru;

² Центр морских и прибрежных исследований Гвинеи,
Гвинейская Республика, г. Конакри

Статья поступила: 12.10.2024, доработана: 31.10.2024, принята к публикации: 03.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Оценка влияния добычи бокситовых руд открытым способом в Гвинейской Республике на уровень загрязнения тяжелыми металлами и природным радионуклидом ²¹⁰Po экосистемы реки Фатала проводится впервые, что определяет актуальность выполняемых исследований. **Цель работы.** Оценка загрязнения тяжелыми металлами и ²¹⁰Po компонентов экосистемы реки Фатала (Гвинейская Республика) в качестве примера для определения влияния добычи полезных ископаемых открытым способом на экологическое состояние рек добывающих стран. **Методы и методология исследования.** Определяли концентрации 16 элементов (Be, Al, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 на масс-спектрометре Plasma Quant MSeLite (AnalytikJena) на базе центра коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Для выделения ²¹⁰Po из отобранных образцов применяли радиохимические методы. Счетные образцы ²¹⁰Po измеряли с помощью α -спектрометрического комплекса «ALPHADuo» ORTEC-Ametek (США). Химический выход полония составлял 80–90 %. Погрешность измерения не превышала 15 %. **Результаты работы.** Впервые получены данные по загрязнению реки Фатала (Гвинейская Республика) тяжелыми металлами и природным радионуклидом ²¹⁰Po. Определено, что в воде реки Фатала из всех исследуемых элементов превышение ПДК для воды хозяйственно-питьевого назначения в отношении ТМ наблюдалось только для Cd. При этом удельная активность ²¹⁰Po в воде реки была на три порядка ниже уровня вмешательства (УВ=0,11 Бк/кг) для питьевой воды, рекомендованного Нормами радиационной безопасности РФ. Используя эти исследования в качестве примера для определения влияния добычи полезных ископаемых открытым способом на экологическое состояние рек добывающих стран получено, что данные виды загрязнителей (ТМ и ²¹⁰Po) не являются ключевыми, влияющими на качество вод в реках, протекающих по территории с открытым способом добычи полезных ископаемых.

Ключевые слова: тяжелые металлы, полоний-210, загрязнение, река Фатала, Гвинейская Республика, добыча полезных ископаемых открытым способом.

Благодарности: Авторы сердечно благодарят сотрудников CEREMAC-G (г. Конакри, Гвинейская Республика) Абдула Ибрагим Камара и Бобукар Байло в бесценной помощи по отбору проб вдоль русла реки Фатала (Гвинейская Республика). Исследования проведены при финансировании Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Гранта в области науки № 075-15-2023-592 «Разработка технологии оценки антропогенного воздействия на бассейновые экосистемы тропической зоны для выработки рекомендаций по их охране и оптимизации природопользования на примере бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика)».

Для цитирования: Мирзоева Н.Ю., Проскурнин В.Ю., Кейта И., Диалло А.И.П., Горбунов Р.В., Коротков А.А., Горбунова Т.Ю., Вахрушев М.О., Терещенко Н.Н. Влияет ли добыча полезных ископаемых открытым способом на загрязнение речных экосистем тяжелыми металлами и природным радионуклидом Po-210 (исследования на примере реки Фатала, Гвинейская Республика)? *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 206-217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017

Original paper

Does open-pit mining affect the pollution of river ecosystems with heavy metals and the natural radionuclide Po-210 (case study of the Fatala River, Republic of Guinea)?

N.Yu. Mirzoeva¹, V.Yu. Proskurnin¹, I. Keita², A.I.P. Diallo²,
R.V. Gorbunov¹, A.A. Korotkov¹, T.Yu. Gorbunova¹, M.O. Vakhrushev¹,
N.N. Tereshchenko¹

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences,
2 Nakhimov Ave., Sevastopol 299011, Russian Federation,
e-mail: gorbunovatyu@ibss-ras.ru;

² Marine and Coastal Research Center of Guinea (CEREMAC-G),
Conakry, Republic of Guinea

Received: 12.10.2024, revised: 31.10.2024, accepted: 03.11.2024

Abstract: Relevance. The impact of open-pit bauxite mining in the Republic of Guinea on the level of pollution by heavy metals and the natural radionuclide ²¹⁰Po of the Fatala River ecosystem was assessed for the first time, which determines the relevance of the studies. **Aim.** Assessment of pollution by heavy metals and ²¹⁰Po of the components of the Fatala River ecosystem (Republic of Guinea) as an example for determining the impact of open-pit mining on the ecological state of the rivers of the producing countries. **Research methods and methodology.** Concentrations of 16 elements (Be, Al, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) in accordance with GOST R 56219-2014 on a Plasma Quant MSElite mass spectrometer (AnalytikJena) at the Shared Use Center "Spectrometry and Chromatography" of the IBSS. Radiochemical methods were used to determine ²¹⁰Po from the selected samples. Measurement of ²¹⁰Po specific activity in the samples were with using the α -spectrometric complex "ALPHADuo" ORTEC-Ametek (USA). The chemical yield of polonium was 80–90%. The measurement error did not exceed 15%. **Results.** For the first time, these results were obtained on the contamination of the Fatala River

(Republic of Guinea) with heavy metals and the natural radionuclide ^{210}Po . It was determined that in the water of the Fatale River, of all the elements studied, the excess of the MAC for household and drinking water in relation to HM was observed only for Cd. At the same time, the specific activity of ^{210}Po in the river water was three orders of magnitude lower than the intervention level ($IL = 0.11 \text{ Bq/kg}$) for drinking water recommended by the Radiation Safety Standards of the Russian Federation. Using these studies as an example to determine the impact of open-pit mining on the ecological state of the rivers of the producing countries, it was found that these types of pollutants (HM and ^{210}Po) are not major pollutants, affecting the quality of water in the rivers flowing through the territory with open-pit mining.

Keywords: heavy metals, polonium-210, pollution, the Fatale River, Republic of Guinea, open-pit mining.

