

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 4 / 2023



ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

Геофизический институт Владикавказского научного центра
Российской академии наук

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY AND
GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 13
№ 4 / 2023**

Владикавказ 2023

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

член-корр. РАН **Д. Р. Каптунов**, 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, 2023

Фото на обложке – Изморозь над Кармадонскими воротами (К.С. Харебов)

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

Editor in Chief

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

Deputy Editor in Chief

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

Members of Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir M. Makeev, Dr. Sci. (Geol.Min.), Sergeev Insti-
tute of Environmental Geoscience (IEG), RAS, Moscow
Illarion D. Muzaev Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

Executive Secretary

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

Managing Editor

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

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

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

The Journal is published since 2011.

Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

Vladikavkaz Scientific Centre of RAS

Founder address
1 Williamsa Str., Mikhailovskoe,
Prigorodny district,
RNO-Alania, 363110, Russia
Tel.: 8(8672)726788
e-mail: info@vncran.ru
http://vncran.ru

Publisher:

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

Publisher and Editorial address:
93a, Markova Str., Vladikavkaz, RNO-Alania, 362002 Russia
Tel.: 8 (8672) 764084; Fax: +7 (8672) 764056
e-mail: southgeo@mail.ru
http://geosouth.ru

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2023

Cover photo – Frost over the Karmadon Gate (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

===== ЛИТОЛОГИЯ =====	
Парада С.Г., Артемов И.А. Литогенетическая концепция золотоносности черносланцевых толщ и ее приложение к рудным районам Юга России.....	6
===== ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА =====	
Попков В.И., Попков И.В. Дислокации бокового сжатия в пермо-триасовом доплитном комплексе и платформенном чехле п-ова Бузачи (запад Туранской плиты).....	18
===== ГЕОФИЗИКА =====	
Босиков И.И., Клюев Р.В., Ревазов В.Ч. Усиление и генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы.....	32
Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ($M_w=7,8$).....	42
Чернов Ю.К. О новом подходе к учету влияния «грунтового» фактора при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий.....	55
Эртелева О.О., Аптикаев Ф.Ф. Модель очаговой зоны землетрясения и прогноз параметров сильных движений грунта.....	71
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ =====	
Закруткин В.Е., Решетняк В.Н. Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса.....	85
Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Особенности цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана.....	99
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ =====	
Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт на этапе вскрытия продуктивного пласта.....	108
===== ГЕОЭКОЛОГИЯ =====	
Бурдзиева О.Г., Козырев Е.Н., Кортиев А.Л., Ревазов М.О. Особенности формирования геоэкологических рисков горной территории на основе анализа причинно-следственных связей геодинамических эндогенных и экзогенных процессов.....	124
Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш., Гагаева З.Ш. Динамика соотношения фракций фитомассы и мортмассы на ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике.....	135
Мухартова Ю.В., Гибадуллин Р.Р., Ольчев А.В., Керимов И.А. Модельный подход для восстановления приземных вертикальных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью.....	149
===== ГЕОГРАФИЯ =====	
Петров Л.А. Геологические и геоморфометрические факторы формирования ареалов земледельческих террас среднегорной Чечни.....	162
===== ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА =====	
Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряженно-деформированное состояние массива.....	177
Мохов А.В. Минерагенический аспект накопления сульфат- и гидрокарбонат-ионов в шахтных водах (на примере Восточного Донбасса).....	188
===== ГЕОИНФОРМАТИКА =====	
Габараев А.Ф., Мельков Д.А., Кортиев А.Л., Козырев Е.Н. Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов.....	198

CONTENTS

===== LITHOLOGY =====	
Parada S.G., Artemov I.A. Lithogenetic concept of gold content of Black shale strata and its application to the ore regions of Southern Russia	6
===== GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =====	
Popkov V.I., Popkov I.V. Dislocations of lateral compression in the Permo-Triassic additional plate complex and the platform cover of the Buzachi peninsula (west of the Turan plate).....	18
===== GEOPHYSICS =====	
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch. Amplification and generation of electromagnetic radiation during the passage of acoustic waves through igneous rocks	32
Geodakyan E.G., Karapetyan Jh.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtychyan M.A., Mkrtychyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 february 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ($M_w = 7.8$)	42
Chernov Y.K. About a new approach to accounting for the influence of the "soil" factor in probabilistic assessments of seismic hazard of territories.....	55
Erteleva O.O., Aptikaev F.F. Earthquake source zone model and prediction of strong ground motion parameters	71
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY =====	
Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N. Distribution of iron and its minerals in river sediments of Eastern Donbass	85
Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S. Features of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan.....	99
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS =====	
Gasumov E.R., Gasumov R.A. Estimation of the hydrodynamic perfection of the "well-reservoir" system formed at the stage of opening a productive reservoir	108
===== GEOECOLOGY =====	
Burdzieva O.G., Kozyrev E.N., Kortiev A.L., Revazov M.O. Features of formation of geoeological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes	124
Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.S., Gagaeva Z.Sh. Dynamics of the ratio of phytomass and mortmass Fractions at key sites of the Carbon Landfill in the Chechen Republic.....	135
Mukhartova I.V., Gibadullin R.R., Olchev A.V., Kerimov I.A. Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas.....	149
===== GEOGRAPHY =====	
Petrov L.A. Geological and geomorphometric factors in the formation of agricultural terraced areas in mid-mountain Chechnya.....	162
===== GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS =====	
Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass	177
Mokhov A.V. Mineragenic aspect of the accumulation of sulfate and hydrocarbonate ions in mine waters (on the example of Eastern Donbass).....	188
===== GEOINFORMATICS =====	
Gabaraev A.F., Melkov D.A., Kortiev A.L., Kozyrev E.N. Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes	198

УДК 553.411

DOI: 10.46698/VNC.2023.76.15.001

Оригинальная статья

Литогенетическая концепция золотоносности черносланцевых толщ и ее приложение к рудным районам Юга России

С.Г. Парада^{1,2}, И.А. Артемов²

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

²Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344005, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: segripa@rambler.ru

Статья поступила: 20.10.2023, доработана: 27.11.2023, принята к публикации: 01.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В статье показано, что разработанная на основе исследований золотоносных территорий Сибири и Востока России литогенетическая концепция золотоносности черносланцевых толщ находит приложение на Юге России. **Цель исследования.** Суть концепции в вычлениении роли литологических факторов в формировании золотоносности черносланцевых толщ, благодаря которым происходит выщелачивание рудного вещества, его транспортировка и концентрирование в виде участков рудных минерализаций с определенными вещественно-морфологическими признаками. Эта роль определяется фаціальными условиями седиментогенеза, характером и полнотой проявления последующих стадий катагенеза, катагенеза и метаморфизма. **Методы исследования.** В зависимости от стадии литогенеза разработаны седиментационно-диагенетическая, эксфильтрационно-катагенетическая, эксгальационно-осадочная и метаморфогенная модели формирования золотоносности черносланцевых толщ, описывающие динамику и кинетику соответствующих минералообразующих систем. Минералообразующие системы, отвечающие седиментационно-диагенетической модели, формируются в условиях шельфа океанического бассейна и представлены скоплениями сингенетических золотоносных сульфидов; при эксфильтрационно-катагенетической модели – формируются в условиях континентального склона и его подножия при лавинной седиментации осадков, последующем катагенезе и представлены латераль-секреционными кварцево- жильно-прожилковыми зонами; системы, отвечающие эксгальационно-осадочной модели, формируются на океаническом ложе при проявлении подводной гидротермальной деятельности и представлены сульфидными и кремнисто-сульфидными залежами. Особое место занимает метаморфогенная минералообразующая система. Показано, что эта система также использует внутренние вещественно-энергетические ресурсы для своего развития. Функционирование метаморфогенной системы осуществляется в условиях зонального метаморфизма. Источником золота и других рудообразующих компонентов при этом являются породы в зоне наиболее интенсивного метаморфизма. Агентом извлечения и транспортировки золота в область рудоотложения являются термодегидратационные воды. **Результаты исследования.** Установлено, что все четыре модели находят подтверждение в рудных районах Юга России. В соответствии с перечисленными моделями образуются крупнообъемные минерализации определенных минерально-морфологических типов с надкларковыми (предрудными) концентрациями золота. На Юге России эти модели применимы к относительно слабо золотоносным залежам сульфидно-вкрапленных руд в юрских углеродистых осадках Кардан-Куспартинского района, сульфидно-вкрапленной минерализации в каменноугольных углисто-терригенных толщах Восточного Донбасса, к обширным областям распространения кварцевых жильно-прожилковых зон в докембрийских и палеозойских черносланцевых

толщах Малка-Муштинского и Урупо-Лабинского рудных узлов. К продуктам развития метаморфогенной системы отнесены проявления некоторых золотоносных минерализаций Малка-Муштинского узла.

Ключевые слова: литогенез, метаморфизм, черносланцевые толщи, золото, минералообразующие системы, Донбасс, Северный Кавказ.

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

Для цитирования: Парада С.Г., Артемов И.А. Литогенетическая концепция золотоносности черносланцевых толщ и ее приложение к рудным районам Юга России. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 6-17. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.15.001

LITHOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2023.76.15.001

Original paper

Lithogenetic concept of gold content of the Black shale strata and its application to the ore regions of Southern Russia

S.G. Parada ^{1,2}, I.A. Artemov ²

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

²Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,
Rostov-on-Don 344005, Russian Federation, e-mail: segripa@rambler.ru

Received: 20.10.2023, revised: 27.11.2023, accepted: 01.12.2023

Abstract: Relevance. The article shows that the lithogenetic concept of the gold content of the black shale strata developed on the basis of studies of the gold-bearing territories of Siberia and the East of Russia finds application in the South of Russia. **Aim.** The essence of the concept is to isolate the role of lithological factors in the formation of the gold content of the black shale strata, due to which the ore substance is leached, transported and concentrated in the form of ore mineralization sites with certain material and morphological features. This role is determined by the facies conditions of sedimentogenesis, the nature and completeness of the manifestation of the subsequent stages of diagenesis, catagenesis and metamorphism. **Research methods.** Depending on the stage of lithogenesis, sedimentation-diagenetic, exfiltration-catagenetic, exhalation-sedimentary and metamorphogenic models of the formation of gold content of black shale strata describing the dynamics and kinetics of the corresponding mineral-forming systems have been developed. Mineral-forming systems corresponding to the sedimentation-diagenetic model are formed in the conditions of the shelf of the oceanic basin and are represented by accumulations of syngenetic gold-bearing sulfides; exfiltration-catagenetic model – are formed in the conditions of the continental slope and its foot during avalanche sedimentation of sediments, subsequent catagenesis and is represented by lateral-secretive quartz-vein-veined zones; the systems corresponding to the exhalation-sedimentary model are formed on the oceanic bed during the manifestation of underwater hydrothermal activity and are represented by sulfide and siliceous-sulfide deposits. A special place is occupied by the metamorphogenic mineral-forming system. It is shown that this system also uses internal material and energy resources for its development. The functioning of the metamorphogenic system is carried out in the conditions of zonal metamorphism. The source of gold and other ore-forming components in this case are rocks in the zone of the most intense metamorphism. The agent of gold extraction and transportation to the ore deposition area is thermodehydration waters. **The results of the work.** It is established that all four

models are confirmed in the ore regions of Southern Russia. In accordance with the listed models, large-volume mineralizations of certain mineral-morphological types with supraclark (pre-ore) concentrations of gold are formed. In the South of Russia, these models are applicable to relatively weakly gold-bearing deposits of sulfide-interspersed ores in the Jurassic carbonaceous sediments of the Cardan-Kuspartinsky district, sulfide-interspersed mineralization in the carboniferous carboniferous-terrigenous strata of the Eastern Donbass, to extensive areas of quartz veined and veinlet-disseminated zones in Precambrian and Paleozoic black shale strata of the Malka-Mushta and Urupo-Labinsk ore clusters. Manifestations of some gold-bearing mineralizations of the Malka-Mushta node are attributed to the products of the development of the metamorphogenic system.

Keywords: lithogenesis, metamorphism, black shale strata, gold, mineral-forming systems, Donbass, North Caucasus.

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

For citation: Parada S.G., Artemov I.A. Lithogenetic concept of gold content of Black shale strata and its application to the ore regions of Southern Russia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 6-17. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.15.001

Введение

Выявленная нами зависимость минерально-морфологических типов золоторудных месторождений Сибири и Дальнего Востока от литологических особенностей и химического состава рудоносных черносланцевых толщ указывает на более тесную связь процессов литогенеза и рудообразования [Parada, 2002]. Наиболее полно такие золотоносные толщи изучены нами в составе складчатого обрамления Сибирской платформы. Они также широко представлены на Азиатском континенте [Goldfarb et al., 2014] и других регионах [Sener et al., 2002; Manikyamba et al., 2008; Large et al., 2011]. Потенциально золотоносные и платиноидоносные черносланцевые толщи выделяются и на Северном Кавказе [Черкашин и др., 2022]. Установлено, что рифейские черные сланцы Северо-Енисейской и Ленской золотоносных провинций отвечают геодинамическим обстановкам шельфа, золотоносные черносланцевые толщи верхнепалеозойско-нижнемезозойского терригенного комплекса Верхояно-Колымского пояса и палеозойского вулканогенно-кремнисто-терригенного комплекса Амуро-Охотской области образовались в обстановке континентального склона и океанического ложа.

Участки повышенных содержаний золота в каждом из перечисленных комплексов являются результатом развития своеобразных типов автономных минералообразующих систем, которые определенным образом, в зависимости от фациальных условий седиментогенеза, характера и полноты проявления последующих стадий литогенеза, организовывали сбор рудного вещества, его транспортировку и концентрацию в виде участков минерализации с определенными вещественно-морфологическими признаками. Такие системы предложено называть литогенными [Parada, 2002]. Литогенные системы обычно не формируют сразу промышленные месторождения. В большинстве случаев они представляют длительный период предистории месторождения [Рундквист, 1997], приводящий к возникновению геохимической системы с достаточным для последующего эндогенного рудообразования содержанием металла [Щербаков, 1976; Кокин, 2005].

Материал и методы

В настоящем исследовании использованы материалы, полученные ранее авторами при исследовании черносланцевых толщ Сибири и Дальнего Востока, приведен-

ные в опубликованной литературе данные, результаты собственных исследований черносланцевых толщ рудных узлов Северного Кавказа и Восточного Донбасса, а также опубликованные данные исследователей Северного Кавказа, в том числе Богуша И.А., Глазыриной Н.В., Рябова Г.В., Черкашина В.И. и др. Основной метод исследования – сравнительный анализ результатов изучения золоторудных месторождений и рудопроявлений и вмещающих черносланцевых толщ в различных регионах.

Результаты и обсуждение

Формирование литогенных систем в каждом из перечисленных комплексов можно описать одной из предлагаемых ниже моделей или их различным сочетанием.

Седиментационно-диагенетическая модель. Золотообразующие системы, отвечающие седиментационно-диагенетической модели, формируются в условиях внешнего шельфа эпиконтинентальных океанических бассейнов. Наиболее типичным примером являются золотоносные сульфидизированные черносланцевые толщ Бодайбинского района, содержащие золотосульфидно-вкрапленные руды месторождений Сухой лог, Голец Высочайший, Вернинское и других подобных объектов. Литолого-фациальными исследованиями установлен по смене фаций профиль обстановок седиментации в позднем рифее. На мелководных участках шельфа, расположенных севернее Бодайбинского прогиба, отлагались песчано-алевритовые осадки и биохемотренные карбонаты. Южнее, в области Бодайбинского прогиба, на периферии шельфа формировались в это время толщ углеродисто-терригенных, иногда слабо известковистых осадков. Отложения рудоносной хомолхинской свиты, при этом, имеют линзообразную форму, т.е. накапливались в специфических фациальных условиях локальной впадины, где возникали условия сероводородного заражения и концентрирования золота осадочно-диагенетическими сульфидами [Буряк, 1982]. Таким образом, повышенные содержания золота в черносланцевых толщах Бодайбинского района обусловлены в решающей степени вкрапленностью осадочно-диагенетических сульфидов, концентрации золота в которых на 1-2 порядка выше, чем в самих сланцах. Повышенное содержание органического углерода в хомолхинской свите (2-4 % в среднем) указывает на высокую биопродуктивность моря в данном месте, что в совокупности с особенностями пространственного размещения хомолхинской седиментационной впадины (периферия шельфа) объясняется непосредственной близостью области апвеллинга. Следствием этого, как показано в работе [Ермолаев и др., 1999], является автохтонное накопление жизненно важных элементов фитопланктоном в зоне повышенной биопродуктивности по гидрофронт и осаждение этих элементов с отмирающим планктоном. Лавинные поступления органического вещества в иловый осадок активизируют процессы сульфат-редукции. Образующийся при этом сульфид железа концентрирует золото [Large, Maslennikov, 2020]. Основным процессом, непосредственно определившим высокие концентрации золота, являлось длительное взаимодействие иловых вод, глинистых, богатых органическим веществом хомолхинских осадков, имевших восстановительную среду, с придонными водами, содержащими свободный кислород и повышенные концентрации золота. Существование апвеллинга обеспечивало постоянное обновление придонных вод в течение длительного времени, возможность фиксации металла из их новых порций и его накопление в осадке.

На Юге России этой модели соответствуют условия формирования относительно слабо золотоносных залежей сульфидно-вкрапленных руд в юрских углеродистых осадках Кардан-Куспартинского рудного района [Kaigorodova et al., 2022] и

сульфидно-вкрапленной золотоносной минерализации в каменноугольных углесто-терригенных толщах Восточного Донбасса [Артемов и др., 2022]. Рельеф и обстановки седиментации в бассейне угленакопления способствовали созданию устойчивых условий и формированию диагенетических сульфидов [Мохов, 2022]. В близповерхностных условиях формировался магнетит [Закруткин и др., 2023].

Эксфильтрационно-катагенетическая модель. Особенности формирования золотообразующей системы, отвечающей этой модели, наиболее отчетливо проявлены в Верхояно-Колымском складчатом поясе, где основная золотоносность связана с Верхоянским терригенным комплексом верхнего палеозоя-нижнего мезозоя. Подавляющее большинство золотоносных кварцевых жил и жильно-прожилковых зон месторождений (Дуэт, Юр, Бриндакит, Нежданинское, Кулар и др.) располагается согласно слоистости или образует лестничные жилы и жильно-прожилковые зоны в пластах песчаников, залегающих среди толщ углеродистых алевропелитовых пород. Протяженность отдельных жил, имеющих мощность обычно от 0,2 до 1,0 м, достигает 5 км и более. При этом согласно залегающие жилы в деталях повторяют складчатую структуру вмещающих пластов. Часто жилы содержат угловатые включения вмещающих пород размером до 10 см и более, представляющие так называемые «горизонты включения», возникающие в результате внедрения в поры песчаных пород эксфильтрационных вод из зон разуплотнения и создания аномально высоких пластовых давлений. Минеральный состав рудных тел типичен для месторождений малосульфидной формации золотокварцевого типа и сохраняется во всех месторождениях, локализованных в породах Верхоянского комплекса. Более того, снижение бортовых кондиций в месторождениях Колымы привело к тому, что в составе рудных тел объединяются отдельные секущие кварцевые жилы и разно ориентированные прожилки. В итоге морфология таких объединенных рудных тел становится близкой к пластовой, а их границы совпадают с определенными литолого-стратиграфическими подразделениями.

Ранее установлено, что накопление терригенных осадков Верхоянского комплекса происходило на пассивной окраине Сибирской платформы. Оно сменило предшествующее в более раннем палеозое и позднем докембрии карбонатонакопление в связи со сменой в конце визейского века аридного климата на гумидный и глобальным понижением уровня моря. Согласно проведенным исследованиям [Япаскерт, 1999], осадки Верхоянского комплекса представляют собой разнообразные лавинные накопления зерновых и суспензионных автокинетических потоков долинно-веерных систем континентального склона. Учитывая возраст и фациальные условия отложений, можно предположить, что рассеянное органическое вещество в них представлено частицами высших растений. Растительный детрит, находясь во взвешенном состоянии, адсорбировал золото из морской воды и захоронился в осадке. Неуравновешенная процессами диагенеза органико-минеральная масса очень скоро оказывается в зоне катагенеза под давлением вышележающих осадков. Уже на стадии позднего катагенеза в изначально обедненном глинистым веществом песчаниках отмечаются рекристаллизационно-грануляционный бластез на контактах песчаных кварцевых зерен и пластические деформации в кварце, сопровождающиеся окварцеванием и альбитизацией полевых шпатов. В песчаниках также появляются кварцевые прожилки. В алевропелитах и глинистых песчаниках катагенез проявляется иначе, а именно в виде последовательной трансформации глинистых минералов группы смектитов через смешанослойную фазу в гидрослюда и частично в хлорит. На стадии метагенеза гидрослюда 1 Md трансформируется в серицит

2 Мл. Все это имеет важное значение для формирования золотого оруденения, т. к. приводит к неравномерному разогреву толщи осадков и появлению миграционных форм кремнезема и золота.

Это связано с тем, что необратимый процесс уплотнения глинистых коллоидно-дисперсных систем сопровождается увеличением температуры этого агрегата. Таким образом, в переслаивающихся песчано-глинистых толщах должны возникать температурные градиенты, обусловленные разностью температур между «саморазогревающимися» глинистыми и «холодными» песчанистыми пластами. Это приводит к усиленной эксфильтрации вод в пласты безглинистых песчаников и опережающему аутигенному минералогенезу в них, что подтверждается петрографическими исследованиями. На глубинах 3-5 км в условиях лавинного захоронения осадков и повышенных (до 150-200°C) температур начинается массовая альбитизация толщ за счет натрия, захороненного в порах морских вод. Главной особенностью этого геохимического процесса, определяющей металлогеническую специализацию толщ, является разделение натрия и хлора. В данных термодинамических условиях натрий фиксируется в новообразованном альбите, а хлор, не образуя собственной минеральной фазы, насыщает эксфильтрационные воды и, обладая избирательно высокой активностью по отношению к золоту, способствует его выщелачиванию, миграции и перераспределению в масштабе всей толщи. Согласно экспериментальным данным, в интервале температур 150-200°C резко возрастает растворимость кварца осадочных пород. Таким образом, уже на стадии катагенеза формируются кремнекислые гидротермальные растворы. Они насыщаются золотом за счет его десорбции с частиц рассеянного углеродистого вещества. Полезный груз отлагается в форме согласных или лестничных кварцевых жил в пластах песчаников.

Изложенный механизм был впервые предложен нами для обоснования повсеместной золотоносности черносланцевых толщ Амуро-Охотской области по данным геохимического изучения золотоносных районов. Позже он был подтвержден экспериментально [Глюк, 1986].

Совокупность изложенных выше данных указывает на латераль-секреционный механизм формирования золотоносных кварцевых жил Верхояно-Колымской области, реализующийся уже в условиях катагенеза. При этом толщи алевролитов и аргиллитов выступают в качестве генератора золотоносных кремнекислых растворов, которые разгружаются в пластах песчаников, выступающих в качестве коллекторов, и образуют послонные и лестничные кварцевые жилы. Степень золотоносности их определяется концентрацией благородного элемента в эксфильтрационных растворах. Если золото в растворах отсутствовало, то формировались безрудные кварцевые жилы.

Именно этой модели соответствуют обширные области распространения кварцевых жил и жильно-прожилковых (штокверковых) зон в черносланцевых толщах Уруп-Лабинского и Малка-Муштинского рудных узлов. Латераль-секреционный механизм образования таких жил и жильно-прожилковых зон в указанных районах подтверждается их доскладчатым образованием. По нашим наблюдениям в обнажениях и данным [Глазырина, Глазырин, 2011; Шишкалов, 2017] эти жилы и зоны испытывают складчатые деформации вместе с вмещающими породами.

Эксгальционно-осадочная модель. Золоторудная система, отвечающая эксгальционно-осадочной модели, разработана нами на примере Джагдинской провинции Амуро-Охотской области. Главной особенностью этой системы является ее возникновение на океаническом ложе относительно узкого океанического бассейна (рифта) на ранней стадии его развития. В таком бассейне накопление осадков осуществля-

лось на океаническом ложе при периодических проявлениях подводной вулканической и гидротермальной активности. В результате подводные эксгаляции приносили кремнезем, золото и другие рудные элементы в терригенные осадки и формировали самостоятельные золотоносные сульфидно-кремнистые и кремнистые залежи, переслаивающиеся с океаническими базальтами. Узость бассейна приводила к тому, что терригенный материал периодически покрывал все ложе. В результате сформировалась ритмичная толща с частым переслаиванием терригенных пород, океанических базальтов и эксгаляционно-осадочных кремнистых, сульфидных и кремнисто-сульфидных образований. При этом терригенные и эксгаляционные осадки оказывали геохимическое влияние друг на друга. Первые обогащались Fe, Mn, Co, Ni, Cu и Au; вторые – органическим и глинистым веществом. Основное металлогеническое значение таких залежей и прослоев проявляется в ходе последующих эндогенных процессов, когда они являются источником золота и других рудообразующих элементов, но есть и промышленные месторождения, в частности – Ворошиловское в Джагдинской провинции Амуро-Охотской складчатой области, представленное залежами эксгаляционно-осадочных сульфидно-кремнистых руд.

На Юге России этой модели соответствуют отдельные районы Уруп-Лабинского рудного узла, где установлено сочетание обширных участков кварцевой жильной и прожилковой минерализации эксфильтрационно-катагенетического типа и залежей колчеданной и пирит-пирротин-пентландитовой эксгаляционно-осадочной минерализации [Глазырина, Глазырин, 2011]. Собственно, и само Урупское медно-колчеданное месторождение, по представлениям некоторых геологов, имеет эксгаляционно-(гидротермально)-осадочное происхождение [Скрипченко, 1972; Рябов, Богуш, 2012].

Предлагаемая модель эксгаляционно-осадочного формирования предрудной минерализации в черносланцевых комплексах близка модели вулканогенно-осадочного образования золотоносных железистых кварцитов [Константинов, 1993]. От вулканогенно-осадочных моделей, разработанных для ряда золотосульфидных месторождений в древних зеленокаменных трогах Канады и Австралии [Tomish, 1986], она отличается, прежде всего, отсутствием связи с конкретными вулканическими постройками. В этом отношении эксгаляционно-осадочные сульфидно-кремнистые залежи Амуро-Охотской области и Уруп-Лабинского рудного узла напоминают так называемые чехольные фации в модели Томиша, формирующиеся на значительном удалении от вулканической постройки в морской терригенной толще.

Метаморфогенные золоторудные системы. Обычно участки первично литогенной золотоносной минерализации в углеродисто-терригенных комплексах значительно осложнены или существенно преобразованы многократно наложенными эндогенными процессами. Зональный метаморфизм или проявления интрузивного магматизма могут привести к усложнению морфологии и состава первичной минерализации. Такие месторождения принято называть полигенно-полихронными [Курбанов и др., 1992; Буряк, Бакулин, 1998; Groves et al., 2003 и др.]. Тем не менее, в них сохраняются признаки влияния литолого-геохимических особенностей вмещающих пород на существенный состав руд и продуктивных гидротермальных растворов [Parada, 2002].

Приуроченность золотоносных кварцевых жил рудных полей Амуро-Охотской складчатой области к куполовидным структурам с ареалами зонального метаморфизма свидетельствует о генетической связи процессов куполообразования, метаморфизма и золотого оруденения. В работе [Буряк, 1982] показано, что области наиболее высокотемпературного метаморфизма, расположенные в ядрах куполов, являются зонами выноса рудообразующих элементов.

К метаморфогенным золоторудным системам на Юге России можно отнести проявления золотоносных минерализаций Малка-Муштинского рудного узла. Здесь мы рассматриваем региональный метаморфизм как фактор перераспределения первично литогенных концентраций золота и других рудообразующих элементов.

На регионально метаморфизованные вулканогенно-осадочные толщи наложены процессы контактового метаморфизма различной степени. Они затронули преимущественно породы бечасынской и малкинской свит, не только в экзоконтакте малкинского гранитного массива и субпластовых тел габброидов хасаутского комплекса, но часто и на локальных участках, без видимой пространственной связи с интрузивами.

Контактовый метаморфизм в связи с интрузией малкинских гранитов выразился в обширном ореоле ороговикования и биотитизации пород бечасынской свиты, развитии мигматитоподобных кварц-микроклиновых образований. В непосредственной близости от контакта, во вмещающих толщах развиваются линзовидные тела пегматитоподобных тел, сложенных крупнокристаллическими калишпатом и мусковитом.

В связи с телами габброидов хасаутского комплекса развиваются кварц-биотитовые и кварц-биотит-полевошпатовые роговики.

Наличие биотита в постоянной парагенетической ассоциации роговиков свидетельствует о том, что контактовый метаморфизм проходил с участием воды, – активного агента перераспределения золота в масштабе толщи. Это, как показали геохимические исследования, сказалось на изменении концентраций золота в первичных литогенных минерализациях и вмещающих породах Малка-Муштинского рудного узла.

Таким образом, литогенные золоторудные системы на Юге России представлены в районах развития углеродистых толщ. Здесь, как и в регионах Сибири и Востока России, выделяются три минерально-морфологических типа золотоносных минерализаций, которые или сами по себе являются объектом геологоразведочных работ, или сопутствуют более богатым рудам. Исходя из изложенной выше концепции, изученные на Юге России золотоносные минерализации в черносланцевых толщах можно рассматривать как предрудные концентрации благородных металлов, связанные с различными стадиями литогенеза углеродисто-терригенных толщ. К ним относятся: 1) участки скопления осадочно-диагенетических сульфидов в углеродистых отложениях юры Кардан-Куспартинского рудного района и объемная пиритизация в каменноугольных углисто-терригенных толщах Восточного Донбасса; 2) зоны концентрации кварцевых жил и прожилков в Уруп-Лабинском и Малка-Муштинском рудных районах; 3) прослои и залежи сульфидных и сульфидно-кремнистых субмаринных эксгальционно-осадочных образований в составе разреза черносланцевой толщи Уруп-Лабинского района. Содержания золота во всех перечисленных образованиях на один-два порядка превышают фоновые и составляют сотые и десятые доли г/т при крайне неравномерном распределении.

Анализ химических составов рудоносных углеродистых пород перечисленных районов показывает, что среди них, как и в Восточных регионах России, по соотношению щелочей можно выделить две группы: 1) нормальные калиевые и 2) аномальные натриевые [Parada, 2002]. Кроме того, на Северном Кавказе, среди натриевых толщ выявлена 3-я группа черносланцевых пород с аномальной магниевой специализацией. Такая специализация объясняется соответствующим петрофондом, в качестве которого выступают ультраосновные породы древнего офиолитового комплекса, что подтверждается микроскопическими исследованиями шлифов, где часто обнаруживаются микрообломки ультраосновных пород и зерна хромшпи-

нелида [Глазырина, Глазырин, 2011; Черкашин и др., 2022; Парада, 2023 и др.]. Это позволило предложить достаточно универсальную металлогеническую модель благородных металлов для всего фанерозоя Северного Кавказа [Черкашин и др., 2022].

Калиевая и натриевая специализация углеродисто-терригенных толщ Юга России, как и на Востоке России, устанавливается не только в пределах участков рудных минерализаций, но и сохраняется по простиранию толщ, то есть является свойством самих пород, независимо от того, есть в них оруденение или нет.

Заключение

1. Литогенетическая концепция золотоносности черносланцевых толщ, разработанная на основе исследования золотоносных районов Сибири и Дальнего Востока, находит свое подтверждение в регионах Юга России. Суть концепции в вычленении роли литологических факторов в формировании относительно слабой золотоносности черносланцевых толщ, создающих предрудные концентрации благородного металла. Условия, возникающие на различных стадиях литогенеза, могут приводить к формированию золотоносных минерализаций в крупных объемах на отдельных участках черносланцевой толщи. Эти участки относительно слабо золотоносных минерализаций являются источником рудообразующих элементов при последующих эндогенных рудообразующих процессах.

2. Литогенетическая концепция включает четыре модели формирования золотоносных минерализаций в черносланцевой толще, описывающих седиментационно-диагенетическую, эксфильтрационно-катагенетическую, эксгаляционно-осадочную и метаморфогенную золотоконцентрирующие минералообразующие системы.

3. Седиментационно-диагенетическая система формируется в условиях шельфа и представлена скоплениями сингенетических сульфидов. Повышенные содержания золота связаны с его перераспределением в осадке на стадии диагенеза за счет собирательной перекристаллизации и избирательной концентрации в сульфидах. Этой модели на Юге России соответствуют относительно слабо золотоносные залежи сульфидно-вкрапленных руд в юрских углеродистых осадках Кардан-Куспартинского района, послонные скопления сульфидно-вкрапленной минерализации в каменноугольных углито-терригенных толщах Восточного Донбасса.

4. Эксфильтрационно-катагенетическая система формируется в условиях континентального склона и его подножия при лавинной седиментации осадков. Неуровновешенная процессами диагенеза органико-минеральная масса быстро оказывается в условиях катагенеза при повышенных температуре и давлении. Происходит объемная альбитизация толщ за счет натрия поровых морских вод, высвобождение кремнезема и его массовое переотложение. Хлор в условиях катагенеза не находит собственной минеральной формы, насыщает поровые растворы, выщелачивает и переносит золото вместе с кремнеземом. Образующиеся при этом объемные кварцево-жильно-прожилковые зоны обладают относительно слабой золотоносностью. Этой модели соответствуют обширные области распространения кварцевых жильно-прожилковых зон в докембрийских и палеозойских черносланцевых толщах Малка-Муштинского и Урупо-Лабинского рудных узлов.

5. Эксгаляционно-осадочная система формируется на океаническом ложе при проявлении подводной гидротермальной деятельности. При этом образуются часто золотоносные кремнистые, сульфидные и кремнисто-сульфидные залежи в составе черносланцевой толщи.

6. Метаморфогенная система, как и другие литогенные минералообразующие

системы, использует для своего развития внутренние вещественные и энергетические ресурсы. Функционирование метаморфогенной системы осуществляется в условиях зонального динамо-термального или локального термального метаморфизма. Источником золота и других рудообразующих компонентов при этом являются породы в зоне наиболее интенсивного метаморфизма. Агентом извлечения и транспортировки золота в область рудоотложения являются термодегидратационные (метаморфогенные) воды. К продуктам развития метаморфогенной системы на Юге России отнесены проявления некоторых золотоносных минерализаций Малка-Муштинского рудного узла.

Литература

1. Артемов И.А., Попов Ю.В., Шарова Т.В. Минералого-петрографическая зональность пород горящих террикоников песчано-глинистого состава Восточного Донбасса. // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 11. – С. 107–112.
2. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
3. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. – Владивосток: Дальнаука. 1998. – 403 с.
5. Глазырина Н.В., Глазырин Е.А. Кобальтин-пентландит-пирротиновая сульфидная минерализация черносланцевых отложений. // Записки Российского минералогического общества. – 2011. – Т. 140. № 1. – С. 83–90.
6. Глюк Д.С. Перераспределение золота в колонке горных пород в термоградиентных условиях. Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 286. №5. – С. 1232–1235.
7. Ермолаев Н.П., Созинов Н.А., Котина Р.П., Пашкова Е.А., Горячкин Н.И. Механизмы концентрирования благородных металлов в терригенно-углеродистых отложениях. – М.: Научный мир, 1999. – 124 с.
8. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Гибков Е.В., Складенко Г.Ю. Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 102–121. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008.
9. Кокин А.В. Оценка перспективности рудных объектов. – Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат». – 2005. – 384 с.
10. Константинов М.М. Стратиформное золотое оруденение – достижения и проблемы построения моделей рудообразующих систем. // Руды и металлы. – 1993. – №1–2. С.14–20.
11. Курбанов Н.К., Арифуров Ч.Х., Ехиванов В.А., Романов В.И. Полигенно-полихронные золоторудные месторождения терригенных комплексов. // Руды и металлы. – 1992. – Стартовый номер. – С. 54–61.
12. Мохов А.В. Реконструкция рельефа и обстановки седиментации в бассейне угленакпления (на примере Восточного Донбасса). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 107–118. DOI: 10.46698/VNC. 2022.86.44.007.
13. Парада С.Г. Платина и платиноиды в палеозойских черносланцевых толщах Передового хребта (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 112–124. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.73.008.
14. Рундквист Д.В. Фактор времени при формировании месторождений: периоды, эпохи, этапы и стадии рудообразования // Геология руд. месторождений. – 1997. – Т. 39, № 1. – С. 11–24.
15. Рябов Г.В., Богуш И.А. Типизация колчеданных месторождений Северного Кавказа. // Известия вузов Сев.-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – №5. – С. 88–91.
16. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. – М.: Недра. – 1972. – 216 с.
17. 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. – № 4 (91). – С. 4–9. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-4-9.

18. 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.
19. Щербаков Ю.Г. Химическая эволюция вещества Земли и эндогенное рудообразование. Золото и редкие элементы в геохимических процессах. – Новосибирск: Наука. – 1976. – С. 14–33.
20. Япаскурт О.В. Предметаморфические изменения осадочных пород в стратиферо: Процессы и факторы. – М.: ГЕОС. 1999. – 260 с.
21. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. // *Gondwana Research*. – 2014. – Vol. 25. – pp. 48–102.
22. Groves D. I., Goldfarb R. J., Robert F., Hart C. J. R. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. // *Econ. Geol.* – 2003. – Vol. 98. – pp. 1–29.
23. Kaigorodova E.N., Chugaev A.V., Lebedev V.A., Sadasyuk A.S., Gareev B.I., Batalin G.A. The Raduzhnoe Au–sulfide deposit (Northern Caucasus): geological settings, mineralogy, and sources of metals. // *Geology of ore deposits*. – 2022. – T. 64. №5. – P. 257–280. DOI: 10.1134/s1075701522040031.
24. Large R. R., Bull S. W., Maslennikov V. V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. // *Econ. Geol.* – 2011. – Vol. 106. – P. 331–358.
25. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits. // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. № 4. –P. 339–352.
26. Manikyamba C., Kerrich R., González-Alvarez I., Mathura R., Khannaa T.C. Geochemistry of Paleoproterozoic black shales from the Intracontinental Cuddapah basin, India: implications for provenance, tectonic setting, and weathering intensity. // *Precam. Res.* – 2008. – Vol. 162. – P. 424–440.
27. Parada S.G. The litogenic nature of some gold deposits in carbonaceous-terrigenous sequences. // *Lithology and Mineral Resources*. – 2002. – Vol. 37. No. 3. – pp. 270–283.
28. Sener A.K., Grainger C.J., Groves D.I. Epigenetic gold-platinum-group element deposits: examples from Brazil and Australia. // *Trans. Inst. Mining Metal.* – 2002. – Vol. 111. – P. 65–73.
29. Tomish S.A. An outline of the Economic Geology of Kalgoorlie, Western Australia. // *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* – 1986. – No. 89. – P. 35–55.

References

1. Artemov I.A., Popov Yu.V., Sharova T.V. Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning sandy-argillaceous waste heaps of the Eastern Donbass. *Advances in current natural science*. 2022. No.11. pp. 107–112. (In Russ.)
2. Buryak V.A. *Metamorphism and ore formation*. Moscow. Nedra. 1982. 256 p. (In Russ.)
3. Buryak V.A., Bakulin Yu.I. *Metallogeny of gold*. Vladivostok: Dalnauka, 1998. 403 p. (In Russ.)
5. Glazyrina N.V., Glazyrin E.A. Kobaltin-pentlandite-pyrrhotite sulfide mineralization of black shale deposits. *Notes of the Russian Mineralogical Society*. 2011. Vol. 140. No. 1. pp. 83–90. (In Russ.)
6. Gluck D.S. Redistribution of gold in a column of rocks under thermogradient conditions. *Dokl. Academy of Sciences SSSR*. 1986. Vol. 286. No. 5. pp. 1232–1235. (In Russ.)
7. Ermolaev N.P., Sozinov N.A., Kotina R.P., Pashkova E.A., Goryachkin N.I. Mechanisms of concentration of precious metals in terrigenous-carbonaceous deposits. Moscow. Scientific World. 1999. 124 p. (In Russ.)
8. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu. Autigenic iron minerals in river sediments of Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 102–121. DOI:10.46698/VNC.2023.95.74.008. (In Russ.)
9. Kokin A.V. *Evaluation of the prospects of ore objects*. Rostov-on-Don. Rostizdat. 2005. 384 p. (In Russ.)