Acknowledgments: *The authors sincerely thank the staff of CEREMAC-G (Conakry, Republic of Guinea), Abdula Ibrahim Camara and Boboukhar Baylo for their invaluable assistance in collecting samples along the Fatale River (Republic of Guinea). The research was carried out with funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Grant in the field of science 075-15-2023-592 "Development of a technology for assessing the anthropogenic impact on tropical basin ecosystems to develop recommendations for their protection and optimization of nature management using the example of the Fatale River basin (Republic of Guinea)".*

For citation: Mirzoeva N.Yu., Proskurnin V.Yu., Keita I., Diallo A.I.P., Gorbunov R.V., Korotkov A.A., Gorbunova T.Yu., Vakhrushev M.O., Tereshchenko N.N. Does open-pit mining affect the pollution of river ecosystems with heavy metals and the natural radionuclide Po-210 (case study of the Fatale River, Republic of Guinea)? *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 206-217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017

Введение

Для жизнедеятельности и существования человеческого общества на нашей планете добыча полезных ископаемых является одной из важнейших отраслей промышленности. Несмотря на интенсивное развитие технологий, одним из наиболее распространенных способов извлечения полезных ископаемых из недр Земли остается их добыча открытым способом, преимущественно с помощью карьеров [Рерих, 2019]. В сравнении с шахтным способом открытая добыча полезных ископаемых имеет ряд преимуществ: более низкая стоимость, более короткий срок выполнения работ, более безопасные условия труда, высокая эффективность работ (возможность использования тяжелой техники). Все это способствует применению в современный период открытого способа добычи полезных ископаемых горнодобывающими предприятиями различных стран, включая Российскую Федерацию (РФ). Так, в 2023 г. с учётом горно-геологических и горнотехнических условий залегания рудных зон специалисты предложили открытый способ разработки золотосодержащего месторождения имени Б.К. Михайлова в Кабардино-Балкарии (URL: <https://rg.ru/gazeta/skfo/2023/06/15.html>). Однако среди всех методов добычи полезных ископаемых именно открытый способ наносит самый большой ущерб окружающей среде, поднимая проблему «геологической деятельности» человека [Вернадский, 2012; Рерих, 2019; Kolie et al., 2019; Chen et al., 2022; Diallo, 2022].

Для принятия мер по предотвращению экологических проблем при открытой добыче полезных ископаемых и обеспечения устойчивого развития территорий РФ следует учитывать опыт других стран, например, Гвинейской Республики (Африка), где добыча полезных ископаемых составляет от 12 до 15% ВВП [Traoré et al., 2014; Oshionebo, 2020; Камара, Петровская, 2017]. Гвинейская Республика является самой богатой в мире по запасам бокситов (более 40 млрд т). Поскольку залежи руды в месторождениях Гвинеи находятся близко к поверхно-

сти, добыча бокситов ведется открытым способом [Diallo, 2019; Widder et al., 2019; Mamedov et al., 2020; Wilhelm, Maconachie, 2020; Kolie et al., 2021; Sanoh et al., 2022]. Оценка влияния добычи бокситовых руд открытым способом в Гвинейской Республике на уровень загрязнения тяжелыми металлами и природным радионуклидом ^{210}Po экосистемы реки Фатала, воды которой на всем ее протяжении имеют питьевое и хозяйственное назначение для местного населения Гвинеи, проводится впервые, что определяет безусловную актуальность выполняемой работы. Все вышесказанное определило цель данной научной работы.

Цель исследований заключалась в использовании оценки загрязнения тяжелыми металлами и ^{210}Po компонентов экосистемы реки Фатала (Гвинейская Республика) в качестве примера для определения влияния добычи полезных ископаемых открытым способом на экологическое состояние рек добывающих стран.

Материалы и методы исследований

Пробы на реке Фатала (Гвинейская Республика) отбирались во время совместной международной экспедиции ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ), и Научно-исследовательского центра CEREMAC-G, Гвинейская Республика, г. Конакри в период сухого сезона с 29.10.2023 г. по 30.11.2023 г. На рисунке 1 представлены станции отбора проб на реке Фатала (Гвинейская Республика).

Для определения **микроэлементов и тяжелых металлов (ТМ)** обработку проб воды проводили в лабораторных условиях в соответствии с РД 52.10.243-92 (Руководство по химическому анализу морских вод. Дата введения: 1993-07-01). Отдельно определяли растворенные и взвешенные формы элементов, для этого их разделяли методом ультрафильтрации через мембранные фильтры (ФМНЦ-0,45). В фильтрате определяли растворенные формы элементов после их экстракционного концентрирования четырёххлористым углеродом в виде диэтилдитиокарбаматов. Из проб взвесей и донных отложений получали кислотные вытяжки в соответствии с ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011.

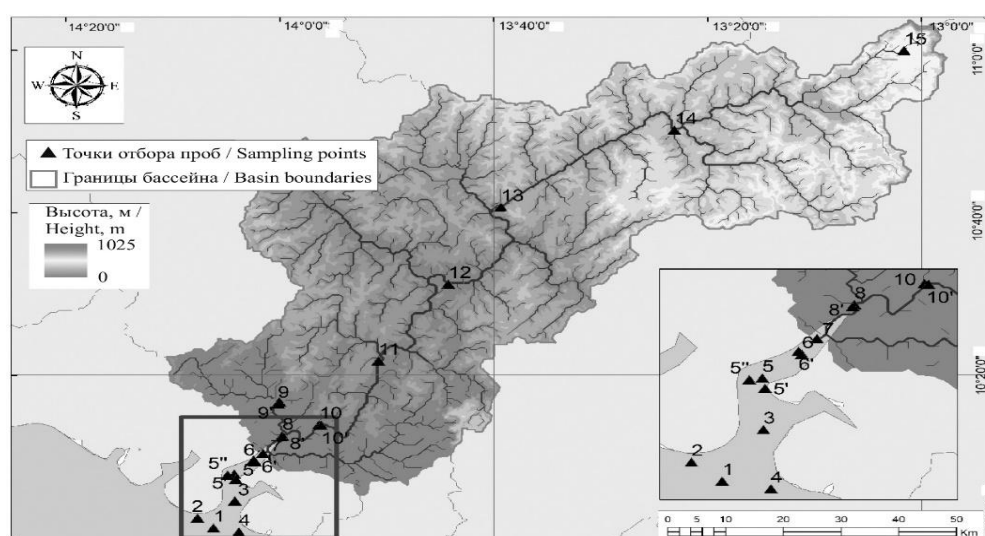


Рис. 1. Карта-схема и станции отбора проб на реке Фатала (Гвинейская Республика), экспедиция 29.10.2023–30.11.2023 гг. /