10. Konstantinov M.M. Stratiform gold mineralization – achievements and problems of constructing models of ore-forming systems. *Ores and metals*. 1993. No. 1–2. pp. 14–20. (In Russ.)
11. Kurbanov N.K., Arifulov Ch.Kh., Ivanov V.A., Romanov V.I. Polygenic-polychronous gold deposits of terrigenous complexes. *Ores and metals*. 1992. Starting number. pp. 54–61. (In Russ.)
12. Mokhov A.V. Reconstruction of land relief and sedimentation conditions in the coal accumulation basin (at the example of Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 107–118. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.44.007. (In Russ.)
13. Parada S.G. Platinum and platinoids in Paleozoic black shale strata of the Forward Range (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 112–124. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.73.008. (In Russ.)
14. Rundqvist D.V. The time factor in the formation of deposits: periods, epochs, stages and stages of ore formation. *Geology of Ore. deposits*. 1997. V. 39. No. 1. pp. 11–24. (In Russ.)
15. Ryabov G.V., Bogush I.A. Typification of pyrite deposits of the North Caucasus. *News of universities of the North Caucasus region. Technical science*. 2012. No. 5. pp. 88–91. (In Russ.)
16. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow. Nedra. 1972. 216 p. (In Russ.)
17. Cherkashin V.I., Bogush I.A., Ryabov G.V., Isaeva N.A. Metallogenic model of noble metals of the Phanerozoic North Caucasus. In: *Proc. of the Institute of Geology of DSC RAS*. 2022. No. 4. Issue 91. pp. 4–9. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-4-9. (In Russ.)
18. 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.)
19. Shcherbakov Yu.G. Chemical evolution of the Earth's matter and endogenous ore formation. *Gold and rare elements in geochemical processes*. Novosibirsk. Nauka. 1976. pp. 14–33. (In Russ.)
20. Yapaskurt O.V. Submetamorphic changes in sedimentary rocks in the stratisphere: Processes and factors. Moscow. GEOS. 1999. 260 p. (In Russ.)
21. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Research*. 2014. Vol. 25. pp. 48–102.
22. Groves D.I., Goldfarb R.J., Robert F., Hart C.J.R. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.* 2003. Vol. 98. pp. 1–29.
23. Kaigorodova E.N., Chugaev A.V., Lebedev V.A., Sadasyuk A.S., Gareev B.I., Batalin G.A. The Raduzhnoe Au–sulfide deposit (Northern Caucasus): geological settings, mineralogy, and sources of metals. *Geology of ore deposits*. 2022. Vol. 64. No. 5. pp. 257–280. DOI: 10.1134/s1075701522040031.
24. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ. Geol.* 2011. Vol. 106. pp. 331–358.
25. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits. *Minerals*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 339–352.
26. Manikyamba C., Kerrich R., González-Alvarez I., Mathura R., Khanna T.C. Geochemistry of Paleoproterozoic black shales from the Intracontinental Cuddapah basin, India: implications for provenance, tectonic setting, and weathering intensity. *Precam. Res.* 2008. Vol. 162. pp. 424–440.
27. Parada S.G. The litogenic nature of some gold deposits in carbonaceous-terrigenous sequences. *Lithology and Mineral Resources*. 2002. Vol. 37. No. 3. pp. 270–283.
28. Sener A.K., Grainger C.J., Groves D.I. Epigenetic gold-platinum-group element deposits: examples from Brazil and Australia. *Trans. Inst. Mining Metal.* 2002. V. 111. pp. 65–73.
29. Tomish S.A. An outline of the Economic Geology of Kalgoorlie, Western Australia. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* 1986. No. 89. pp. 35–55.

УДК: 551.24

DOI: 10.46698 /VNC.2023.24.56.002

Оригинальная статья

Дислокации бокового сжатия в пермо-триасовом доплитном комплексе и платформенном чехле п-ова Бузачи (запад Туранской плиты)

В.И. Попков , И.В. Попков 

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

Статья поступила: 02.10.2023, доработана: 24.11.2023, принята к публикации: 29.11.2023

Резюме: Актуальность работы. Вплоть до настоящего времени преобладает точка зрения о решающей роли вертикальных тектонических движений в формировании структуры платформ, включая антиклинальные складки их чехла. Помимо теоретического этот вопрос имеет и практическое значение, поскольку последние зачастую содержат в себе скопления нефти и газа. В последние годы появляется все больше свидетельств о наличии в чехле платформ дислокаций, образовавшихся под воздействием сил бокового сжатия. Одним из таких районов является Бузачинский свод, располагающийся в западной части Туранской плиты. Изучение особенностей строения развитых здесь складок и разрывов позволит решить вопрос механизма их формирования и сделать шаг вперед в понимании генезиса внутриплитных дислокаций. **Цель исследований.** Изучение морфологии складчатых и разрывных нарушений в доплитном комплексе и платформенном чехле Бузачинского свода с целью определения их морфологии и условий образования. **Методы исследования.** Комплексный анализ материалов сейсмической разведки, глубокого бурения, геологической съемки. Произведена интерпретация временных разрезов с целью определения морфологии дислокаций. Проанализированы материалы структурного бурения, нефтепоисковых скважин, а также геологической съемки. При необходимости выполнялись структурные построения с привлечением данных сейсморазведки. Изучен керновый материал, палеонтологические определения, выполнена корреляция разрезов скважин. С целью восстановления истории развития территории в целом и осложняющих ее локальных поднятий произведены палеотектонические построения. Применены методы сейсмостратиграфии и структурного анализа. **Результаты работы.** Проведенные исследования свидетельствуют об определяющей роли тангенциального сжатия в формировании структуры доплитного пермо-триасового комплекса, а также перекрывающих платформенных отложений. Описана морфология конкретных складчато-надвиговых дислокаций. Установленные закономерности в строении и площадном распространении дислокаций позволяют не только глубже понять механизм их образования, но и решить чисто практические задачи, поскольку в них сосредоточены крупные скопления углеводородов. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании геологического строения других менее изученных районов молодой платформы, а также способствовать выбору рациональной методики геологоразведочных работ на нефть и газ.

Ключевые слова: антиклинали, надвиги, тангенциальное сжатие, ловушки нефти и газа.

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

Для цитирования: Попков В.И., Попков И.В. Дислокации бокового сжатия в пермо-триасовом доплитном комплексе и платформенном чехле п-ова Бузачи (запад Туранской плиты). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 18-31 DOI: 10.46698 /VNC.2023.24.56.002

DOI: 10.46698 /VNC.2023.24.56.002

Original paper

Dislocations of lateral compression in the Permo-Triassic additional plate complex and the platform cover of the Buzachi Peninsula (west of the Turan plate)

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

Kuban State University, 149 Stavropol Str., Krasnodar 350059,
Russian Federation, e-mail: geoskubsu@mail.ru

Received: 02.10.2023, revised: 24.11.2023, accepted: 29.11.2023

Abstract. Relevance of the work. Up to now, the prevailing point of view is about the decisive role of vertical tectonic movements in the formation of the structure of platforms, including the anticline folds of their cover. In addition to the theoretical, this issue is also of practical importance, since the latter often contain accumulations of oil and gas. In recent years, there has been more and more evidence of the presence of dislocations in the cover of platforms formed under the influence of lateral compression forces. One of these areas is the Buzachinsky vault, located in the western part of the Turan plate. Studying the structural features of the folds and ruptures developed here will solve the problem of the mechanism of their formation and make a step forward in understanding the genesis of intraplate dislocations. **The purpose of the research.** To study the morphology of folded and discontinuous disorders in the pre-plate complex and platform cover of the Buzachinsky arch in order to determine their morphology and conditions of formation. **Research methods.** Comprehensive analysis of geological and geophysical information, including materials of seismic exploration, deep drilling, geological survey. The interpretation of time sections was made in order to determine the morphology of dislocations. The materials of structural drilling, oil exploration wells, as well as geological survey are analyzed. If necessary, structural constructions were carried out with the involvement of seismic data. Core material, paleontological definitions were studied, correlation of well sections was performed. In order to restore the history of the development of the territory as a whole and the local uplifts complicating it, paleotectonic constructions were made. Methods of seis-mostratigraphy and structural analysis are applied. **Results.** The conducted studies indicate the determining role of tangential compression in the formation of the structure of the pre-plate Permo-Triassic complex, as well as overlapping platform deposits. The morphology of specific fold-thrust dislocations is described. The established patterns in the structure and areal distribution of dislocations make it possible not only to better understand the mechanism of their formation, but also to solve purely practical problems, since large accumulations of hydrocarbons are concentrated in them. The obtained results can be used in the study of the geological structure of other less studied areas of the young platform, as well as contribute to the selection of rational methods of geological exploration for oil and gas.

Keywords: anticlines, thrusts, tangential compression, oil and gas traps.

Acknowledgements: *The reported study was funded by the Russian Science Foundation, project number 23-27-00037.*

Forcitation: Popkov V.I., Popkov I.V. Dislocations of lateral compression in the Permo-Triassic additional plate complex and the platform cover of the Buzachi peninsula (west of the Turan plate). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South. (in Russ.)* 2023. 13(4): 18-31. DOI: 10.46698 / VNC.2023.24.56.002

Введение

В настоящее время можно считать доказанным определяющее значение горизонтальных тектонических напряжений в формировании структуры мобильных поясов [Гиоргобиани, 2019, 2020; Омельченко и др., 2023; Чотчаев и др., 2021; Jourdon e.a., 2020; Sobornov, 1996, 2020]. Сложнее обстоит вопрос о происхождении дислокаций осадочного чехла платформенных территорий, образование которых зачастую связывается с вертикальными движениями блоков фундамента. В последние годы накоплено большое количество материалов по различным регионам, позволяющих пересмотреть эти укоренившиеся представления о генезисе внутриплитных дислокаций [Камалетдинов и др., 1981; Popkov, 1991; Казанцева, 2021, 2023; Borderie e.a., 2019; Carola e.a., 2015]. Особенно показательными в этом отношении являются материалы по Скифско-Туранской платформе, где установлены целые области, имеющие сложное чешуйчато-надвиговое строение [Попков В.И., Попков И.В., 2023]. Одним из таких районов является Бузачинский свод, располагающийся в западной части Туранской плиты, где дислокации бокового сжатия определяют общий стиль тектоники не только доюрского (доплитного) осадочного комплекса, но и перекрывающего мезозойско-кайнозойского платформенного чехла. Установление закономерностей строения дислокаций может способствовать решению и чисто практических задач, поскольку в них часто сосредоточены крупные скопления углеводородов [Казанцева, 2022; Popkov, 1991; Li e.a., 2012; Roeder, 2010; Yu, 2014; Xu, 2004].

Методы исследований

Главную и наиболее ценную информацию о строении складок и разрывов несут в себе материалы сейсмической разведки методом отраженных волн, которой покрыта вся территория полуострова. Произведена интерпретация временных разрезов с целью определения морфологии дислокаций. Для получения более адекватных представлений о строении дислокаций соотношение вертикального и горизонтального масштабов на исходных временных разрезах приводилось в соотношение близкое к 1:1. Проанализированы материалы структурного бурения, нефтепоисковых скважин, а также геологической съемки. При необходимости выполнялись структурные построения с привлечением данных сейморазведки. Изучен керновый материал, палеонтологические определения, выполнена корреляция разрезов скважин. Произведенный палеотектонический анализ позволил восстановить историю развития территории в целом и осложняющих ее локальных поднятий – в частности.

Результаты исследований

Основными структурами платформенного чехла п-ова Бузачи являются одноименный свод и располагающийся южнее Южно-Бузачинский прогиб. Осложняющие их локальные поднятия сгруппированы в несколько субширотных антиклинальных линий, примыкающих с юга к надвигам (рис. 1). Рассмотрим более подробно особенности строения дислокаций на примере наиболее изученных структур.

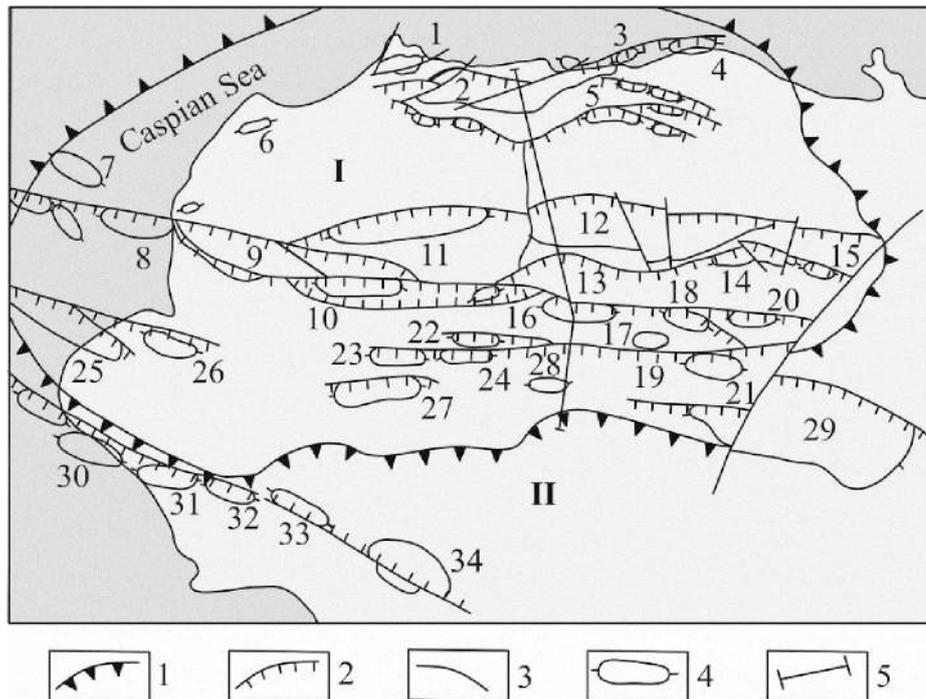


Рис. 1. Тектоническая схема п-ова Бузачи.

1 – границы Бузачинского свода; 2 – надвиги уверенные и предполагаемые; 3 – сдвиги; 4 – прочие разрывы; 5 – платформенные антиклинали: 1 – Арман, 2 – Каламкас, 3 – Каратурун-море, 4 – Суукты, 5 – Каратурун, 6 – Култай, 7 – Бузачи-море, 8 – Каражанбас-море, 9 – Каражанбас, 10 – Жалгизтобе, 11 – Северные Бузачи, 12 – Жаманорпа, 13 – Северная Бесоба, 14 – Акорпа, 15 – Жалзак, 16 – Жапалак, 17 – Бесоба, 18 – Киньткты, 19 – Жарылгас, 20 – Айсор, 21 – Северный Кызан, 22 – Северный Тасбас, 23 – Западный Тасбас, 24 – Тасбас, 25 – Долгинец, 26 – Северный Долгинец, 27 – Алатобе, 28 – Западный Кызан, 29 – Кызан-Акшимрау, 30 – Торлун-море, 31 – Западный Торлун, 32 – Торлун, 33 – Акмола, 34 – Кошак; 6 – линия сейсмического разреза, приведенного на рис. 8 /

Fig. 1. Tectonic scheme of Buzachi peninsula.

1 – border Buzachinskiy arch; 2 – thrusts confident and alleged; 3 – shifts; 4 – other breaks; 5 – platform anticline: 1 – Arman, 2 – Kalamkas, 3 – Karaturun-sea, 4 – of Sucti, 5 – Karaturun, 6 – Kultai, 7 – Buzachi-sea, 8 – Karazhanbas-sea, 9 – Karazhanbas, 10 – Zhalghyztobe, 11 – North Buzachi, 12 – of Amanora, 13 – North Besoba, 14 – of Akora, 15 – Alsac, 16 – Japalak, 17 – Besoba, 18 – Kinicki, 19 – Gorillas, 20 – Aysor, 21 – North Kazan, 22 – and Tasbas, 23 – Western Tasbas, 24 – Tasbas, 25 – Dolgener, 26 – North Dolgener, 27 – Altabe, 28 – Western Kazan, 29 – of Kazan of Akshimrau, 30 – Torlun-sea, 31 – Western Torlun, 32 – Torlun, 33 – Akmola, 34 – Koshak; 6 – the line of the seismic section shown in Fig. 8

Каражанбасское локальное поднятие (номер 9 на рис. 1) представляет собой полуантиклиналь, примыкающую с юга к крупному разрывному нарушению, рассекающему центральную часть Бузачинского свода. Надвиг выгнут к северу-северо-востоку. Ядро складки сложено породами нижнего альба и обрамлено среднеальбскими отложениями. В своде юрские отложения полностью уничтожены эрозией в преднеокомское время, а меловые заметно сокращены в мощности. В лежащем блоке скачкообразно возрастает мощность и стратиграфическая полнота разреза (рис. 2, 3). Подобная ситуация имеет место и на всех других структурах, рассматриваемых ниже.

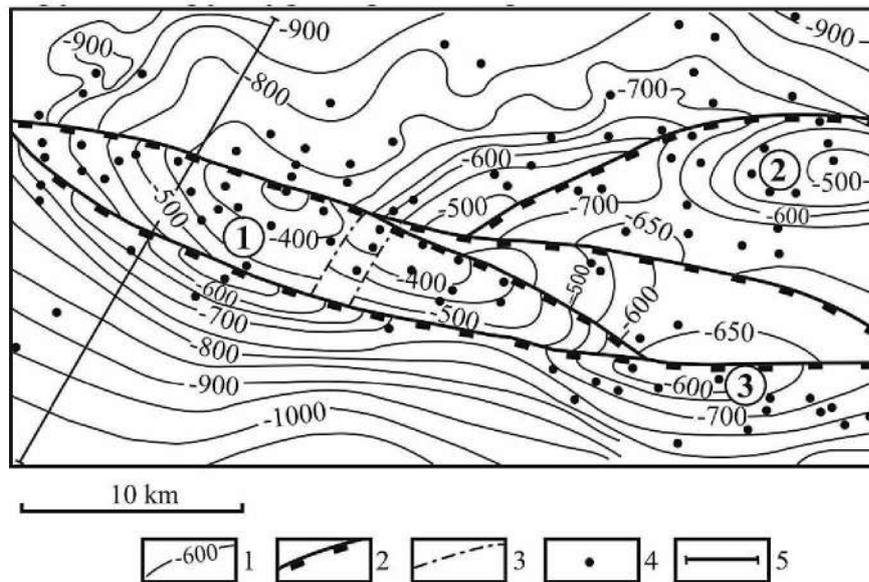


Рис. 2. Каражанбасская и Северо-Бузачинская антиклинали.
Структурная карта по подошве юрских отложений.

1 – стратоизогипсы в м; 2 – надвиги; 3 – сдвиги; 4 – скважины; 5 – линия сейсмического разреза, приведенного на рис. 3; в кружках – антиклинали: 1 – Каражанбасская, 2 – Северо-Бузачинская, 3 – Жалгизтобинская /

Fig. 2. Karazhanbass and North Buzachinskaya anticlines.
Structural map of the bottom of the Jurassic sediments

1 – v m stratoisohypses; 2 – thrusts; 3 – shifts; 4 – wells;
5 – the line of the seismic section shown in Fig. 3; in circles – anticlines:
1 – Karazhanbasskaya, 2 – Severo-Buzachinskaya, 3 – Zhalgiztobinskaya

По подошве юры размеры складки 28×6 км, амплитуда 200 м, вертикальное смещение по контролирующему надвигу достигает 300 м. Вверх по разрезу амплитуда смещения уменьшается, составляя по подошве неокома до 160 м, апта 120 м, альба 100 м.

Южная часть крыла Каражанбасского поднятия взброшена относительно северной его половины по крутопадающему надвигу с вертикальной составляющей смещения по подошве юры 50-60 м. Тектонические нарушения разрывают консолидированные отложения юры и мела и погребены под рыхлыми четвертичными осадками. Плоскости надвигов наклонены к югу и заметно выполаживаются в доюрской части разреза (см. рис. 3).