Fig. 1. Schematic map and sampling stations on the Fouta River (Republic of Guinea), expedition 29.10.2023–30.11.2023

В полученных после пробоподготовки кислотных растворах определяли концентрации 16 элементов (Be, Al, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), (ГОСТ Р 56219-2014, 2015) на масс-спектрометре Plasma Quant MSELite (AnalytikJena) на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ (Plasma Quant. User's Manual. Analytik Jena AG, 2014. 143 p.).

Ввиду отсутствия локального природоохранного и санитарного законодательства в Гвинейской Республике качество вод р. Фатала оценивали по нормативам, установленным в РФ: как водного объекта хозяйственно-питьевого назначения по величинам ПДК_{хоз-пит} (СанПиН-1.2.3685-21), как объекта рыбохозяйственного значения по ПДК_{р-хоз} (Приказ Минсельхоза РФ N 552 от 13.12.2016).

Для выделения ^{210}Po применяли радиохимические методы [Chen et al., 1998; Mirzoeva et al., 2020]. ^{210}Po , находившийся в растворенной фазе, извлекали соосаждением с Co-APDC (пирролидин-дитиокарбамат аммония) и последующей фильтрацией. Осадки, как и другие пробы, отобранные для анализа, обрабатывали концентрированными кислотами (HCl, HNO₃) и 30% H₂O₂ при нагревании в течение необходимого для вскрытия пробы времени (от 1,5 до 5 часов). Раствор выпаривали, затем переводили в разбавленный солянокислый раствор (0,3–0,5 моль/л HCl). Присутствующие в растворе ионы Fe³⁺, мешающие спонтанному осаждению полония переводили в Fe²⁺, добавлением гидроксилamina гидрохлорида (NH₂OH·HCl) при нагревании. Затем проводили спонтанное осаждение полония на серебряный диск в течение 3,5–4 часов при температуре 85–90°C. Химический выход полония составлял 80–90 %. Изготовленные счетные образцы измеряли с помощью α -спектрометрического комплекса «ALPHADuo» ORTEC-Ametek (США). Удельную активность ^{210}Po в пробах и погрешность определения (SD) рассчитывали в соответствии с [Chen et al., 1998], результаты выражали в Бк/кг сухой массы для донных отложений и взвеси, в мБк/л – для растворенной части. Погрешность измерения не превышала 15%.

Было отобрано 15 объемов воды по 1 л для определения тяжелых металлов, 9 объемов по 10 л для определения радионуклида ^{210}Po . 15 проб воды для определения ТМ и 12 проб воды для определения ^{210}Po было обработано для определения содержания исследуемых элементов во взвешенном веществе (ВВ). Также было отобрано 20 проб донных отложений.

Результаты и обсуждение

Сводные данные о качестве вод, в отношении содержания в них растворенных форм ТМ, р. Фатала как объекта хозяйственно-питьевого назначения и рыбохозяйственного значения приведены соответственно на рисунках 2 и 3.

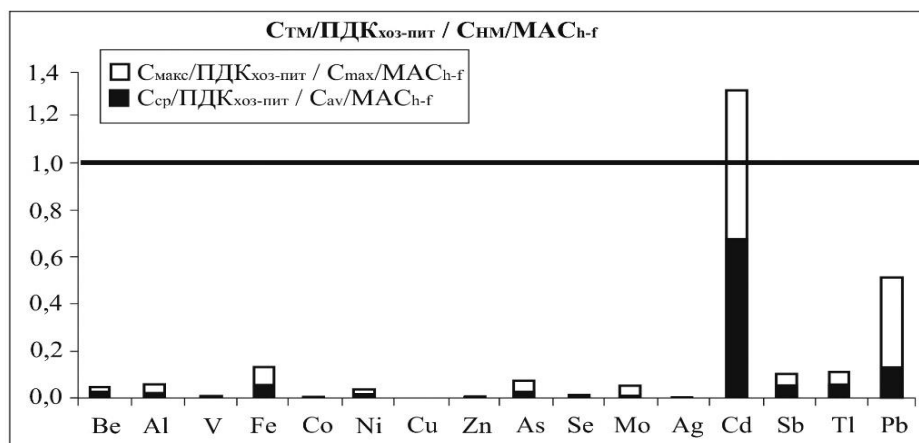


Рис. 2. Средние и максимальные концентрации определявшихся ТМ в воде р. Фатала, нормированные по ПДК_{хо3-пит} (СанПиН-1.2.3685-21) /

Fig. 2. Average and maximum concentrations of determined HM in the water of the Fatala River; standardized according to the MAC of household and food (SanRul&In-1.2.3685-21)

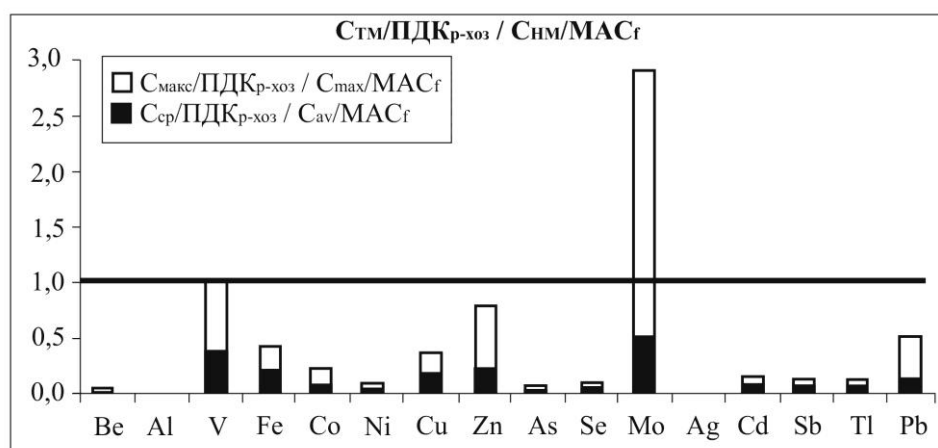


Рис. 3. Средние и максимальные концентрации определявшихся ТМ в воде р. Фатала, нормированные по ПДК_{р-хо3} (Приказ Минсельхоза РФ N 552 от 13.12.2016) /