Свод поднятия рассечен еще несколькими малоамплитудными разрывами, не доходящими, однако, до дневной поверхности. Отложения пермо-триаса во фронтальной части надвига интенсивно перемяты, брекчированы. В керне часто встречаются субгоризонтальные зеркала скольжения.

Несмотря на очевидное наклонное падение разрывов, как на данной площади, так и на многих других поднятиях полуострова достоверно установить пересечение их скважинами очень трудно. Причиной этому является: континентальный генезис юрских и триасовых отложений и невыразительная электрокаротажная характеристика разреза, фрагментарность выноса керна, а для доюрской части разреза положение усугубляется еще и высокой дислоцированностью пород.

Северо-восточнее расположена Северо-Бузачинская асимметричная принадвиговая антиклиналь (номер 11 на рис. 1). Размер ее 20×6 км, амплитуда поднятия по

подошве юрских отложений 150 м. В рельефе дневной поверхности в своде поднятия сформирована эрозионная депрессия, заполненная четвертичными осадками мощностью 35-40 м. Под ними залегают породы нижнего альба с последовательным появлением на крыльях складки отложений среднего и верхнего альба.

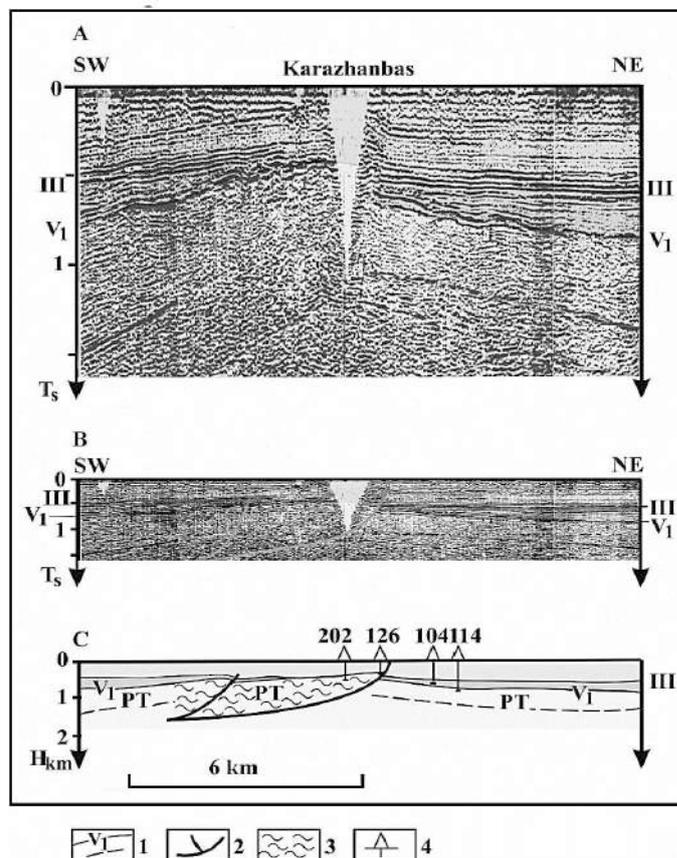


Рис. 3. Сейсмический временной (А, В) и сейсмогеологический разрезы через Каражанбасскую антиклиналь

На разрезе А вертикальный масштаб «растянут» относительно горизонтального примерно в 3,5 раза; на разрезах В и С соотношение масштабов 1:1.

1 – основные и второстепенные отражающие горизонты (III – подошва мела, V – подошва юры), 2 – надвиги, 3 – участки интенсивно дислоцированного пермо-триаса, 4 – скважины /

Fig. 3. Seismic time (A, B) and seismogeological sections through the Karazhanbass anticline.

In section A, the vertical scale is “stretched” relative to the horizontal by about 3.5 times; in sections B and C, the scale ratio is 1:1.

1 – main and secondary reflecting horizons (III – Cretaceous sole, V – Jurassic sole), 2 – thrusts, 3 – sites of intensely dislocated Permo-Triassic, 4 – wells

Южнее Северо-Бузачинской антиклинали расположено поднятие Жалгизтобе (см. рис. 2), прилегающее к фронту надвига. Размеры складки 16x3 км, амплитуда по подошве юры 100 м. Южное ее крыло осложнено встречным надвигом, поверхность которого наклонена на север (рис. 4).

В центре Бузачинского свода находится крупная (40x10 км, амплитуда 800 м) Жаманорпинская антиклиналь (номер 12 на рис. 1). Северное крыло очень короткое, оборвано надвигом с амплитудой по подошве юрских отложений 800 м, южное – более широкое и пологое с углами падения слоев 3-5° (рис. 5).

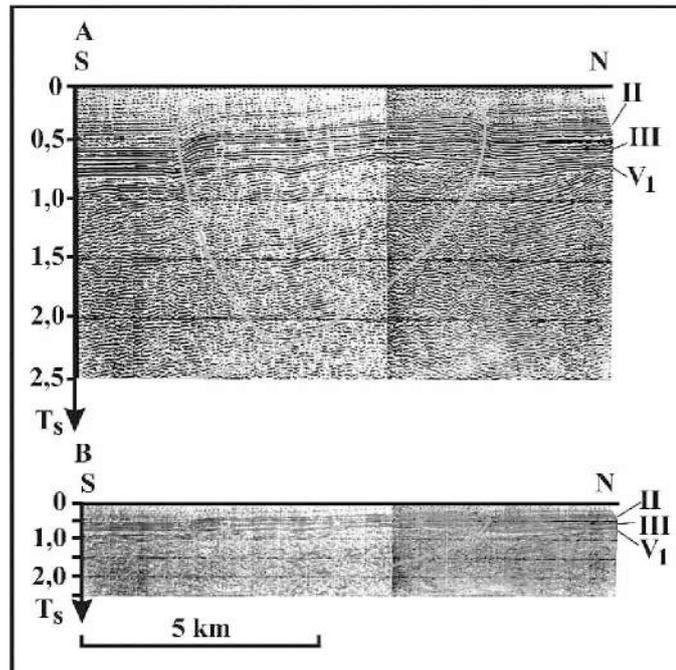


Рис. 4. Жалгизтобинская антиклиналь /

Fig. 4. Zhalgiztobinsk anticline

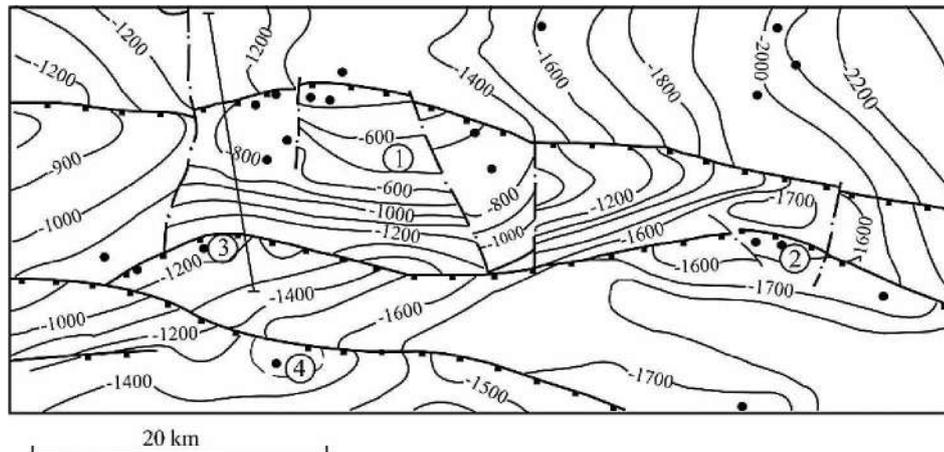


Рис. 5. Жаманорпинская антиклиналь.

Структурная карта по подошве юрских отложений.

В кружках – антиклинали: 1 – Жаманорпинская, 2 – Акорпинская,

3 – Северо-Бесобинская, 4 – Бесобинская. Условные обозначения см. на рис. 2 /

Fig. 5. Zhamanorpin anticline. Structural map of the bottom of the Jurassic sediments.

There are anticlines in the circles: 1 – Zhamanorpinskaya, 2 – Akorpinskaya, 3 – Severo-Besobinskaya, 4 – Besobinskaya. See the symbols in Fig. 2

Преднеокомским размытием юрские отложения в своде поднятия практически были уничтожены, но к северу от надвига они скачкообразно появляются в разрезе в значительной мощности (рис. 6). Сокращена в своде и мощность меловых отложений, залегающих под рыхлыми четвертичными супесями и суглинками. В ядре складки выходят породы альбского возраста, обрамленные по периферии отложениями сеномана и сенон-турона.

Угол наклона фронтального надвига в платформенных отложениях составляет 75-80°, в то время как в доюрской части разреза происходит его резкое выполаживание с переходом в субгоризонтальный срыв. Поверхность надвига перебурена скважиной № 12: под 700-метровой толщей пестроцветных алевролитов и аргиллитов нижнего–среднего триаса располагаются сероцветы среднего–верхнего триаса мощностью 940 м. Ниже них вновь появляются пестроцветные отложения, аналогичные вскрытым в верхней части разреза. Отложения триаса дислоцированы. Углы падения слоев, замеренные в керне, изменяются от 5° до вертикальных, максимальные значения приходятся на среднюю толщу.

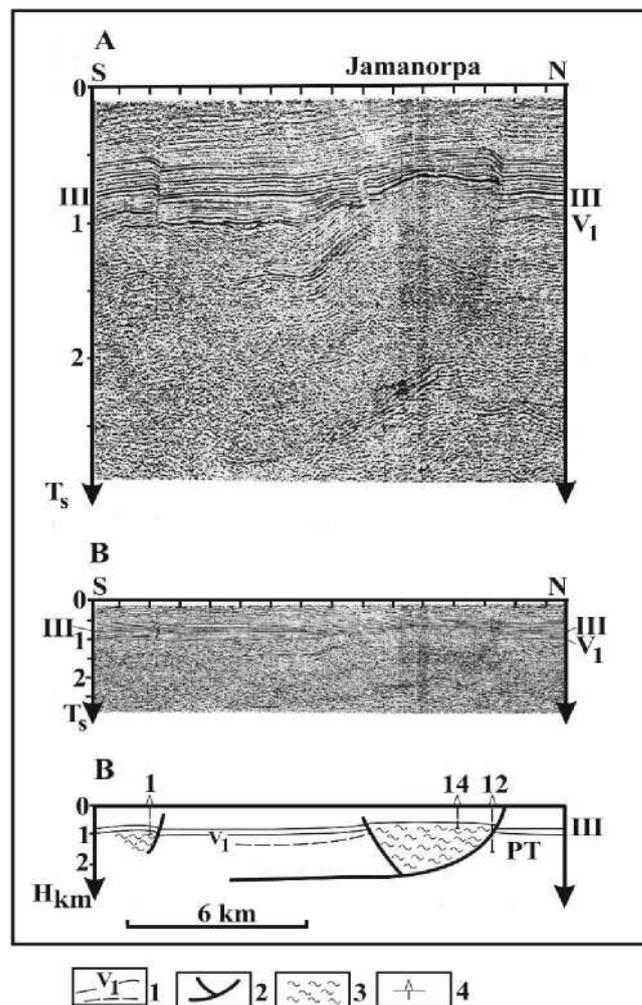


Рис. 6. Сейсмический временной (А, В) и сейсмогеологический разрезы через Жаманорпинскую антиклиналь.

Условные обозначения см. на рис. 3, местоположение разреза – на рис. 5 /

Fig. 6. Seismic time (A, B) and seismogeological sections through the Zhamanorpin anticline.

See the legend in Fig. 3, the location of the section – in Fig. 5

Следствием высокой дислоцированности пермо-триаса во фронтальной части тектонической пластины является отсутствие на этом участке даже непротяженных отражающих горизонтов на сейсмических разрезах.

На южное пологое крыло Жаманорпинской антиклинали взброшена северная часть Северо-Бесобинской складки.

В северной части Бузачинского свода располагается Каламкасская антиклинальная зона. Наиболее крупной (33x6 км, амплитуда 250 м) здесь является одноименная складка (номер 2 на рис. 1). Как и у всех предыдущих структур, более пологим является южное крыло, а северное оборвано надвигом, но верхний стратиграфический диапазон проникновения его ограничивается юрскими отложениями (см. северную часть рис. 8). Структура разбита сдвигами северо-восточной ориентировки.

В состав Каламкасской антиклинальной линии входят также поднятия Арман, Каратурун-море и Суюкты. В отличие от других антиклинальных зон Бузачинского свода данная структурная линия обращена выгнутой частью не к северу, а к югу, как бы очерчивая южный борт Прикаспийской синеклизы.

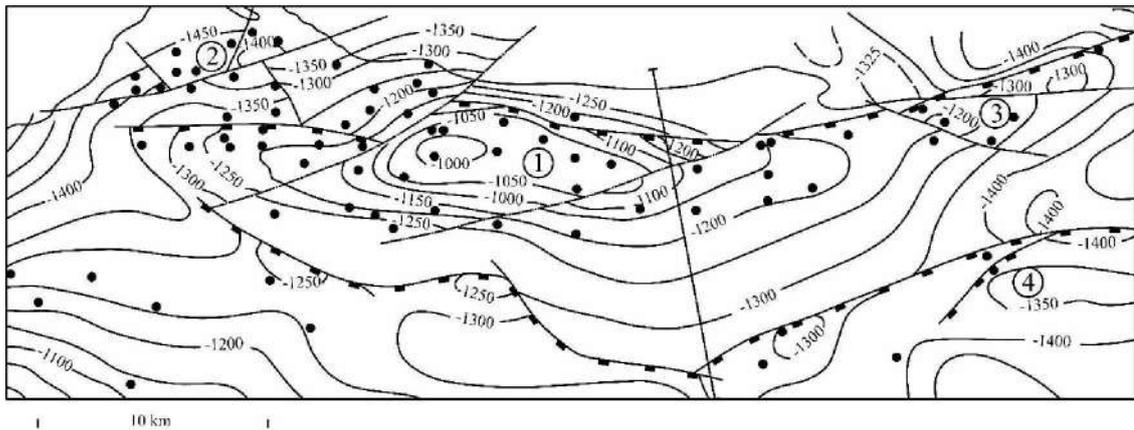


Рис. 7. Каламкасская антиклинальная зона. Структурная карта по подошве юрских отложений. Условные обозначения см. на рис. 2 /

Fig. 7. Kalamkassk anticline zone. Structural map of the bottom of the Jurassic sediments. See the symbols in Fig. 2

Как показал анализ материалов высокоточной аэромагнитной съемки, граница Северо-Устюртского докембрийского массива и Прикаспийской впадины на данном участке проходит непосредственно под Каламкасской антиклинальной зоной. Приведенные выше сведения указывают на надвиговый характер границы этих крупных тектонических элементов, как и в зоне сочленения с кряжем Карпинского.

Близкое строение имеют дислокации и Южно-Бузачинского прогиба. Важно отметить, что в его пределах имеются и другого рода доказательства горизонтальных перемещений, в частности тектонического сближения разнофациальных отложений триаса. Так, например, в скважине Западный Торлун-1 в интервале глубин 1448-2046 м вскрыт морской сероцветный карбонатно-терригенный комплекс среднего триаса центрально-мангышлакского типа, надвинутый на одновозрастные континентальные и прибрежно-морские пестроцветные образования, характерные для разрезов Бузачинского свода. Кроме того, в интервале 2043-2046 м обнаружен пласт тектонической брекчии, состоящий из щебневидных, реже округло-угловатых обломков глинистых пород как сероцветной толщи (отложения аллохтона), так и подстилающих пестроцветов.

Обсуждение результатов

Изучение платформенных антиклиналей п-ова Бузачи позволило установить ряд закономерностей не только в их морфологии, но и площадном размещении.

Антиклинальные поднятия линейной или брахиантиклинальной формы. Северные их крылья короткие, более крутые, чем южные, оборваны высокоамплитудными надвигами. В плане они образуют протяженные складчато-надвиговые системы дислокаций.

Надвиги в платформенном чехле имеют углы наклона 45-80°. С глубиной происходит быстрое выполаживание их сместителей с переходом в субгоризонтальное положение. То есть они имеют листрическую форму, образуя серию тектонических чешуи. Во фронтальной их части отложения пермо-триаса интенсивно дислоцированы, а в перекрывающем комплексе чехла им отвечают асимметричные антиклинали.

В результате была образована эшелонированная система складчато-надвиговых дислокаций субширотной ориентировки, гребень каждой из которых погружается в южном направлении в сторону Южно-Бузачинского прогиба. При этом фронтальная часть каждой из более южных линий является взброшенной по отношению соседней северной с вертикальной амплитудой смещения до 300 м (рис. 8).

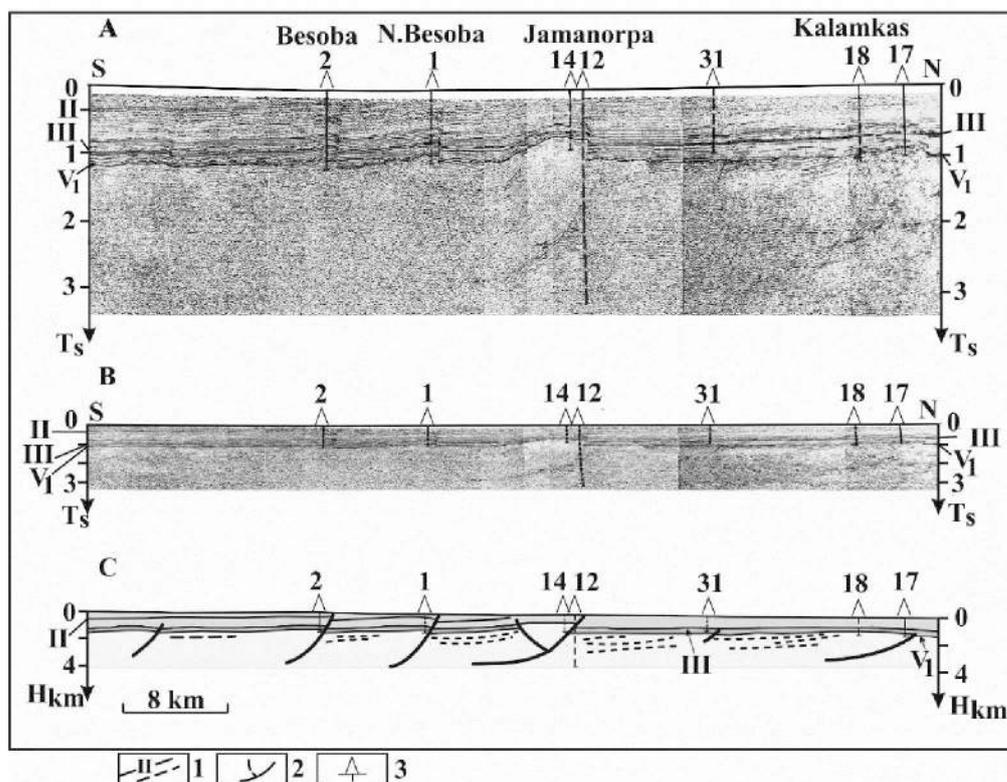


Рис. 8. Сейсмический временной (A, B) и сейсмогеологический разрезы, иллюстрирующие принадлежность природы бузачинских антиклиналей.

Условные обозначения см. на рис.3 /

Fig. 8. Seismic time (A, B) and seismogeological sections illustrating the thrust nature of Buzachinsky anticlines. See the symbols in Fig.3

Особенности строения и закономерности площадного распространения складчато-надвиговых дислокаций со всей очевидностью указывают на их формирование в обстановке латерального сжатия. Время образования дислокаций связано с концом триасового периода – моментом формирования Центрально-Мангышлакской раннекиммерийской складчатой зоны [Рорков, 1991], северная граница кото-

рой трассируется по линии Каражанбас – Жаманорпа – Кызан. Основная разрядка тангенциальных напряжений приурочена к фронтальным участкам образовавшихся тектонических пластин, где происходила трансформация горизонтальных смещений в вертикальные, приведшая к интенсивным деформациям отложений пермотриаса и образованию листрических надвигов.

С внешней стороны указанной структурной линии проявление сил бокового сжатия заметно ослабевает, но и здесь можно видеть отражение латерального стресса в структуре осадочного чехла. Примером может служить Каламкасская антиклинальная зона, расположенная к северу в 40 км. Горизонтальные подвижки периодически возобновлялись и на платформенном этапе, но в меньшем масштабе, что привело к развитию в чехле платформы описанных выше дислокаций.

Ряд из рассмотренных структур содержит крупные скопления углеводородов, в том числе высоковязкой нефти, локализованные в юрско-меловых отложениях. И, несмотря на крайне неблагоприятные условия для их сохранности (малые глубины залегания, отсутствие надежных покровов, выход разрывов на дневную поверхность), полного разрушения залежей не произошло. Это говорит о том, что надвиги являются слабыми проводниками флюидов, играя в основном роль экранов. Подтверждается это и особенностями строения Каражанбасского и Северо-Бузачинского месторождений, где многие залежи являются тектонически экранированными.

Выводы

Закономерная приуроченность платформенных антиклиналей п-ова Бузачи к фронтальным частям надвигов, зависимость морфологии складок от направления падения поверхностей разрывов, обуславливающего асимметричность их крыльев, совпадение времени активного роста поднятий и надвигов свидетельствуют об их генетической взаимосвязи и формировании в обстановке тангенциального сжатия. При этом на первом этапе происходит тектоническое расслоение осадочного чехла с образованием пологих срывов и литопластин. Трансформация горизонтальных перемещений пород в вертикальные в лобовых частях литопластин ведет к образованию листрических разломов – крутых в верхней части разреза и пологих на глубине. Возникающие при этом складчатые дислокации являются отражением последующего качественного изменения формы залегания слоистых толщ. В условиях возрастающего бокового сжатия могут формироваться мощные зоны принадвигового смятия. Таким образом, надвиги являются первичными, а складки – вторичными структурными формами.

Аналогичные внутриплитные структуры горизонтального сжатия известны и в других районах запада Туранской плиты [Попков В.И., Попков И.В., 2003], что указывает на региональную природу тектонических сил, ответственных за их образование, и подчеркивает решающее значение тангенциальных напряжений в дислокационном процессе на молодой платформе.

Рассмотренные в статье дислокации бокового сжатия находятся на значительном удалении от мобильных поясов. За пределами данной работы остается вопрос об источнике тангенциальных напряжений, требующий самостоятельного рассмотрения. Тем не менее, приведенные материалы могут способствовать более глубокому пониманию механизма дислокационного процесса в пределах платформенных территорий, включая их внутренние районы, а также решению некоторых нефтегеологических задач.

Литература

1. Гиоргобиани Т.В. Условия формирования альпийской складчатой системы Большого Кавказа и характерные особенности ее структуры. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 1. – С. 43–57. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26787.
2. Гиоргобиани Т.В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 1. – С. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063.
3. Казанцева Т.Т. К нефтегазонакоплению в геодинамическом аспекте. // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. № 5. – С. 6–17. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-5-6-17.
4. Казанцева Т.Т. К стадийности развития земной коры в свете современных знаний. // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21. № 4. – С. 6–18. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-4-6-18.
5. Казанцева Т.Т. Основы геологических процессов в шарьяжно-надвиговой теории формирования земной коры. // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академия наук Республики Башкортостан. – 2021. – № 28. – С. 21–29.
6. Камалетдинов М.А., Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Происхождение складчатости. – М.: Наука, 1981. – 135 с.
7. Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Черкашин В.И. О месте пород тоханской серии в структурной зоне Передового хребта Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 6–16. DOI: 10.46698/VNC.2023.27.18.001.
8. Попков В.И., Попков И.В. Складчато-надвиговые дислокации в триасовых отложениях Скифско-Туранской платформы. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 34–46. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003.
9. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.
10. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporitesfloored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. // Journal of Structural Geology. – 2019. – Vol. 123. – pp. 1–17.
11. Carola E., Muñoz J.A., Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. // Int. J. Earth Sci. (Geol.Rundsch.). – 2015. – pp. 56–73. DOI: 10.1007/s00531-015-1177.
12. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. // Tectonics. – 2020. – Vol. 39. – pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903.
13. Li S., Wang X., Suppe J. Compressional salt tectonics and syn-kinematic strata of the western Kuqaforeland basin, Southern Tian Shan, China. // Basin Research. – 2012. – No.24. – pp. 475–497. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00531.
14. Popkov V.I. Intraplate structures of lateral compression. // Geotektoniks. – 1991. – No.2. – pp. 13–27.
15. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. // Hydrocarbons in contractual belts. Geological Society. – London. – 2010. – Vol. 348. – pp. 7–31. DOI: 10.1144/sp348.2.
16. Sobornov K.O. Lateral variations in structural styles of tectonic wedging in the Northeastern Caucasus, Russia. // Bulletin of Canadian Petroleum Geology. – 1996. – Vol. 44(2). – Pp. 385–399.
17. Sobornov K.O. Structure and development of wedged thrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. – 2020. – Search and Discovery Article #30654.
18. Yu Y., Tang L., Yang W., Huang T., Qiu N., Li W. Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. // AAPG Bulletin. – 2014. – Vol. 98. No.1. – pp. 135–159.

19. Xu S. A major gas field in the Tarim Basin of west China. // *Petroleum Geoscience*. – Vol. 10. – 2004. – pp. 95–106. DOI: 10.1144/1354-079303-571.

References

1. Giorgobiani T.V. Conditions of formation of the Alpine folded system of the Greater Caucasus and characteristic features of its structure. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 43–57. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26787. (In Russ.)
2. Giorgobiani T.V. Stages, mechanisms and geodynamics of the formation of the folded system of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063. (In Russ.)
3. Kazantseva T.T. To oil and gas accumulation in geodynamic aspect. *Oil and gas business*. 2022. Vol. 20. No. 5. Pp. 6–17. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-5-6-17. (In Russ.)
4. Kazantseva T.T. On the stages of development of the Earth's crust in the light of modern knowledge. *Oil and gas business*. 2023. Vol. 21. No. 4. pp. 6–18. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-4-6-18. (In Russ.)
5. Kazantseva T.T. Fundamentals of geological processes in the thrust-thrust theory of the formation of the Earth's crust. *Geology. Proceedings of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2021. No. 28. pp. 21–29. (In Russ.)
6. Kamaletdinov M.A., Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T. The origin of folding. Moscow. Nauka. 1981. 135 p. (In Russ.)
7. Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. About the place of rocks of the Tokhansky series in the structural zone of the Forward ridge of the North Caucasus. *Geology and geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 6–16. DOI: 10.46698/VNC.2023.27.18.001. (In Russ.)
8. Popkov V.I., Popkov I.V. Folding-thrust dislocations in Triassic deposits of the Scythian-Turanian platform. *Geology and geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 34–46. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.57.003. (In Russ.)
9. Chotchaev H.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high-altitude territories by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (In Russ.)
10. Borderie S., Vendeville B.C., Graveleau F., Witt C., Dubois P., Baby P., Calderon Y. Analogue modeling of large-transport thrust faults in evaporites-floored basins: Example of the Chazuta Thrust in the Huallaga Basin, Peru. *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 123. pp. 1–17.
11. Carola E., Muñoz J.A., Roca E. The transition from thick-skinned to thin-skinned tectonics in the Basque-Cantabrian Pyrenees: the Burgalesa Platform and surroundings. // *Int. J. Earth Sci. (Geol.Rundsch.)*. 2015. pp. 56–73. DOI: 10.1007/s00531-015-1177.
12. Jourdon A., Mouthereau F., Le Pourhiet L., Callot J.-P. Topographic and tectonic evolution of mountain belts controlled by salt thickness and rift architecture. *Tectonics*. 2020. Vol. 39. pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903.
13. Li S., Wang X., Suppe J. Compressional salt tectonics and syn-kinematic strata of the western Kuqaforeland basin, Southern Tian Shan, China. *Basin Research*. 2012. No.24. pp. 475–497. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00531.
14. Popkov V.I. Intraplate structures of lateral compression. *Geotektoniks*. 1991. No.2. pp. 13–27.
15. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. // *Hydrocarbons in contractual belts*. Geological Society. London. 2010. Vol. 348. pp. 7–31. DOI:10.1144/sp348.2
16. Sobornov K.O. Lateral variations in structural styles of tectonic wedging in the North-eastern Caucasus, Russia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. 1996. Vol. 44. No. 2. pp. 385–399.

17. Sobornov K.O. Structure and development of wedgeshapedthrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. 2020. Search and Discovery Article #30654.
18. Yu Y., Tang L., Yang W., Huang T., Qiu N., Li W. Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. AAPG Bulletin. 2014. Vol. 98. No.1. pp. 135–159.
19. Xu S. A major gas field in the Tarim Basin of west China. Petroleum Geoscience. Vol. 10. 2004. pp. 95–106. DOI: 10.1144 /1354-079303-571.

УДК 537.867:550.34

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

Оригинальная статья

Усиление и генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы

И.И. Босиков¹, Р.В. Ключев², В.Ч. Ревазов¹

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
Россия, 362021, PCO-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44,
e-mail:igor.boss.777@mail.ru;

²Московский политехнический университет, Россия, 107203, г. Москва,
ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Статья поступила: 25.10.2023, доработана: 02.12.2023, принята к публикации: 13.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В статье рассматривается возможный механизм усиления и генерации электромагнитного излучения при подготовке землетрясения, во время и после него (афтершоки). Как установлено ранее при прохождении через ионный кристалл диэлектрика ультразвука достаточной интенсивности в кристалле генерируется электромагнитное излучение на частоте ультразвука и вдвое меньшей частоте. Результаты получены на магматических горных породах (базальты, габбро, граниты). **Цель исследований.** Исследование и анализ механизма усиления и генерации электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы. **Методика исследований.** При проведении исследований применялись методы геофизики и инженерной геологии, математическое моделирование, теория струн, методы кристаллографии и минералогии. **Результаты исследований.** В результате проведенных исследований определено, что при импульсном акустическом возбуждении амплитудные параметры электромагнитной совместимости существенно зависят от проводимости горной породы. **Заключение.** Случайные соединения «конденсаторов» с учетом их колебаний в поле сейсмических волн могут приводить к возрастанию суммарного потенциала (средний потенциал-мультипликаторы), а во-вторых, в поле ударной волны T нужно заменить на эффективную температуру, что может на несколько порядков увеличить эффективный заряд и интенсивность ЭМИ. Таким образом, при трещинообразовании и распространении мощных акустических волн в горных породах практически все входящие в эти породы компоненты должны вносить вклады в генерацию ЭМИ.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, очаг землетрясения, генерация, кристалл диэлектрика, ультразвук, релаксация, землетрясение.

Для цитирования: Босиков И.И., Ключев Р.В., Ревазов В.Ч. Усиление и генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 32-41. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

Original paper

Amplification and generation of electromagnetic radiation during the passage of acoustic waves through igneous rocks

I.I. Bosikov¹, R.V. Klyuev², V.Ch. Revazov¹

¹North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation,
e-mail: igor.boss.777@mail.ru;

²Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya Str.,
Moscow 107203, Russian Federation,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

Received: 25.10.2023, revised: 02.12.2023, accepted: 13.12.2023

Abstract. Relevance. The article discusses a possible mechanism of amplification and generation during the preparation of earthquakes, during and after them (aftershocks). As was established earlier, when ultrasound of sufficient intensity passes through an ionic dielectric crystal, electromagnetic radiation is generated in the crystal at the ultrasound frequency and half the frequency. The results were obtained on igneous rocks (basalts, gabbros, granites). **Aim.** Research and analysis of the mechanism of amplification and generation of electromagnetic radiation during the passage of acoustic waves through igneous rocks. **Research methodology.** When conducting research, methods of geophysics and engineering geology, mathematical modeling, string theory, crystallography and mineralogy were used. **Research results.** As a result of the research, it was determined that during pulsed acoustic excitation, the amplitude parameters of electromagnetic compatibility significantly depend on the conductivity of the rock. **Conclusion.** Firstly, that random connections of “capacitors”, taking into account their oscillations in the field of seismic waves, can lead to an increase in the total potential (average potential multipliers), and secondly, in the field of a shock wave, T must be replaced by the effective temperature, which can increase the effective charge and intensity of EMR by several orders of magnitude. Thus, during the formation of cracks and the propagation of powerful acoustic waves in rocks, almost all components included in these rocks must contribute to the generation of EMR.

Keywords: electromagnetic radiation, earthquake source, generation, dielectric crystal, ultrasound, relaxation, earthquake.

For citation: Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch. Amplification and generation of electromagnetic radiation during the passage of acoustic waves through igneous rocks. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 32-41. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

Введение

Авторами рассматривается возможный механизм усиления и генерации электромагнитного излучения при подготовке землетрясения, во время и после него (афтершоки). Как установлено ранее при прохождении через ионный кристалл диэлектрика ультразвука (УЗ) достаточной интенсивности в кристалле генерируется электромагнитное излучение на частоте ультразвука и вдвое меньшей частоте. Результаты получены на магматических горных породах (базальты, габбро, граниты).

Цель исследований. Исследование и анализ механизма усиления и генерации электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы. **Методика исследований.** При проведении исследований применялись методы геофизики и инженерной геологии, математическое моделирование, теория струн, методы кристаллографии и минералогии.

Техническая часть

В последние годы все большее внимание уделяется исследованиям электромагнитного излучения (ЭМИ), связанного с очагами землетрясения [Frid et al., 2020; Чотчаев и др., 2021]. Развита модель возникновения ЭМИ из очага землетрясения и сопутствующих ему атмосферных явлений [Baroň et al., 2020; Голик и др., 2020]. Ведутся поиски физических механизмов генерации ЭМИ в очаге землетрясения [Wei et al., 2022; Босиков и др., 2023a].

1. Под воздействием упругих колебательных напряжений дислокации начинают колебаться, что микроскопически заключается в захвате и испускании вакансий [Frid et al., 2020; Wei et al., 2022].

Поэтому с ростом частоты УЗ должен уменьшаться эффективный заряд и возрастать коэффициент трения дислокации, и по этой причине исследования проводятся на низкой (20 кГц) частоте УЗ.

Из-за явлений релаксации интенсивность ЭМИ должна падать со временем, а порог генерации – расти, так как со временем растет число точек закрепления. При этом увеличение амплитуды УЗ или изменение нагрузки на образец может привести к отрыву дислокаций от закреплений и тем самым – к нелинейной зависимости интенсивности ЭМИ от интенсивности УЗ.

Известно явление возникновения зарядов на берегах вдоль образующихся микротрещин [Yang et al., 2020; Босиков и др., 2022]. Установлено, что существует строгая корреляция между акустической эмиссией, всплесками на кривых проводимости и электрического потенциала и ЭМИ.

2. Генерация ЭМИ при прохождении УЗ волны по диэлектрику может вызываться следующими причинами.

I. Эффекты, связанные с типом решетки (пьезоэффект, электрострикция) [Willatzen et al., 2008].

В [Demyanyshyn et al., 2021] они были исключены проведением измерений на кристаллах с существенно различными пьезохарактеристиками и наблюдаемыми временными зависимостями интенсивности ЭМИ от амплитуды УЗ.

II. Эффекты, связанные с электронной подсистемой (акусто-ЭДС), исключались использованием веществ с различной проводимостью.

III. Эффекты, связанные с дефектами решетки. Здесь необходимо различать процессы образования дефектов (их вклад в высокочастотное ЭМИ частично рассмотрен в [Paul et al., 2023]) и процессы параметрической генерации ЭМИ этими дефектами в акустическом поле, которым посвящена настоящая работа.

Рассмотрим возможные типы дефектов:

а) двумерные дефекты-трещины, на берегах которых возникают флуктуацион-

ные заряды [Eguchi, Nakashim, 2023], и поверхности образца, к которым могут диффундировать внутренние дефекты;

б) линейные дефекты – дислокации, которые в момент своего образования (или в интенсивном УЗ поле, отрывающем их от закрепляющих дефектов) могут рассматриваться как заряженные нити;

в) точечные дефекты – вакансии, междоузельные ионы, ролью которых можно в нашем случае пренебречь, поскольку сечения упругого рассеяния фононов на них и на дислокациях пропорциональны соответственно ω^2 и w или $1/\omega$ [Li et al., 2023].

Таким образом, генерация ЭМИ с достаточно низкой частотой, пропорциональной частоте УЗ, может вызываться только эффектами, связанными с трещинами и дислокациями.

3. Трещину с флуктуационным зарядом на берегах можно рассматривать как плоский конденсатор с зависящей от времени электростатической энергией:

$$W(t) = q^2/2C = W(0)\exp(-2\alpha t)(1 + \xi \sin \omega t), \quad (1)$$

где $W(0) = 2ng^2qd_0/\epsilon S$;

q_0 – первоначальный заряд трещины, который много меньше пробойного;

ϵ_0 – среднее раскрытие трещины;

S – площадь берегов;

ϵ – диэлектрическая проницаемость газа внутри трещины;

α – скорость релаксации заряда;

ξ – относительная амплитуда сжатия трещины;

$$\xi = (1/(d_0\rho\omega^2)) \text{grad } \sigma(r), \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества кристалла;

$\sigma(r)$ – нормальная к берегам трещины компонента давления УЗ.

Отметим, что разложение (1) справедливо лишь в случае монохроматического УЗ потока частоты ω и для трещин, все размеры которых много меньше длины волны УЗ [Malyukova et al., 2023; Рыбак и др., 2021].

При раздвижении берегов трещины $W(t)$ растет за счет работы сторонних сил, при сближении берегов $W(t)$ уменьшается и основная часть выделяющейся при этом энергии должна перейти в ЭМИ (пренебрегаем вторичной акустической волной). Если принять, что в кристалле в объеме, много меньшем $\beta_{зв}$ ($\beta_{зв}$ – длина волны УЗ), возникает N параллельных трещин, заряженных хаотически, то в соответствии с распределением Пуассона напряженность поля трещин порядка $E_1 N^{1/2}$, где E_1 – напряженность поля единичной трещины [Голик и др., 2021; Босиков и др., 2023b]. Поэтому усредненная интенсивность излучения такого участка кристалла определяется положительными значениями выражения:

$$I(t) = -NdW/dt = NW(0)\exp(-2\alpha t) (2\alpha - \cos \omega t). \quad (3)$$

Зависимость $\epsilon(\omega)$ от амплитуды УЗ будет оценена ниже. Если $2a \leq \omega\zeta$, то излучение будет наблюдаться в течение полупериода УЗ, т.е. будет происходить как бы с частотой $\omega/2$ (здесь не рассматриваются процессы генерации ЭМИ на более высоких частотах, связанных с ускорениями зарядов) (рис. 1).

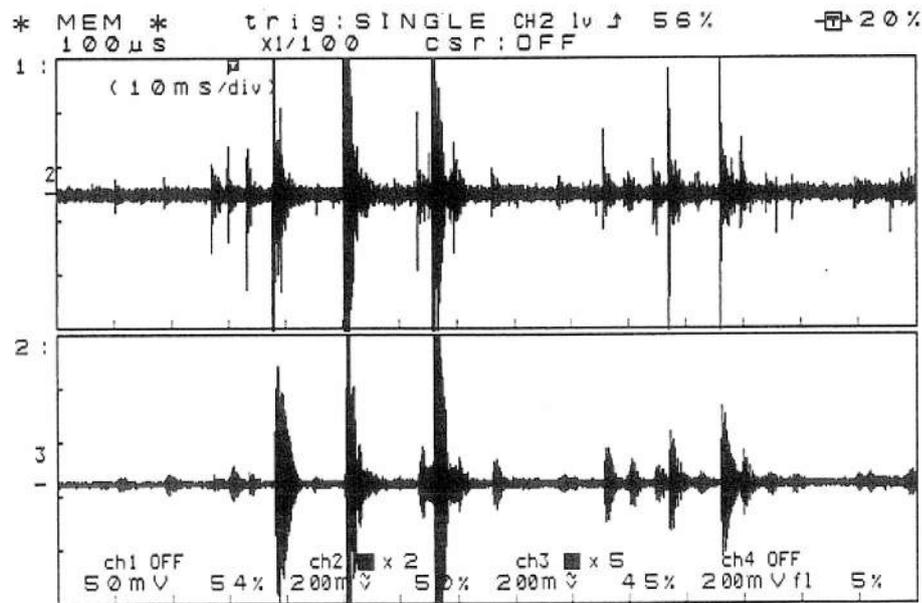


Рис. 1 Записи демонстрирующие связь электромагнитных (вверху) и акустических (внизу) явлений при разрушении образца гранита [Hadjicontis et al., 2004] /

Fig. 1 Records demonstrating the connection between electromagnetic (upper) and acoustic (lower) phenomena during the destruction of a granite sample [Hadjicontis et al., 2004]

4. Перейдем к рассмотрению ЭМИ, генерируемого колеблющимися дислокациями.