Fig. 3. Average and maximum concentrations of determined HM in the water of the Fatala River; standardized according to the MAC of fishery (Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dated 13.12.2016)

В целом, ситуация в отношении изученных ТМ в водах р. Фатала была благоприятной. Исключение составили только концентрации Cd в воде реки, которые на 4 из 15 станций превышали ПДК_{хо3-пит} (Cd) на 10 ÷ 33 %. Географически станции с повышенными концентрациями Cd были сосредоточены в двух районах. Первый был приурочен к относительно крупному г. Боффа, в 2 км выше которого по течению реки расположен грузовой порт и наиболее вероятным источником повышенного содержания Cd является деятельность порта, связанная, прежде всего, с перевалкой бокситов и движением крупнотоннажных судов. Второй район находится в центральной части реки, где отсутствует интенсивная антропогенная деятельность, поэтому источник повышенных концентраций Cd здесь не очевиден.

Превышение величины ПДК_{р-хо3} в отношении Mo (рис. 3) фактически наблюдалось только на океанических станциях отбора, что, наиболее вероятно, отражает повышенный геохимический фон по этому элементу в морских водах по сравнению

с пресными, а национальные нормы РФ для водоемов рыбохозяйственного значения предназначены, прежде всего, для пресноводных акваторий. Вместе с тем, выявлена достаточно сильная прямая корреляционная связь между концентрациями растворенных форм Mo ($R^2 = 0,63$), V ($R^2 = 0,77$), Se ($R^2 = 0,71$), и соленостью воды. Таким образом, содержания Mo, V и Se можно рассматривать как маркеры осолонения вод устья реки и интенсивности водообмена низовья реки с океаном.

Одним из основных механизмов самоочищения вод водных объектов от консервативных загрязнителей (к которым относятся и ТМ) является их сорбционное связывание с взвешенными в воде веществами, последующим седиментационным депонированием в донные отложения. Интенсивность такого самоочищения определяется, с одной стороны, накопительной способностью ВВ в отношении элимилируемых веществ, а с другой – интенсивностью оборота ВВ в водном объекте. Аккумуляционная способность объектов водных экосистем, в т.ч. ВВ, количественно описывается величиной коэффициента накопления (K_n). При этом чем выше величины K_n в отношении отдельного элемента, тем более эффективно седиментационное самоочищение от него водной толщи, а чем K_n ниже, тем проще происходит ремобилизация этого элемента в более геохимически подвижную растворенную форму [Tereshchenko et al., 2024]. Результаты расчетов K_n взвесей вод р. Фатала представлены на рисунке 4. Максимальные K_n определены для Al ($n \cdot 10^8$) и Fe ($n \cdot 10^7$), минимальные для Sb, Se, Zn и Cd ($n \cdot 10^4$). Отмечено, что наибольший размах значений K_n был характерен для Ag, Mo, Sb и Cd, что наиболее вероятно определяется различием их биогеохимического поведения в соленых и пресных водах. Такие высокие величины K_n в отношении Al и Fe в водах р. Фатала, очевидно, связаны не только с их биогеохимическим поведением и установившимся физико-химическим сорбционным равновесием, но и наличием в составе взвесей бокситной пыли.

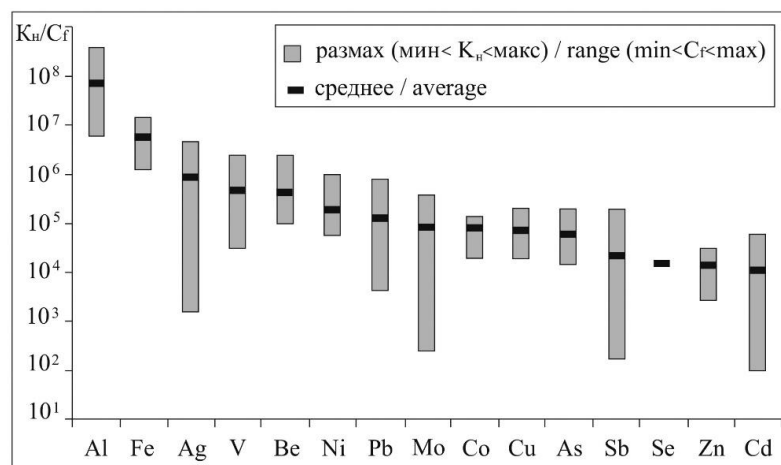


Рис. 4. Коэффициенты накопления (K_n) ТМ взвешенным веществом вод реки Фатала /

Fig. 4. Accumulation coefficients (AC) of HM by suspended matter in the waters of the Fatala River

Последняя представляет собой смесь труднорастворимых оксидов алюминия и железа. Также значительные K_n определяют быстрое удаление этих элементов на ВВ в донные отложения, поэтому, вопреки ожиданиям, повышенные концентрации Al в воде реки Фатала не отмечаются.

^{210}Po в экосистеме реки Фатала. Как известно, поступление основного до-
зобразующего природного радионуклида ^{210}Po (который также по своей атомной

массе является тяжелым элементом) в речные системы из местных техногенных источников (включая места открытой добычи полезных ископаемых) может заметно влиять на повышение его концентрации (активности) в различных компонентах этих систем [Carvalho et al., 2017]. В водной среде ^{210}Po присутствует в растворенной и взвешенной формах, причем взвешенное органическое вещество может аккумулировать до 99 % этого природного радионуклида. Наибольшие значения удельной активности ($A_{\text{уд}}$) растворенной формы ^{210}Po были получены для приустьевых акваторий Атлантического океана (рис. 5).