Рассмотрим прямую закрепленную лишь на концах дислокацию длины L , расположенную вдоль оси y с плотностью заряда:

$$\rho(r, t) = (q/L) \delta(x) \delta(z) \theta(L^2/4 - y^2), \quad (4)$$

где $\theta(y)$ – ступенчатая функция Хевисайда;

$\delta(x)$ – функция Дирака.

Под действием ЭМИ дислокация может совершать колебания (предположим, что они гармонические) в плоскости x_0y :

$$x(y, t) = A \cos(\pi y/L) \sin \omega t. \quad (5)$$

Пренебрегаем более медленными процессами передвижения дислокаций в целом. Помимо того, под влиянием волн сжатия и разряжения могут меняться линейные размеры дислокации:

$$L(t) = L_0 (1 + B \sin \omega t). \quad (6)$$

Наряду с этим изменяется и диэлектрическая проницаемость окружающей среды:

$$\varepsilon(\omega, t) = \varepsilon_0(\omega) (1 + \bar{C} \sin \omega t). \quad (7)$$

Для оценки вкладов этих процессов в генерацию ЭМИ сравним коэффициенты A/L , B и \bar{C} .

Из струнной модели дислокаций [Paul et al., 2023] можно заключить, что если частота УЗ много ниже резонансной: $\omega^2 \ll \omega_0^2 = 2\pi G / (1 - \nu) \rho L$, где G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, т.е. если $\omega / 2\pi \ll 1$ МГц, то:

$$A = \frac{2\sigma_0(1-\nu)L^2}{\pi^2Gb} = \frac{4\sigma_0}{\rho\omega_0^2b} \quad (8)$$

где b – вектор Бюргерса.

При этом увеличение коэффициента конверсии энергии УЗ в ЭМИ достигается при приближении частоты УЗ к ω_0 .

Коэффициент $B = \sigma/E$,

где E – модуль сжатия.

Для \bar{C} получаем с учетом формулы Лорентц–Лоренца и закона Гука выражение:

$$\bar{C} = \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial \rho} \Delta \rho = \frac{(\varepsilon_0 - 1)(\varepsilon_0 + 2)\sigma}{3 \varepsilon_0 E} \quad (9)$$

Из сравнения этих коэффициентов видно, что $A/L > B$ и $B \sim \bar{C}$. Таким образом, за генерацию ЭМИ ответственны в основном колебания дислокации в плоскости скольжения, связанные с B и \bar{C} . Процессы генерации приводят к появлению ЭМИ лишь в течение полупериода УЗ и поэтому могут несколько исказить гармонические колебания, связанные с (5).

С учетом (5) можно переписать (4) как:

$$\rho(r, t) = \frac{q}{L} \delta \left[x - A \cos \frac{\pi y}{L} \sin \omega t \right] \delta(z) \theta \left(\frac{L^2}{4 - y^2} \right) \quad (10)$$

Пренебрегаем возможной неоднородностью заряда на растянутой дислокации, отсюда для дипольного момента:

$$p(t) = \int r \rho(r, t) dV \quad (11)$$

Получаем:

$$p_x = \frac{2qA}{\pi} \sin \omega t, \quad p_y = \text{const}, \quad p_z = 0$$

Интенсивность ЭМИ в дальней зоне, согласно (11), равна:

$$I = \frac{2}{3c^3} |\ddot{p}|^2 = \left[\frac{32N_1^2\sigma^2(1-\nu)^2L^4\omega^4}{3\pi^6c^3G^2b^2} \right] \sin^2 \omega t \quad (12)$$

где N_1 – количество параллельных дислокаций в облучаемом малом объеме.

Формулу (12) можно проверить сравнением интенсивности ЭМИ в различных кристаллах.

Результаты исследований

Импульс образования трещин в магматической горной породе (диабаз, гранит) представлен на рис. 2.

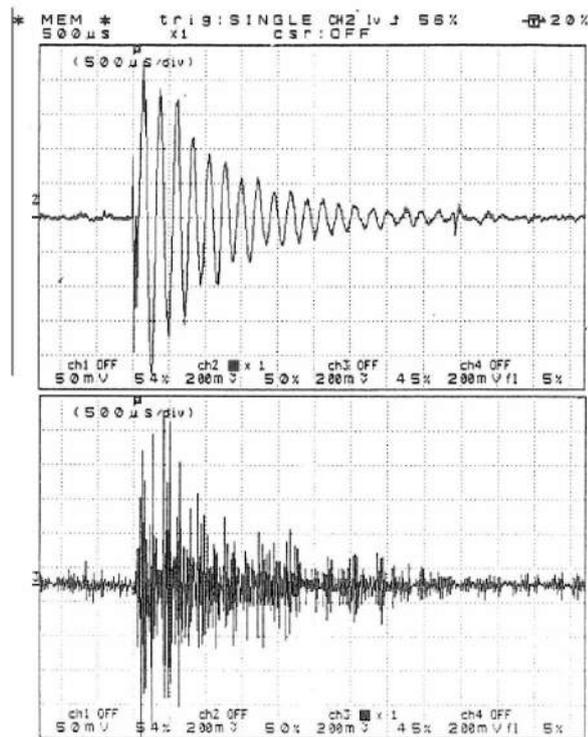


Рис. 2. Импульс образования трещин в магматической горной породе (гранит): электромагнитная эмиссия (вверху) и акустическая эмиссия (внизу) [Hadjicontis et al., 2004] /

Fig. 2. The impulse of crack formation in igneous rock (granite): electromagnetic emission (upper) and acoustic emission (lower) [Hadjicontis et al., 2004]

Необходимо особо подчеркнуть одно следствие (12). Если ввести общую длину дислокаций в исследуемом объеме $A = N_l L$, то, согласно (12), $I \sim A^4/N_l^2$. Со временем, прошедшим после образования дислокаций, растет среднее число точек закрепления каждой отдельной дислокации. Если принять, что в отсутствие УЗ число закреплений растет как $N_l \sim t$, то средняя интенсивность ЭМИ при не слишком большой интенсивности УЗ и при постоянном числе дислокаций должна убывать как $I \sim t^{-2}$, где t – время, прошедшее после возникновения дислокаций, во всяком случае, до установления стационарного числа сегментов дислокаций.

Важно отметить, что в условиях эксперимента измерения поля проводились в ближней зоне (граница между ними $\sim a(c/v)^2$, и v – максимальная скорость точек дислокации, где измерялась фактически напряженность электрического поля):

$$E = (1/\epsilon r^3) (3np_x - p), \quad (13)$$

Поскольку магматические горные породы [Баловцев и др., 2023; Brigida, Zinchenko, 2014; Wang, 2023] содержат зерна различных минералов, то для выяснения роли различных механизмов в генерации ЭМИ нужно рассмотреть процессы генерации в проводниках.

Заключение

Дислокационный механизм генерации ЭМИ в металлах описан в [Eguchi, Nakashim, 2023]. «Конденсаторный» механизм излучения также должен наблюдаться в проводниках, так как на них возникают флуктуационные заряды с энергией:

$$\frac{C\bar{q}^2}{2} = \frac{kT}{2} \quad (14)$$

Флуктуационные заряды с энергией растут при раздвижении обкладок [Li et al., 2023] и должны излучаться при их сближении. Сравнение (14) с выражениями (1-3) показывает, что плотность флуктуационных зарядов в зернах металлов, а следовательно, и мощность ЭМИ, может сравниться с плотностью зарядов флуктуационно-разорванных связей в диэлектриках при площадях «обкладок» порядка 1 мкм^2 .

Необходимо отметить, что случайные соединения таких «конденсаторов» с учетом их колебаний в поле сейсмических волн могут приводить к возрастанию суммарного потенциала, а в поле ударной волны T в (14) нужно заменить на эффективную температуру, что может на несколько порядков увеличить эффективный заряд и интенсивность ЭМИ.

Литература

1. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Оценка влияния тяжелых углеводородов на аэрологические риски аварий в угольных шахтах. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 234–245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245.
2. Босиков И.И., Ключев Р.В., Мазко А.И. Оценка устойчивости плоской поверхности кристалла при фазовом превращении в однокомпонентной системе. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 № 4. – С. 114–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.28.26.009.
3. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н., Силаев И.В. Комплексная оценка гидродинамических процессов на карьерах Клинского месторождения с помощью методов управления ими в массивах горных пород. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023а. – Т. 15 –№ 2. – С. 284–297. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297.
4. Босиков И.И., Ключев Р.В., Силаев И.В., Пилюева Д.Э. Оценка параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта с помощью 4D моделирования. // Горные науки и технологии. – 2023b. – №2. – С. 141–149. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97.
5. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. – С. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011.
6. Голик В.И., Гашимова З.А., Лискова М.Ю., Конгар-Сюрюн Ч.Б. К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров. // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 11. – С. 28–33. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33.
7. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых// Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т.13. – №3(49). – С. 405–415. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.
8. 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. – №11 (1) – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007
9. Baroň I., Koktavý P., Trčka T., Rowberry M., Stemberk J., Balek J., Plan L., Melichar R., Diendorfer G., Macků R., Škarvada P. Differentiating between artificial and natural sources of electromagnetic radiation at a seismogenic fault. // Engineering Geology. – 2022. – Vol. 311. – P. 106912. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106912.
10. Brigida V. S., Zinchenko N. N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. // Journal of Mining Science. – 2014. – Vol. 50. No. 1. – pp. 60–64. DOI: 10.1134/S1062739114010098.
11. Demyanyshyn N.M., Suhak Yu., Mytsyk B.G., Buryy O.A., Maksishko Yu.Ya., Sugak D., Fritze H. Anisotropy of piezo-optic and elasto-optic effects in langasite family crystals. // Optical Materials. – 2021. – Vol. 119. – P. 111284. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111284.

12. Eguchi K., Nakashim D. Fluctuation analysis and experimental evaluation of an inductorless battery charge equalization circuit with a CMOS cross-coupled structure. // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9. – pp. 214–223. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.04.289.
13. Frid V., Rabinovitch A., Bahat D. Earthquake forecast based on its nucleation stages and the ensuing electromagnetic radiations. // *Physics Letters A*. – 2020. – Issue 4. – P. 126102. DOI: 0.1016/j.physleta.2019.126102.
14. Hadjicontis V., Mavromatou C., Ninos D. Stress induced polarization currents and electromagnetic emission from rocks and ionic crystals, accompanying their deformation. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2004. – Vol. 4. – pp. 633–639. DOI: 10.5194/nhess-4-633-2004.
15. Li Y., Sun Zh., Liao N., Cao Z., Liu X., Li Y., Ding Y., Qiu X., Ran G. Formation of helical dislocations mediated by interstitials in ion irradiated FeCrAl alloy. // *Journal of Nuclear Materials*. – 2023. – Vol. 579. – P. 154413 DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154413.
16. Malyukova L.S., Martynushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – P. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
17. Paul L. Barclay P.L., Zhang D. Z. A combined ensemble-volume average homogenization method for lattice structures with defects under dynamic and static loading // *Computational Materials Science*. – 2023. – Vol. 228. – P. 112357. DOI: 10.1016/j.commatsci.2023.112357.
18. Wang Y. Partially overlapped grain shape restoration of the granular rock images. // *Computers & Geosciences*. – 2023. – Vol. 178. – P. 105408. DOI: 10.1016/j.cageo.2023.105408.
19. Wei M., Song D., He X., Khan M., Cheng Y. Generation mechanism of fracture-induced electromagnetic radiation and directionality characterization in the near field. // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – Vol. 273. – P. 108684. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108684.
20. Willatzen M., Wang L., Lew Yan Voon L. C. Electrostriction in GaN/AlN heterostructures. // *Superlattices and Microstructures*. – 2008. – Vol. 43. – Issue 5–6. – pp. 436–440. DOI: 10.1016/j.spmi.2007.07.009.
21. Yang K., Wu Y, Huang F. Damage and hotspot formation simulation for impact–shear loaded PBXs using combined microcrack and microvoid model. // *European Journal of Mechanics – A/Solids*. – 2020. – Vol. 80. P. 103924. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103924.

References

1. Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Kulikova E.Yu. Assessment of heavy hydrocarbons influence on aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 234–245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245 (In Russ.)
2. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Masko A. I. Evaluation of the stability of a flat surface of a crystal under a phase transformation in a single-component system. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 114–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.28.26.009. (in Russ.)
3. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Silaev I.V. Comprehensive assessment of hydrodynamic processes in the Klinskoye Quarry with the use of their control methods in rock masses. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 284–297. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297. (In Russ.)
4. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V., Pilieva D.E. Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023. Vol. 8. No. 2. pp. 141–149. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97. (In Russ.)
5. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. No.10 (2). pp. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011. (in Russ.)

6. Golik V.I., Gashimova Z.A., Liskova M.Yu., Kongar-Syuryun Ch.B. To the problem of minimizing the volume of mobile dust in the development of pits. *Industrial safety*. 2021. No. 11. pp. 28–33. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33. (In Russ.)
7. Rybak Y., Khayrutdinov M., Kongar-Syuryun C., Tyulyayeva Y. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021. Vol. 13 No. 3. pp. 405–415. DOI: DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415. (In Russ.)
8. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (In Russ.)
9. Baroň I., Koktavý P., Trčka T., Rowberry M., Stemberk J., Balek J., Plan L., Melichar R., Diendorfer G., Macků R., Škarvada P. Differentiating between artificial and natural sources of electromagnetic radiation at a seismogenic fault. *Engineering Geology*. 2022. Vol. 311. 106912. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106912.
10. Brigida V.S., Zinchenko N.N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. No. 1. pp. 60–64. DOI: 10.1134/S1062739114010098.
11. Demyanyshyn N.M., Suhak Yu., Mytsyk B.G., Buryy O.A., Maksishko Yu.Ya., Sugak D., Fritze H. Anisotropy of piezo-optic and elasto-optic effects in langasite family crystals. *Optical Materials*. 2021. Vol. 119. P. 111284. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111284.
12. Eguchi K., Nakashim D. Fluctuation analysis and experimental evaluation of an inductorless battery charge equalization circuit with a CMOS cross-coupled structure. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. pp. 214–223. DOI: 10.1016/j.egy.2023.04.289.
13. Frid V., Rabinovitch A., Bahat D. Earthquake forecast based on its nucleation stages and the ensuing electromagnetic radiations. *Physics Letters A*. 2020. Issue 4. P. 126102. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.126102.
14. Hadjicontis V., Mavromatou C., Ninos D. Stress induced polarization currents and electromagnetic emission from rocks and ionic crystals, accompanying their deformation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2004. Vol. 4. pp. 633–639. DOI: 10.5194/nhess-4-633-2004.
15. Li Y., Sun Zh., Liao N., Cao Z., Liu X., Li Y., Ding Y., Qiu X., Ran G. Formation of helical dislocations mediated by interstitials in ion irradiated FeCrAl alloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2023. Vol. 579. P. 154413 DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154413.
16. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
17. Paul L. Barclay P.L., Zhang D. Z. A combined ensemble-volume average homogenization method for lattice structures with defects under dynamic and static loading. *Computational Materials Science*. 2023. Vol. 228. P. 112357. DOI: 10.1016/j.commatsci.2023.112357.
18. Wang Y. Partially overlapped grain shape restoration of the granular rock images. *Computers & Geosciences*. 2023. Vol. 178. P. 105408. DOI: 10.1016/j.cageo.2023.105408.
19. Wei M., Song D., He X., Khan M., Cheng Y. Generation mechanism of fracture-induced electromagnetic radiation and directionality characterization in the near field. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 273. P. 108684. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108684.
20. Willatzen M., Wang L., Lew Yan Voon L. C. Electrostriction in GaN/AlN heterostructures. *Superlattices and Microstructures*. 2008. Vol. 43. Issue 5–6. pp. 436–440. DOI: 10.1016/j.spmi.2007.07.009.
21. Yang K., Wu Y, Huang F. Damage and hotspot formation simulation for impact–shear loaded PBXs using combined microcrack and microvoid model. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2020. Vol. 80. P. 103924. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103924.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

Оригинальная статья

Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ($M_w = 7,8$)

Э.Г. Геодакян^{1,3}, Дж.К. Карапетян^{1,3}, В.Б. Заалишвили², Б.В. Саакян¹,
С.М. Оганесян^{1,3}, М.А. Мкртчян¹, Г.А. Мкртчян¹

¹Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. А. Назарова НАН РА,
Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна 5;

²Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а;

³Международный научно-образовательный центр НАН РА,
Республика Армения, 0019, г. Ереван, ул. Маршала Баграмяна 24,
e-mail: geodakyan.e@mail.ru

Статья поступила: 20.10.2023, доработана: 24.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В работе рассматривается сложная структура взаимодействия крупных макро и мезоплит. Под воздействием близмеридиональных тектонических напряжений мобильная Аравийская плита, со средней скоростью 30 мм·год⁻¹, вклинивается в орогенные структуры Малого и Большого Кавказа, раздвигая по флангам Анатолийскую и Черноморскую мезоплиты на запад, а Южно-Каспийскую и Иранскую мезоплиты на восток. **Методы.** На основе анализа пространственного распределения очагов сильнейших землетрясений региона, с $M \geq 6.7$ за период с 1900 г. по настоящее время, показана их приуроченность к основным глубинным разломам. Очаги первых двух сильнейших землетрясений от 06.02.23 с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$ расположены на Восточно-Анатолийском разломе, близ городов Газиантеп и Караманмараш и т.д. **Результаты.** На основе анализа параметров фокальных механизмов землетрясений от 06.02.23, выдвинута версия, что они являются «дуплет»-землетрясениями, которые послужили триггерным механизмом для возникновения землетрясения от 20.02.23 с $M_w = 6.3$. Анализ инструментальных данных Газиантепского (Турция) землетрясения с $M_w = 7.8$ позволил определить параметры и спектральные характеристики очагового излучения. Установлено, что магистральный разрыв представляет сложный нелинейный процесс разрывообразования и включает 4 субочага. Геодинамическая модель землетрясения помогла выявить основные закономерности и характерные особенности разрывообразования очагов и оценить картину сейсмогенеза.

Ключевые слова: тектоника, глубинные разломы, очаг землетрясения, фокальный механизм, дуплет-землетрясения, магистральный разрыв, геодинамическая модель.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА (грант АСН-01/23, 21SCG-1E021).

Для цитирования: Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ($M_w=7,8$). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 42-54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

Original paper

Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ($M_w = 7.8$)

E.G. Geodakyan^{1,3}, Jh.K. Karapetyan^{1,3}, V.B. Zaalishvili², B.V. Sahakyan¹,
S.M. Hovhannisyan^{1,3}, M.A. Mkrtchyan¹, G.A. Mkrtchyan¹

¹Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA,
5a V. Sargsyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia;

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

³International Scientific-Educational Center NAS RA,
24d Baghramyan Str., Erevan 0019, Republic of Armenia,
e-mail: geodakyan.e@mail.ru

Received: 20.10.2023, revised: 24.11.2023, accepted: 04.12.2023

Abstract: Relevance. The complex structure of interaction of major macro and mezoplates is presented in the paper. The mobile Arabian Plate under the influence of near-meridional tectonic stresses, with an average speed of 30 mm·year⁻¹, wedges into the orogenic structures of the Lesser and Greater Caucasus, pushing the Anatolian and Black Sea mezoplates to the west along the flanks, and the South Caspian and Iranian mezoplates to the east. **Methodology.** Based on the analysis of the spatial distribution of focal zones of strongest earthquakes of the region with $M \geq 6.7$ for the period 1900 to present days, their confinement to the main deep faults is shown. The focal zones of first two strongest earthquakes of 06 February 2023 with $M_w = 7.8$ and $M_w = 7.5$ are located on the East Anatolian Fault, near the cities of Gaziantep and Karamanmarash, etc. **Results.** Based on the analysis of parameters of focal mechanisms of the earthquakes 06 February 2023 a version has been put forward that these are “doublet” earthquakes that served as a trigger mechanism for the occurrence of the earthquake of 06 February 2023 with $M_w = 6.3$. The analysis of instrumental data from the Gaziantep (Turkey) earthquake with $M_w = 7.8$ made it possible to determine the parameters and spectral characteristics of the focal zone radiation. It has been determined, that the main rupture is a complex non-linear process of rupture propagation and involves 4 sub focal zones. The geodynamic model of the earthquake helped in identifying the main patterns and characteristic features of the rupture formation of sources and to assess the overall picture of seismogenesis.

Keywords: tectonics, deep faults, earthquake focal zone, focal mechanism, doublet earthquake, main rupture, geodynamic model.

Acknowledgment: This work was funded by the Higher Education and Science Committee of the Republic of Armenia, as part of the research project (No. ACH-01/23, 21SCG-1E021).

For citation: Geodakyan E.G., Karapetyan Jh.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan M.A., Mkrtchyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ($M_w = 7.8$). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 42-54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

Введение

Прогноз сильных землетрясений является одной из важных и пока еще окончательно не решенных проблем современной сейсмологии. Главной причиной труд-

ности решения этой проблемы является неустойчивый характер протекающих в геологической среде земной коры сложных геодинамических процессов. Согласно концепции о литосфере, как о сложной иерархической самоорганизующейся системе, сейсмический процесс дискретно отображает сложные тектонические движения, возникающие в зонах взаимодействия иерархически различных по масштабности структурных элементов в этой системе [Bak et al., 1988; Шебалин, 2020; Bak et al., 1988].

К ряду таких землетрясений относятся разрушительные землетрясения, произошедшие 06 и 20 февраля 2023 г. соответственно с магнитудами $M_w = 7.8$, 7.5 и 6.3 (<https://www.emsc-csem.org>; <https://deprem.afad.gov.tr>) в юго-восточной части крупного Восточно-Анатолийского трансформного разлома в области сочленения Евроазиатской, Африканской и Аравийской литосферных макроплит.

Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г.

С геотектонической позиции очаги первых 2-х землетрясений непосредственно расположены на трансформном Восточно-Анатолийском разломе, имеющем протяженность около 700 км. Очаг третьего землетрясения приурочен к участку сопряжения северной части близмеридионально направленного Левантийского разлома с юго-западной частью Восточно-Анатолийского разлома, близ города Латакия. Исследования тектонического строения региона проводились многими ведущими сейсмотектонистами [McKenzie, 1972; Brinkman, 1976; Габриелян и др., 1981; Караханян, 1995; Berberian, 1995; Габриелянц и др., 2002]. Согласно этим исследованиям, регион подразделяется на крупные Евразийскую, Африканскую, Аравийскую литосферные макроплиты, и Анатолийскую, Черноморскую, Южно-Каспийскую, Иранскую мезоплиты, которые разграничены протяженными трансрегиональными разнотипными разломными системами (рис. 1).

В этой системе крупным трансрегиональным важнейшим является Северо-Анатолийский трансформный разлом, простирающийся по территории Турции с запада на восток, до города Эрзинджана, и разделяющий Анатолийскую и Черноморскую мезоплиты. Общая длина этого разлома составляет 1500 км. Аналогичным разломом является Восточно-Анатолийский разлом протяженностью около 700 км, простирающийся с севера от Левантийского разлома до Битлиса, и разделяющий Аравийскую макроплиту от Анатолийской мезоплиты. Оба вышеупомянутых разлома по своему характеру являются трансформными разломами, по которым в основном происходят чисто сдвиговые подвижки. Эти две системы разломов соединяются и образуют крупнейший дизъюнктивный Битлис-Эрзинджанский сейсмотектонический узел.

Северо-Анатолийский разлом в этом дизъюнктивном узле расчленяется на южную, центральную и северную ветви. Южная ветвь представляет собой клиновидную фронтальную зону коллизии Евразийской и Аравийской литосферных макроплит, которая простирается от Эрзинджана по направлению Битлис-Загрос, где стыкуется с Загросским разломом, отделяющим Аравийскую макроплиту от Иранской мезоплиты, формируя т.н. Курдистанский сейсмотектонический узел.

Центральная ветвь простирается на северо-восток, последовательно трассируя Эрзрум-Саригамиш-Памбак-Севан-Сюникскую разломную систему, отделяющую Южно-Армянский и Закавказский блоки.

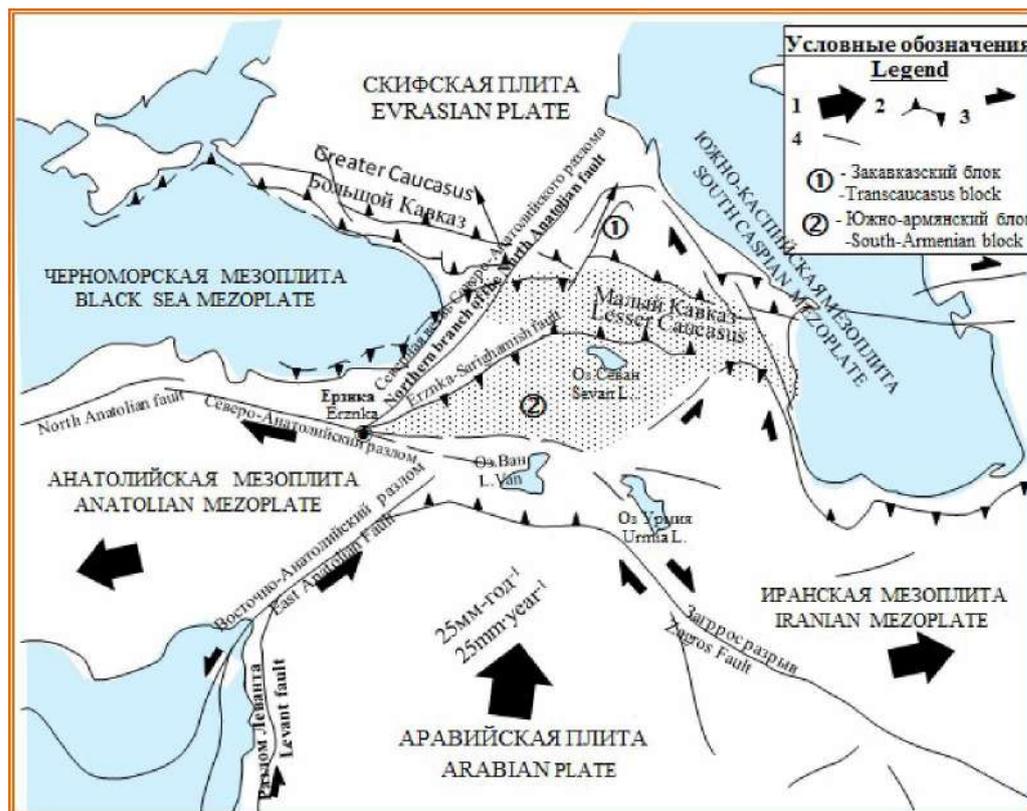


Рис. 1. Основные плитотектонические элементы и трансрегиональные глубинные разломы исследуемой территории /

Fig. 1. Main plate tectonic elements and transregional deep faults of the study area

Северная ветвь представляет собой левостороннюю шовную зону коллизии Евразийской и Аравийской макроплит, отделяющую Черноморскую мезоплиту от Южно-Армянского и Закавказского блоков.

На этой территории динамика взаимодействия крупнейших тектонических элементов литосферы в зонах их коллизии, оценка скоростей их относительных смещений, проводилась путем анализа количественных значений поля скоростей по данным GPS систем приведенных в работе [Reilinger et al., 2006]. Согласно этим исследованиям, Африканская и Аравийская плиты продвигаются к относительно неподвижной Евразийской платформе, со средними скоростями соответственно 5 мм/год и 30 мм/год.

Аравийская мезоплита по двум основным шовным зонам, представляющим собой крупные сейсмогенные линейменты, вклинивается в структуры Малого и Большого Кавказа, отодвигая Восточно-Черноморскую и Анатолийскую мезоплиты к западу, а Южно-Каспийскую и Иранскую мезоплиты к востоку. В центральной части расположены смежные с передовой зоной Аравийской плиты, выпуклые к северо-востоку, Южно-Армянский и Закавказский блоки, за счет близмеридионально направленного сжимающего тектонического напряжения образующие область коллизионной зоны столкновения [Габриелянц и др., 2002]. Нами рассмотрено пространственное распределение сильнейших $M \geq 6.8$ землетрясений исследуемой территории с 1900 г. по настоящее время (рис. 2).

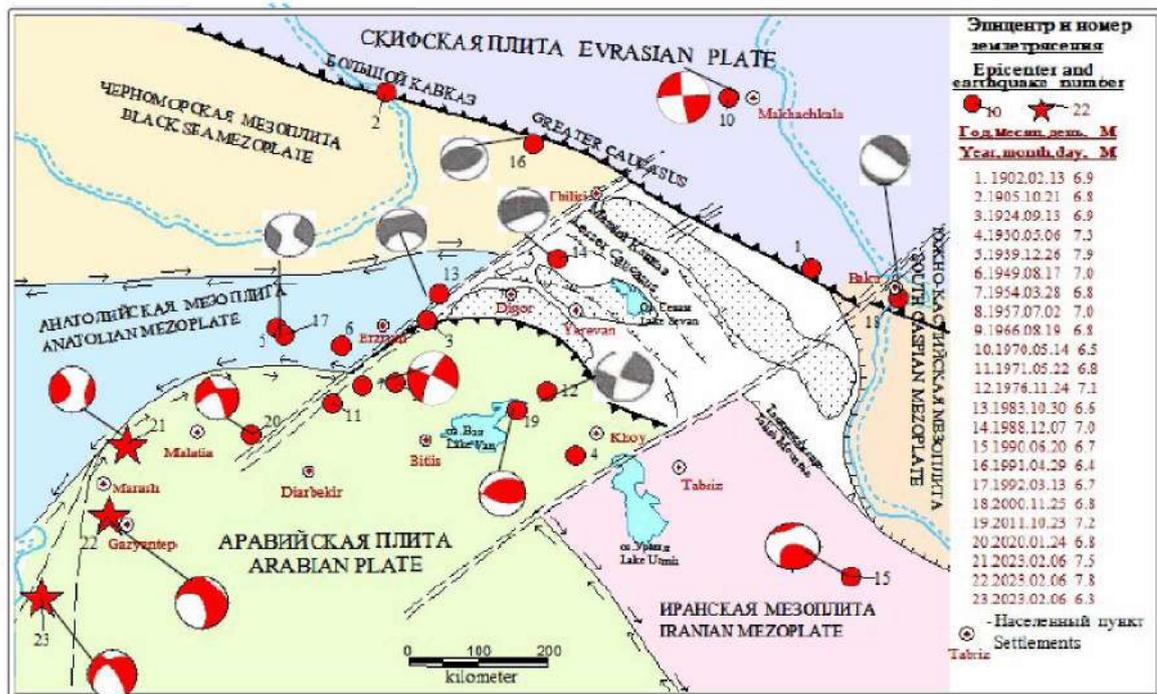


Рис. 2. Эпицентры и фокальные механизмы сильных $M \geq 6.8$ землетрясений исследуемой территории /

Fig. 2. Epicenters and focal mechanisms of strong $M \geq 6.8$ earthquakes in the study area

Как видно из рисунка 2 очаги этих землетрясений, как правило, расположены в краевых зонах взаимодействия вышеуказанных крупных литосферных макроплит.

Следует отметить, что решение фокальных механизмов выделенных очаговых зон произошедших сильных землетрясений, показывает, что из-за разницы между скоростями продвижения этих тектонических элементов в регионе происходят сложные, разнотипные сейсмодетформационные процессы (www.emsc.org; www.globalcmt.org).

В основном, эти процессы протекают вдоль протяженных, региональных разломов, представляющих собой зоны контактов крупных, тектонических элементов. Относительные скорости сейсмодетформационных процессов в этих зонах достигают величин $12,5 \cdot 10^{-7} \leq \dot{\epsilon} \leq 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$ [McKenzie, 1972; Reilinger et al., 2006].

Землетрясения, происходящие в Загросской системе разломов, геометрически охватывают относительно большие пространственные размеры, образуя широкую полосу сейсмогенной области. Такая зональность обусловлена тем, что протекающие здесь правосторонние сдвиговые сейсмодетформационные подвижки одновременно сопровождаются взбросо-надвиговыми складкообразующими процессами. Иной характер имеет распределение очагов землетрясений в Восточно-Анатолийской системе разломов. В этой системе эпицентрально поле землетрясений образует геометрически узкую полосу, где по всей длине разлома наблюдаются левосторонние чисто сдвиговые подвижки. В отличие от сдвиговых подвижек фланговых зон Аравийской плиты, в ее передовой зоне коллизии с Южно-Армянским и Закавказским блоками, имеющими мозаично раздробленные микроблоковые строения, за счет

доминирующих в регионе субмеридионально направленных сжимающих сейсмотектонических напряжений, наблюдаются разнотипные, разноранговые сейсмотектонические подвижки [Гиоргобиани, 2020; Гиоргобиани, Закарая 2020; Abrehdari et al., 2023; Ismail-Zadeh et al., 2020; Karapetyan et al., 2023].

Именно в этом сложном геотектоническом поле, в юго-западной оконечности Восточно-Анатолийской системы разломов, произошли разрушительные Турецкие землетрясения.

Геодинамическая модель очага восточно-турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. $M_w=7,8$

Многочисленные экспериментальные исследования процессов разрывообразования и разработка на их основе теоретических моделей показывают, что процессы разрывообразования сильных землетрясений существенно влияют на такие факторы этой системы, какими являются поля напряжений, упругопластические деформации, геометрия разломов и их насыщенность флюидами, реология и вязкость геологической среды.

Следует отметить, что разрушительные и сильнейшие землетрясения в сейсмоактивных регионах возникают крайне редко. Детальное исследование их очаговых зон и построение адекватных моделей разрывообразования этих землетрясений вносят существенный вклад в понимание сейсмогенеза конкретного региона, в решение ряда фундаментальных проблем и в изучение физики очага землетрясения, в целом.

К таким землетрясениям относятся разрушительные землетрясения, произошедшие 06 и 20 февраля 2023 г., соответственно, с магнитудами $M_w = 7.8, 7.5$ и 6.3 в юго-восточной части крупного Восточно-Анатолийского трансформного разлома в области сочленения Евроазиатской, Африканской и Аравийской литосферных макроплит. Эти стихийные бедствия привели к многочисленным человеческим жертвам и почти полному разрушению ряда городов и населенных пунктов, в 5-ти провинциях юго-восточной части Турции и на приграничной с ней территории Сирии. Землетрясения были зарегистрированы сейсмическими станциями практически всех авторитетных мировых и региональных сейсмологических агентств. Решение фокальных механизмов этих землетрясений, а также многочисленные инструментальные регистрации волновых картин цифровых записей распространения объемных сейсмических волн на ближайших сейсмических станциях, наиболее полно обобщены и приведены в информационных бюллетенях Centre Sismologique Euro-Méditerranéen Euro-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) и Disaster and Emergency Management Presidency, Earthquake Department (AFAD) (www.emsc-csem.org; deprem.afad.gov.tr). Авторами была поставлена цель – на основе этих данных оценить напряженно-деформированное состояние очаговой области Газиантепского землетрясения, определить кинематические, динамические параметры, спектральные характеристики очагового излучения магистрального разрывообразования и построить его геодинамическую модель.

К основным кинематическим параметрам относятся длина, ширина и площадь плоскости магистрального разрывообразования, продолжительность и скорость этого процесса. На основе корреляционных зависимостей [Ризниченко, 1985] меж-

ду величиной магнитуды с протяженностью и шириной плоскости, а также продолжительностью протекания магистрального разрывообразования, был определен очаг Газиантепского землетрясения с магнитудой $M_W = 7.8$, который имеет протяженность 140 км, ширину 40 км и углубление в геологическую среду земной коры общей площадью $S = 5600 \text{ км}^2$, в которой в течение 38 секунд, со скоростью 2,4 км/с сформировался магистральный разрыв этого землетрясения. Проведен комплексный анализ параметров ориентации нодальных плоскостей и главных осей сжимающих и растягивающих напряжений с геометрией сейсмотектонических разрывов очаговой области. Восточно-Анатолийский разлом в очаговой области имеет сложную структуру геолого-тектонического строения, состоящую из 7 сегментов ступенчатообразных, кулисообразно расположенных разрывных нарушений, которые отделяют Анатолийскую плиту от Аравийской плиты [Lekkas et al., 2023]. В этой системе плоскость магистрального разрывообразования имеет ориентацию с юга-запада на северо-восток с азимутом 225° , с близвертикальным 85° углом падения в глубь земной коры, проекция которой на земную поверхность имеет ширину 15 км (рис. 3).

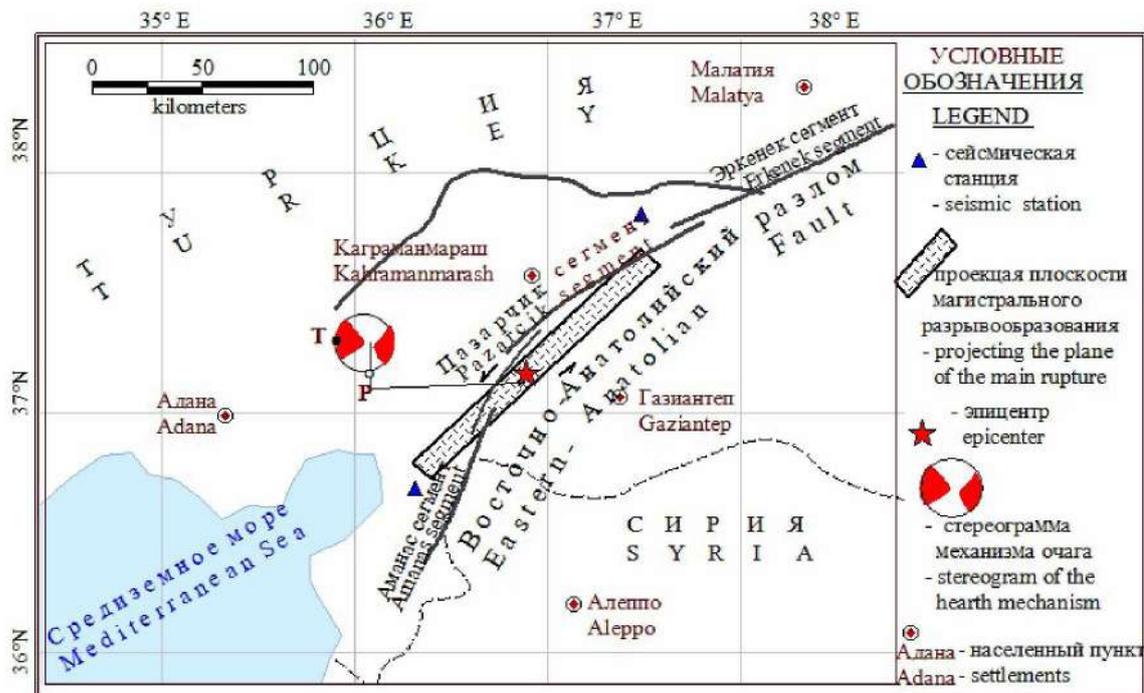


Рис. 3. Геолого-тектоническое строение и магистральный разрыв очага Газиантепского землетрясения /

Fig. 3. Geological-tectonic structure and main rupture of the source of the Gaziantep earthquake

Учитывая азимутальную ориентацию плоскости магистрального разрывообразования и ее угол падения относительно горизонта земной поверхности, противоположные грани плоскости разрыва представляют собой, т.н. «висячие» и «лежащие» борта мгновенного, относительного смещения разрыва и приуроченные к Аравийской и Анатолийской макроплитам, соответственно. Анализ разности времен вступлений объемной, продольной P_{max} волны на станциях, со всех сторон

оконтуривающих область азимутального, магистрального разрыва, показывает, что магистральное разрывообразование представляет собой гипоцентр, одновременно билатерально распространяющийся одноосный процесс. Сложные волновые картины регистраций цифровых записей, как на близрасположенных турецких сейсмических станциях, так и на удаленной геофизической станции Гарни ($\Delta = 740$ км) [Lekkas et al., 2023], показывают, что процесс разрывообразования по своему характеру, представляет собой, нелинейный, многоактовый процесс, состоящий из четырех субочагов.