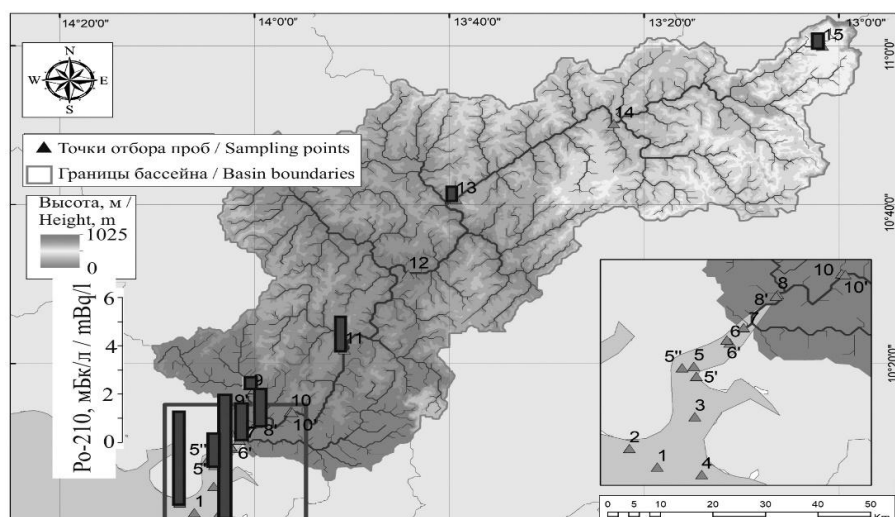


Рис. 5. Удельная активность ^{210}Po в воде (растворенной фазе) реки Фатала /
Fig. 5. Activity concentration of ^{210}Po in water (dissolved phase) of the Fátala River

Повышенные уровни $A_{\text{уд}}^{210}\text{Po}$ в донных отложениях также отмечались в устьевой зоне реки Фатала (рис. 6).

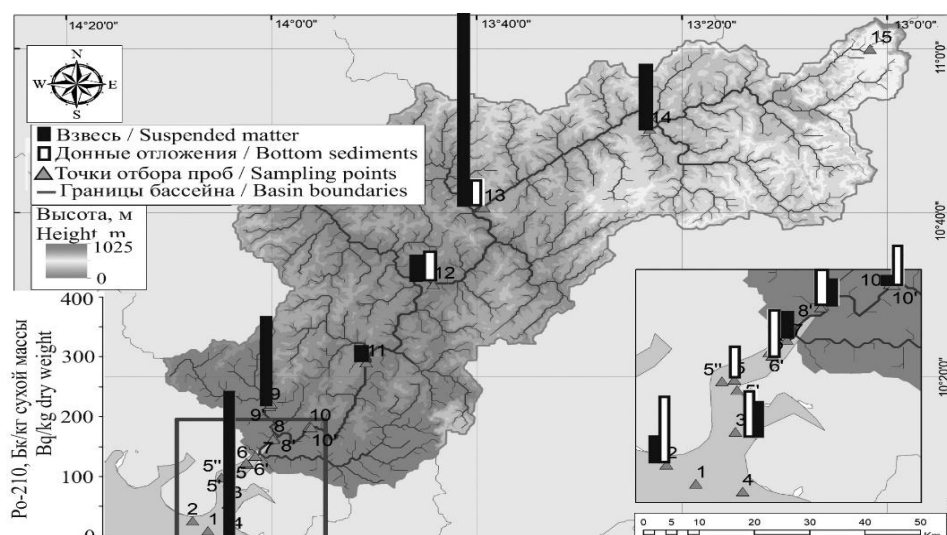


Рис. 6. Удельная активность ^{210}Po во взвеси и донных отложениях реки Фатала /
Fig. 6. Activity concentration of ^{210}Po in suspended matter and bottom sediments of the Fátala River

Оседающая взвесь, как и в случае с ТМ, способствует переносу ^{210}Po из водной толщи в донные отложения [Carvalho et al., 2017]. Это было подтверждено результа-

тами определения удельной активности ^{210}Po в растворенной и взвешенной фазах, а также донных отложениях реки Фатала (рис. 5, 6). При этом, $A_{\text{уд}}^{210}\text{Po}$ в илах с высоким содержанием органики была значительно выше, чем в песках (рис. 7).

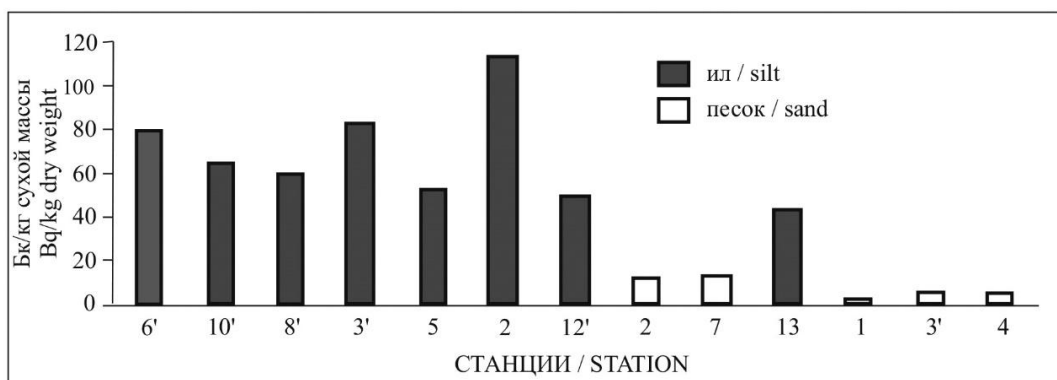


Рис. 7. Удельная активность ^{210}Po в илистых и песчаных донных отложениях /

Fig. 7. Activity concentration of ^{210}Po in silt and sand bottom sediments

Показана зависимость между $A_{\text{уд}}^{210}\text{Po}$ в растворенной фазе и соленостью воды (рис. 8).

Величины общей $A_{\text{уд}}^{210}\text{Po}$ в воде реки Фатала были значительно ниже (на три порядка) уровня вмешательства (УВ=0,11 Бк/кг) для питьевой воды, рекомендованного Нормами радиационной безопасности РФ (СанПиН 2.6.1.2523-09, 2009).

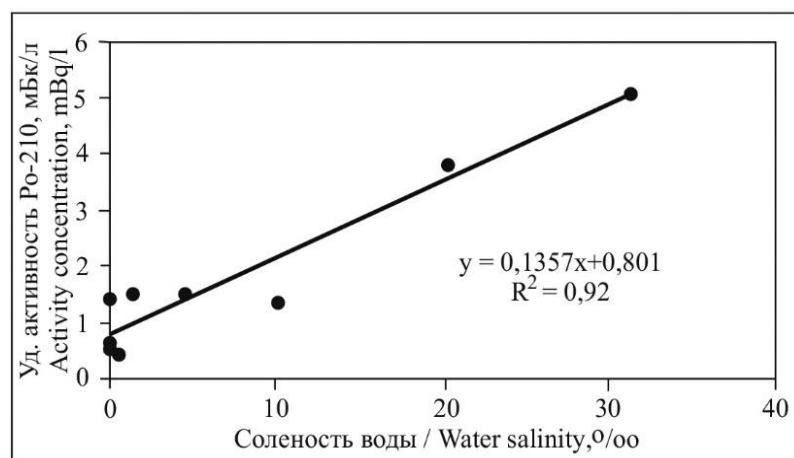


Рис. 8. Соотношение между удельной активностью ^{210}Po в растворенной фазе и соленостью воды (р. Фатала, Атлантический океан) /

Fig. 8. The relationship between the activity concentration of ^{210}Po in the dissolved phase and the salinity of the water (the Fatala River and the Atlantic Ocean)

Выводы

Впервые получены результаты по загрязнению реки Фатала (Гвинейская Республика) тяжелыми металлами и природным радионуклидом ^{210}Po . В воде реки из всех исследуемых элементов превышение ПДК для воды хозяйственно-питьевого назначения в отношении ТМ наблюдалось только для Cd. Это требует дополнительных исследований. Величины общей $A_{\text{уд}}^{210}\text{Po}$ в воде изучаемого района были на три

порядка ниже уровня вмешательства ($УВ=0,11$ Бк/кг) для питьевой воды, рекомендованного Нормами радиационной безопасности РФ. Используя эти исследования в качестве примера для определения влияния добычи полезных ископаемых открытым способом на экологическое состояние рек добывающих стран, получено, что воды реки Фатала являются, в целом, благоприятными в отношении загрязнения ТМ и природным радионуклидом ^{210}Po . Учитывая, что открытый способ добычи полезных ископаемых наносит самый большой ущерб окружающей среде, нашими результатами показано, что такие виды загрязнителей как ТМ и ^{210}Po не являются ключевыми, влияющими на качество вод в реках, протекающих по территории с открытым способом добычи полезных ископаемых. Проводимые исследования направлены на решение задач приоритетных направлений научно-технического развития Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». М., Кремль. 1 декабря 2016 г. № 642, а именно: обеспечение возможности эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий; создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания.

Литература

1. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2012. – 576 с.
2. Камара Н.Ф., Петровская М.В. Горнодобывающая промышленность Республики Гвинея: особенности и перспективы развития. // Наукоедение. – 2017. – Т. 9. № 6. – С. 1–12.
3. Рерих В.А. Горнодобывающая промышленность и ее влияние на экологию. // Наука и образование сегодня. – 2019. – № 3. – С. 112–113.
4. Carvalho F., Fernandes S., Fesenko S., Holm E., Howard B., Martin P., Phaneuf M., Porcelli D., Pröhl G., Twining J. The Environmental Behaviour of Polonium. Technical report series No. 484. Vienna: IAEA, 2017. – 255 p.
5. Chen Q., Dahlgaard H., Nielsen S.P., Aarkrog A. Determination of ^{210}Po and ^{210}Pb in mussels, fish, sediments and petroleum. // RISØ National Laboratory (Roskilde. Denmark). – 1998. – 10 p.
6. Chen X., Li X., Wu P., Xuefang Z., Yabin L., Tao W., Wenrui R. The development and utilization of bauxite resources in the Guizhou Province and relevant challenges to the ecology and the environment. // Mineral Resources Management. – 2022. – Vol. 38. No. 2. – pp. 5–30. DOI: 10.24425/gsm.2022.141667.
7. Diallo A.M., Konaté A.A., Oularé F., Zaheer M. Vulnerability of groundwater to pollution at the Dabiss bauxite mining area. Boké Prefecture. Republic of Guinea. // Geology Ecology and Landscapes. – 2022. – pp. 1–20.
8. Diallo P. Regime Stability. Social Insecurity and Bauxite Mining in Guinea. London: Routledge, 2019. – 142 p. DOI: 10.4324/9780429286544.
9. Kolie B., Jun Y., Sunahara G., Camara M. Characterization of the rock blasting process impacts in Lefa gold mine. Republic of Guinea. // Environmental Earth Sciences. – 2021. – Vol. 80. – Art. No. 175. – pp. 1–17.
10. Kolie B., Yao J., Sunahara G., Duonamou L. Environmental impact of Lefa gold mining on its local population. Republic of Guinea. // Natural Resources. – 2019. – Vol. 10. – pp. 305–323. DOI: 10.4236/nr.2019.108020.
11. Mamedov V.I., Chausov A.A., Okonov E.A., Makarova M.A., Boeva N.M. The World's largest Fouta Djallon–Mandingo bauxite province (West Africa): Part I. Background. // Geology of Ore Deposits. – 2020. – Vol. 62. – pp. 163–176. DOI: 10.1134/S1075701520020026.

12. Mirzoeva N.Yu., Korotkov A.A., Cogan S., Trapeznikov A.V., Lazorenko G.E. ²¹⁰Poin Crimeansaltlakes. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – Vol. 219. – Art. No. 106270. – pp. 1–11 p. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106270.
13. Oshionebo E. *Mineral Mining in Africa. Legal and Fiscal Regimes*. 1st Edition. London: Routledge, 2020. – 378 p. DOI: 10.4324/9781351055543.
14. Sanoh O., Zhang Q., Wang D. Aurélien N. Guinea's bauxite resources evaluation and forecasting using elasticity dem and method. // *Open Journal of Social Sciences*. – 2022. – Vol. 10. – pp. 400–418. DOI: 10.4236/jss.2022.104029.
15. Tereshchenko N.N., Proskurnin V.Yu., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Hiep N.T. Dissolved and particulate metals and metalloids in the eastern Mekong Delta, Vietnam. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2024. – Vol. 206. – Art. No. 116679. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116679.
16. Traoré D.L., Traoré S., Diakité S. Bauxite industry in Guinea and value opportunities of the resulting red mud as residue for chemical and civil engineering purposes. // *Journal of Civil Engineering Research*. – 2014. – Vol. 4. Issue 1. – pp. 14–24. DOI: 10.5923/j.jce.20140401.03.
17. Widder L., Pacioni T.D., Bocoum O. Sustainably growing Guinea's bauxite-aluminum industry. // Chapter in Book *Regional development in Africa*. / Ed. by N. Edomath, 2019. – 260 p. DOI: 10.5772/intechopen.78853.
18. Wilhelm C., Maconachie R. Exploring local content in Guinea's bauxite sector: Obstacles, opportunities and future trajectories. // *Resources Policy*. – 2020. – Vol. 71. Issue 3. – Art. No. 101935. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101935.

References

1. Vernadsky V.I. *Biosphere and noosphere*. Moscow. Iris-press. 2012. 576 p. (In Russ.)
2. Kamara N.F., Petrovskaya M.V. Mining industry of the Republic of Guinea: features and prospects of development. *Naukovedenie*. 2017. Vol. 9. No. 6. pp. 1–12.
3. Roerich V.A. Mining industry and its impact on ecology. *Science and education today*. 2019. No. 3. pp. 112–113. (In Russ.)
4. Carvalho F., Fernandes S., Fesenko S., Holm E., Howard B., Martin P., Phaneuf M., Porcelli D., Pröhl G., Twining J. *The Environmental Behaviour of Polonium*. Technical report series No. 484. Vienna. IAEA. 2017. 255 p.
5. Chen Q., Dahlgaard H., Nielsen S.P., Aarkrog A. Determination of ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in mussels, fish, sediments and petroleum. *RISØ National Laboratory (Roskilde, Denmark)*. 1998. 10 p.
6. Chen X., Li X., Wu P., Xuefang Z., Yabin L., Tao W., Wenrui R. The development and utilization of bauxite resources in the Guizhou Province and relevant challenges to the ecology and the environment. *Mineral Resources Management*. 2022. Vol. 38. No. 2. pp. 5–30. DOI: 10.24425/gsm.2022.141667.
7. Diallo A.M., Konaté A.A., Oularé F., Zaheer M. Vulnerability of groundwater to pollution at the Dabiss bauxite mining area. Boké Prefecture. Republic of Guinea. *Geology Ecology and Landscapes*. 2022. pp. 1–20.
8. Diallo P. *Regime Stability. Social Insecurity and Bauxite Mining in Guinea*. London. Routledge. 2019. 142 p. DOI: 10.4324/9780429286544.
9. Kolie B., Jun Y., Sunahara G., Camara M. Characterization of the rock blasting process impacts in Lefa gold mine. Republic of Guinea. *Environmental Earth Sciences*. 2021. Vol. 80. Art. No. 175. pp. 1–17.
10. Kolie B., Yao J., Sunahara G., Duonamou L. Environmental impact of Lefa gold mining on its local population. Republic of Guinea. *Natural Resources*. 2019. Vol. 10. pp. 305–323. DOI: 10.4236/nr.2019.108020.
11. Mamedov V.I., Chausov A.A., Okonov E.A., Makarova M.A., Boeva N.M. The World's largest Fouta Djallon–Mandingo bauxite province (West Africa): Part I. Background. *Geology of Ore Deposits*. 2020. Vol. 62. pp. 163–176. DOI: 10.1134/S1075701520020026.

12. Mirzoeva N.Yu., Korotkov A.A., Cogan S., Trapeznikov A.V., Lazorenko G.E. ²¹⁰Poin Crimeansaltlakes. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 219. Art. No. 106270. pp. 1–11 p. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106270.
13. Oshionebo E. *Mineral Mining in Africa. Legal and Fiscal Regimes*. 1st Edition. London. Routledge. 2020. 378 p. DOI: 10.4324/9781351055543.
14. Sanoh O., Zhang Q., Wang D. Aurélien N. Guinea's bauxite resources evaluation and forecasting using elasticity dem and method. *Open Journal of Social Sciences*. 2022. Vol. 10. pp. 400–418. DOI: 10.4236/jss.2022.104029.
15. Tereshchenko N.N., Proskurnin V.Yu., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Hiep N.T. Dissolved and particulate metals and metalloids in the eastern Mekong Delta, Vietnam. *Marine Pollution Bulletin*. 2024. Vol. 206. Art. No. 116679. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116679.
16. Traoré D.L., Traoré S., Diakité S. Bauxite industry in Guinea and value opportunities of the resulting red mud as residue for chemical and civil engineering purposes. *Journal of Civil Engineering Research*. 2014. Vol. 4. Issue 1. pp. 14–24. DOI: 10.5923/j.jce.20140401.03.
17. Widder L., Pacioni T.D., Bocoum O. Sustainably growing Guinea's bauxite-aluminum industry. Chapter in *Book Regional development in Africa*. Ed. by N. Edomath. 2019. 260 p. DOI: 10.5772/intechopen.78853.
18. Wilhelm C., Maconachie R. Exploring local content in Guinea's bauxite sector: Obstacles. opportunities and future trajectories. *Resources Policy*. 2020. Vol. 71. Issue 3. Art. No. 101935. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101935.

Юбилей Константина Сергеевича Харебова



18 июня 2024 года исполнилось 75 лет со дня рождения известного российского ученого, кандидата технических наук, ведущего научного сотрудника отдела геофизики, инженерной сейсмологии и геоинформатики Геофизического института – филиала Владикавказского научного центра Российской академии наук.

К.С. Харебов долгие годы профессионально занимается научными исследованиями в области компьютерного моделирования разнообразных процессов и установок, в качестве инструментария, при этом, широко использует методы многовариантного статистического анализа и численные методы статистики в геофизике. С помощью методов статистического анализа К.С. Харебов проводил статистиче-

скую обработку данных в области археологии, психологии, медицины, педагогики, геологии, сейсмологии. В настоящее время он активно занимается проблемами инженерной сейсмологии.

Харебов Константин Сергеевич, родился 18 июня 1949 г. в г. Тбилиси в семье военнослужащего.

Высшее образование получил в Тбилисском государственном университете, который окончил в 1972 г. по специальности «теоретическая физика».

С 1972 по 1974 г. служил офицером в Советской Армии.

С 1974 по 1993 г. работал в институте стабильных изотопов г. Тбилиси (НИИСИ) старшим научным сотрудником. В 1984 году поступил в аспирантуру Института атомной энергии, после окончания, которой 11 ноября 1987 году получил диплом кандидата технических наук.

С 1993 по 2008 г. работал в Северо-Осетинском государственном университете им. К.Л. Хетагурова доцентом кафедры прикладной математики. Одновременно преподавал во Владикавказском колледже электроники.

С 2008 г. работает ведущим научным сотрудником ГФИ ВНЦ РАН.

Научные интересы К.С. Харебова связаны с компьютерным моделированием процессов и установок на следующие темы:

- Разделение изотопов. В НИИСИ занимался моделированием процессов разделения изотопов (азота, кислорода, углерода, криптона и др.).
- Атомные энергетические установки. В НИИСИ и в институте атомной энергии им. Курчатова участвовал в разработке и проектировании ядерного энергетического реактора ВГ-400. Выполнил компьютерное обоснование принципов работы гадолиниевой системы компенсации реактивности реактора ВГ-400.
- Физика твердого тела. В НИИСИ провел компьютерные расчеты электронной структуры бора и боридов с целью получения новых материалов с предсказанными свойствами. Исследовал компьютерными методами электропроводимость бинарных систем.
- Гидродинамика. В ГФИ ВНЦ РАН провел гидродинамический расчет сейсмических колебаний плотины и подфундаментных слоев грунтового массива с учетом влияния воды в водохранилище и математическое моделирование способа управления селективным водозаборным процессом в стратифицированном водоеме.
- Инженерная сейсмология. В ГФИ ВНЦ РАН провел исследование зависимости параметров сейсмического воздействия от скорости продольных и поперечных волн, плотности и жесткости грунтов на основе трехмерных акселерограмм землетрясений Японии из системы K-NET. Участвовал в сейсмическом микрорайонировании территории г. Владикавказа. По результатам инструментальных записей с соавторами были определены параметры катастрофического схода ледника Колка в 2002 г. Участвовал в медико-экогеофизическом мониторинге горных территорий.
- ГИС-технологии. Создал первую электронную карту г. Владикавказа.

К.С. Харебов является автором монографии и более 100 научных статей, в том числе 14 авторских свидетельств СССР и 12 патентов РФ. Он владеет языками: осетинским, русским, английским, немецким.

К.С. Харебов является заместителем председателя Первичной профсоюзной организации Геофизического института ВНЦ РАН, принимает активное участие во всех мероприятиях организации. Неоценима его роль, члена редколлегии журнала «Геология и геофизика Юга России» в создании обложек – его прекрасные фотографии удивительных пейзажей Северной Осетии радуют глаз читателя.

К.С. Харебов пользуется высоким авторитетом среди сотрудников Института, в том числе, молодежи. Он награждался различными ведомственными наградами и благодарностями.

Коллектив Геофизического института ВНЦ РАН горячо поздравляет Константина Сергеевича Харебова со знаменательным событием – 75-летним юбилеем и желает ему крепкого здоровья, долгих лет жизни и хороших радостных дней!

Пожелаем ему и в дальнейшем жить активной научной, общественной жизнью, и еще многое реализовать из задуманного им на благо людям!

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 1.6.1 Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика; 1.6.4 Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых; 1.6.6 Гидрогеология; 1.6.9 Геофизика; 1.6.10 Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 1.6.11 Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1.6.12 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 1.6.20 Геоинформатика, картография; 1.6.21 Геоэкология; 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика; 2.8.8 Геотехнология, горные машины, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3–5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20–25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, резюме (аннотации) на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи.

Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <https://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Резюме (аннотация) с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов (кегль 14 полужирный, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки и ответственного автора.

Резюме (аннотация) должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то резюме (аннотация) должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если

рукопись подается на английском языке, необходимо привести также резюме (аннотацию) на русском. Резюме (аннотация) печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце резюме (аннотации) обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Благодарности/Acknowledgements. В этом разделе следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$ и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (MBt/cm^2) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Все надписи на русском языке на рисунках и в таблицах дублируются на английский. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем - на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

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: 1.6.1 General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4 Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6 Hydrogeology; 1.6.9 Geophysics; 1.6.10 Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11 Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields; 1.6.12 Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20 Geoinformatics, cartography; 1.6.21 Geoecology; 2.8.6 Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8 Geotechnology, mining machines and related scientific directions.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes:

– articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <https://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),
- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, const , $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and ν , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0.5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for

the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova Str., Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal « *Geology and Geophysics of Russian South* ». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76 40 56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 4. 2024 г. Том 14)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 17.12.2024 г. Дата фактического выхода 26.12.2024 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 26,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 114.

Свободная цена.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.

Издатель:

**Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра
"Владикавказский научный центр Российской академии наук"**

Адрес издателя и редакции:

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

тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

<http://geosouth.ru>

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.

362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3