Детали вспарывания магистрального разрыва и характер трещинообразования в очаговой зоне определяют особенности этих субисточников. Для их выявления были применены широко используемые в современной сейсмологии методы спектрального анализа очагового излучения объемных волн, зарегистрированные на сейсмостанциях. Какой бы сложности не были очаговые процессы и излучения, они описываются с помощью спектральной модели ω^2 [Аки, Ричардс, 1983] с двумя угловыми частотами разлагающими очаговое излучение на регулярные низкочастотные и высокочастотные составляющие. Этот сложный процесс магистрального разрывообразования наилучшим образом аппроксимируется спектральной моделью Хаскела [Аверьянова, 1989]. Для получения количественных значений референтные частот f_0 , f_1 и промежуточный диапазон доминантных частот, приведенных на спектрах записей на турецких станциях, нами были представлены в билогарифмическом масштабе в виде двух прямых, позволяющих получить значение первой референц-частоты $f_0 = 1,25$ Гц. С целью выделения второй f_1 референц частоты, частотного диапазона низкочастотных доминантных составляющих очагового излучения, был проведен спектральный анализ волновых форм амплитудно-частотных спектров продольных Р-волн, зарегистрированных на удаленной геофизической станции «Гарни», позволивший выделить вторую референц-частоту $f_1 = 0,55$ Гц. По практически квазигоризонтальному амплитудному уровню спектра доминантной низкочастотной составляющей прямым способом было определено значение скалярного сейсмического момента $M_0 = 5,2 \cdot 10^{20}$ Н·м. На этой же близгоризонтальной прямой низкочастотной составляющей четко выделяются три пика высокочастотных наложений, которые соответствуют очаговому излучению субисточника этого магистрального разрыва. По экспериментально определенным исходным данным, используя приведенные в работах [Костров, 1975; Аверьянова, 1989; Аптекман и др., 1989] формулы, были рассчитаны основные динамические параметры очага, количественные значения которых представлены в таблице 1.

Согласно этой модели, гипоцентр очага, где было накоплено наибольшее значение сейсмотектонических напряжений $\sigma = 2,5 \div 3,5$ мБар, и от которого начался процесс формирования магистрального разрывообразования, приурочен к Позарчикскому сегменту, к системе трансформного Восточно-Анатолийского разлома. Азимут магистрального разрыва совпадает с азимутом системы ступенчатых кулисообразно расположенных геолого-тектонических разрывных нарушений.

На основе кинематических, динамических параметров и спектральных характеристик очагового излучения, была разработана геодинамическая модель очага этого сильнейшего землетрясения Турции (рис. 4).

Таблица 1 / Table 1

**Кинематические и динамические параметры разрывообразования очага Mw =7,8
Газиантепского землетрясения /
Kinematic and dynamic parameters of the rupture formation of the Gaziantep earthquake
Mw =7.8**

Кинематические параметры / Kinematic parameters			Динамические параметры / Dynamic parameters						
Φ_S - азимутальная ориентация разрывообразования ($^{\circ}$)	$\Delta\tau$ - длительность разрывообразования (сек)	скорость разрывообразования (км·сек ⁻¹)	L_длина магистрального разрыва (км)	M_0 - скалярный сейсмический момент (Н·м)	E_S - высвобожденная сейсмическая энергия (Дж)	$\Delta\sigma$ - сброшенное напряжение (мБар)	$\Delta\tau$ - сброшенное касательное напряжение (мБар)	S_площадь поверхности разрыва очага (км ²)	η сейсмическая подвижка (м)
Φ_S - azimuthal orientation of rupture formation ($^{\circ}$)	$\Delta\tau$ - duration of rupture formation (sec)	speed of rupture formation (km·sec ⁻¹)	L - length of main rupture (km)	M_0 - scalar seismic moment (N·m)	E_S - released seismic energy (J)	$\Delta\sigma$ - released voltage (mBar)	$\Delta\tau$ - released shear stress (mBar)	S - surface area of hypocenter rupture (km ²)	η - ismotectionic movement (m)
228	37,8	2,4	140	$5,4 \cdot 10^{20}$	$3,16 \cdot 10^{16}$	2,5	3,5	5600	3,2

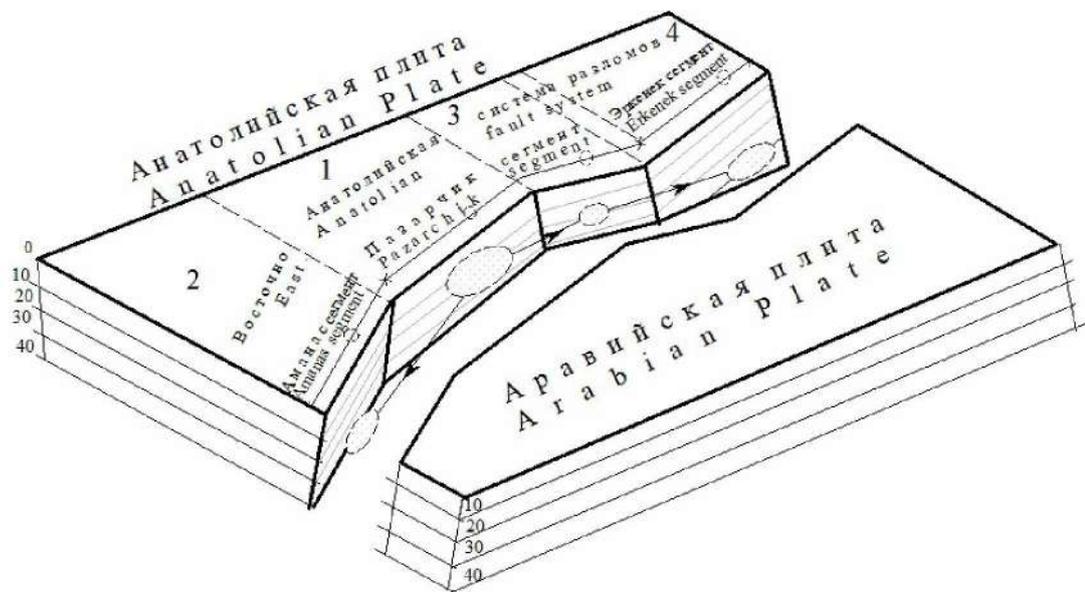


Рис. 4. Геодинамическая модель очага Газиантепского землетрясения

Fig. 4. Geodynamic model of the focus of the Gaziantep earthquake

Результаты и их обсуждение

Анализ параметров фокальных механизмов землетрясений от 06 февраля 2023 года с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$, короткий интервал разделяющего их времени и пространственная близость их возникновения, а также наличие непревышения разности значений магнитуд $\Delta m \leq 0.4$, по всей вероятности указывают на то, что эти землетрясения являются, т.н. «дуплет»-землетрясениями [Davison, 1972; Викулин и др., 2008; Cheng-Horng et al., 2008]. Резкое изменение накопленных тектонических напряжений в очагах этих землетрясений послужило триггерным механизмом для инициирования возникновения третьего землетрясения от 20 февраля 2023 года с магнитудой $M_w=6.3$. Детальное изучение этих процессов позволит выявить основные закономерности и характерные особенности разрывообразований, возникающих в районе очагов сильных землетрясений.

Приведенные инструментальные данные в информативных бюллетенях ведущих мировых сейсмологических агентств, а также возникновение более 8 000 афтершоков, указывают на сложный характер процессов разрывообразования в очагах этих землетрясений.

Эффективная длина магистрального разрыва направлена с юго-запада на северо-восток и последовательно полностью охватывает Аманосский, Пазарчикский и Эргенекский сегменты до дизъюнктивного узла этой системы с Сургутского глубинного разлома [Lekkas et al., 2023]. В ходе развития разрывообразования происходит относительно гладкое скольжение без отрыва берегов этих разрывных сегментов с одновременным раздроблением сплошности геологической среды на перемычках кулисообразно расположенных сегментов. В общем процессе разрывообразования эти фрагменты раздробления геологической среды представляют собой субочаги мультиплетного, многоактового вспарывания магистрального разрыва. При возникновении землетрясения в гипоцентральной области произошло резкое относительное смещение противоположенных бортов магистрального разрыва, значение которого составило $u = 3,2$ м. Значительная по величине сейсмотектоническая подвижка по мере удаления от гипоцентра убывает. На основе тензорного анализа сейсмического момента, были определены главные диагональные составляющие M_1 , M_2 , M_3 и по этим данным рассчитан коэффициент Лоде-Надаи $\mu = 0,08$, который указывает на то, что в очаге подвижка по разрыву представляет собой чистый левосторонний сдвиг.

В дальнейшем геодинамическая модель может быть уточнена с помощью привлечения пространственно-временного распределения афтершокового процесса данного землетрясения.

Построенная геодинамическая модель позволит выявить основные закономерности и характерные особенности разрывообразования в очагах, возникающих в регионе сильных землетрясений, и позволит адекватно оценить уточненную картину сейсмогенеза.

Выводы

Анализ параметров фокальных механизмов землетрясений от 06 февраля 2023 года с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$, короткий интервал разделяющего их времени и пространственная близость их возникновения, а также наличие непревышения разности значений магнитуд $\Delta m \leq 0,4$, по всей вероятности указывают, что эти землетрясения являются, т.н. «дуплет»-землетрясениями. Резкое изменение накопленных тектонических напряжений в очагах этих землетрясений послужило триггерным

механизмом для инициирования возникновения третьего землетрясения 20 февраля 2023 года с $M_w = 6.3$.

На основе определения кинематических, динамических параметров и спектральных характеристик очагового излучения разработана геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения в Турции от 06 февраля 2023 года с магнитудой $M_w = 7.8$.

При возникновении землетрясения в гипоцентральной области произошло резкое относительное смещение противоположенных бортов магистрального разрыва, значение которого составило $u = 3,2$ м. Значительная по величине сеймотектоническая подвижка по мере удаления от гипоцентра убывает.

На основе тензорного анализа сейсмического момента, определены главные диагональные составляющие M_1 , M_2 , M_3 и по этим данным рассчитан коэффициент Лоде-Надаи $\mu = 0,08$, значение которого показывает, что в очаге подвижка по разрыву представляет собой чистый левосторонний сдвиг.

Геодинамическая модель в будущем может быть уточнена с помощью привлечения пространственно-временного распределения афтершокового процесса землетрясения.

Литература

1. Аверьянова В.Н. Энергетический спектральный метод оценки сейсмической опасности. М.: Наука, – 1989. – 187 с.
2. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1, 2, М.: Изд-во «Мир», – 1983.
3. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Полиарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очагов. // *Вулканология и сейсмология*. – 1989. – С. 66–79.
4. Викулин А.В., Викулина С.А., Водинчар Г.М. Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений – закономерность сейсмического процесса. // *Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России*. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РА. – 2008. – С. 145–149.
5. Габриелян А.А., Саркисян О.А., Симонян Г.П. Сеймотектоника Армянской ССР. Изд-во Ереван, ун-та. – 1981. – 284 с.
6. Габриелянц Г.А., Клешев К.А., Шеин В.С. Возможно нефтегазоносные бассейны Армении и их углеводородных потенциал. // *Геология нефти и газа*. – 2002. – №1. – С. 21–30.
7. Гиоргобиани Т. В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. № 1. С. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063.
8. Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. № 2. С. 22–37. DOI:10.46698/VNC.2020.58.70.002.
9. Караханян А.С. Активные разломы и сильные землетрясения Анатолийско-Малокавказского орогена. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. – М.: 1995. – 45 с.
10. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука. 1975. – 176 с.
11. Ризниченко Ю.В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука. 1985. – 405 с.
12. Шебалин П.Н. Увеличение радиуса корреляции и цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями. // *Физика земли*. – 2020. – №1 – С. 30–42.

DOI:10.31857/S0002333720010135.

13. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., and Geodakyan E. Tectonic Activities Description in the Ongoing Collision Zone of the Eurasia-Arabia Plates Using 2D Surface Waves Tomography. *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2023. – Vol. 23. – ES2004. – DOI: 10.2205/2023ES000835.

14. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys. Rev. A*. – 1988. – Vol. 38. pp. 364–374.

15. Berberian M. Master ‘blind’ thrust faultshidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. // *Tectonophysics*. – 1995. – 241. pp. 193–224.

16. Brinkman R. *Geology of Turkey*. Ferdinand Enkever bay, Stuttgart, – 1976.

17. Cheng-Horng Lin, Yih-Hsiung Yeh, Masataka Ando, Kuang-Jung Chen, Tao-Ming Chang, and Hsin-Chieh Pu Earthquake Doublet Sequences: Evidence of Static Triggering in the Strong Convergent Zones of Taiwan. // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* – 2008. – Vol. 19. No. 6. – pp. 589–594.

18. Davison Charles Twin Earthquakes. *The Journal of Geology*. – 1972. – Vol. 35. No. 6. – pp. 507–526.

19. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kengerli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., and Soloviev A. Geodynamics, seismicity and seismic hazards of the Caucasus. // *Earth Sci. Rev.* – 2020. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.

20. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., and Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. // *EGU General Assembly*. – 2023. – Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-16905. DOI:10.5194/egusphere-egu23-16905.

21. Lekkas E., Carydis P., Vassilakis E., Mavroulis S., Argyropoulos I., Sarantopoulou A., Mavrouli M., Konsolaki A., Gogou M., Katsetsiadou K.-N., Kotsi E., Spyrou N.-I., Diakakis M., Kranis H., Skourtsos E., Lozios S., Soukis K. The 6 February 2023 Turkey-Syria Earthquakes. *Newsletter of Environmental, Disaster and Crises Management Strategies*. // 2023. – Vol. 29. ISSN 2653–9454. DOI: 10.13140/RG.2.2.17643.82726.

22. McKenzie Dan Active tectonics of the Mediterranean region. // *Geophys. J.R. aster. Soc.* – 1972. – Vol. 30. – pp. 109–185.

23. Reilinger R., McClusky S., Vernant Ph., and all. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Ebrasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of geophysical research*. – 2006. – Vol. 111. – B05411. DOI:10.1029/2005JB004051.

References

1. Averyanova V.N. *Energetic Spectral Method of Assessment of Seismic Hazard*. Moscow. Nauka. 1989. 187 p. (In Russ.)

2. Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology*. Vol. 1, 2. Moscow. Publishing house «Mir». 1983. (In Russ.)

3. Aptekman Zh.Ya., Balavina Yu.Ph., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Poliarpova L.A., Chepkunas L.S. Spectra of P-waves in the Problem of Determining the Dynamic Parameters of Earthquake Sources. Transition from the Station Spectrum to the Focal Zone Spectrum and Estimation of the Dynamic Parameters of the Sources. *Volcanology and Seismology*. 1989. pp. 66–79. (In Russ.)

4. Vikulin A.V., Vikulina S.A., Vodinchar G.M. Doublet Earthquakes and Earthquake Pairs – a Pattern of the Seismic Process. *Geophysical Monitoring and Problems of Seismic Safety of the Russian Far East*. Petropavlovsk-Kamchatsky: KF GS RA. 2008. pp. 145–149. (In Russ.)

5. Gabrielyan A.A., Sargsyan O.A., Simonyan G.P. *Seismotectonics of the Armenian SSR*. Publishing house Yerevan, univ. 1981. 284 p. (In Russ.)

6. Gabrielyants G.A., Kleshev K.A., Shein V.S. The Possible Oil and Gas Basins of Armenia and their Hydrocarbon Potential. *Geology of oil and gas*. 2002. No. 1. pp. 21–30. (In Russ.)
7. Giorgobiani T.V., Zakaraia D.P. Folding Structure of the South Slope of the Great Caucasus in Crossing the Gorge of the River Ksani. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 22–37. DOI: 10.46698/VNC.2020.58.70.002.
8. Giorgobiani T.V. Stages, Mechanism and Geodynamics of Formation of the Folded System of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063.
9. Karakhanyan A.S. Active Faults and Strong Earthquakes of the Anatolian-Lesser Caucasian Orogeny. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow. 1995. 45 p. (In Russ.)
10. Kostrov B.V. Mechanics of a Tectonic Earthquake Focal Zone. Moscow. Nauka. 1975. 176 p. (In Russ.)
11. Riznichenko Yu.V. Selected Papers. Problems of Seismology. Moscow. Nauka. 1985. 405 p. (In Russ.)
12. Shebalin P.N. Increase in the Correlation Radius and the Chain of Earthquakes before the Strongest Seismic Events. *Physics of the Earth*. 2020. No. 1. pp. 30–42. DOI:10.31857/S0002333720010135. (In Russ.)
13. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., and Geodakyan E. Tectonic Activities Description in the Ongoing Collision Zone of the Eurasia-Arabia Plates Using 2D Surface Waves Tomography. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23. ES2004. DOI: 10.2205/2023ES000835.
14. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys. Rev. A*. 1988. Vol. 38. pp. 364–374.
15. Berberian M. Master ‘blind’ thrust fault hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*. 1995. 241. pp. 193–224.
16. Brinkman R. *Geology of Turkey*. Ferdinand Enkever bay, Stuttgart, 1976.
17. Cheng-Horng Lin, Yih-Hsiung Yeh, Masataka Ando, Kuang-Jung Chen, Tao-Ming Chang, and Hsin-Chieh Pu Earthquake Doublet Sequences: Evidence of Static Triggering in the Strong Convergent Zones of Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2008. Vol. 19. No. 6. pp. 589–594.
18. Davison Charles Twin Earthquakes. *The Journal of Geology*. 1972. Vol. 35. No. 6. pp. 507–526.
19. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kengerli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., and Soloviev A. Geodynamics, seismicity and seismic hazards of the Caucasus. *Earth Sci. Rev.* 2020. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
20. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., and Matevosyan G. Study of modern regional and local anomalous variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. EGU General Assembly. 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023. EGU23–16905. DOI:10.5194/egusphere-egu23-16905.
21. Lekkas E., Carydis P., Vassilakis E., Mavroulis S., Argyropoulos I., Sarantopoulou A., Mavrouli M., Konsolaki A., Gogou M., Katsetsiadou K.-N., Kotsi E., Spyrou N.-I., Diakakis M., Kranis H., Skourtsos E., Lozios S., Soukis K. The 6 February 2023 Turkey-Syria Earthquakes. *Newsletter of Environmental, Disaster and Crises Management Strategies*. 2023. Vol. 29. ISSN 2653–9454. DOI: 10.13140/RG.2.2.17643.82726.
22. McKenzie Dan Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J.R. aster. Soc.* 1972. Vol. 30. pp. 109–185.
23. Reilinger R., McClusky S., Vernant Ph., and all. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of geophysical research*. 2006. Vol. 111. B05411. DOI:10.1029/2005JB004051.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

Оригинальная статья

О новом подходе к учету влияния «грунтового» фактора при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий

Ю.К. Чернов 

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru

Статья поступила: 05.09.2023, доработана: 20.11.2023, принята к публикации: 30.11.2023

Резюме: Актуальность работы. В последнее время стали появляться данные о том, что при вероятностном анализе сейсмической опасности (PSHA) для учета грунтовых условий лучше использовать новые «одноступенчатые» расчетные схемы, которые дают более точные оценки, чем старые «двухступенчатые». Однако эти данные получены на ограниченном материале и, поэтому, остается вопрос, настолько ли они имеют общий характер и не являются ли частным случаем. В настоящей статье сделана попытка прояснения этого важного в научно-методическом и прикладном плане обстоятельства, чем и определяется ее актуальность. **Цель исследования.** Изучение особенностей и масштабов флуктуаций интегральных вероятностных оценок приращений балльности и спектральных характеристик «мягких» грунтов по отношению к «твердым» при землетрясениях в районах с разными сейсмогеологическими условиями. **Методы исследования.** Рассмотрены четыре тестовых участка территорий с разными сеймотектонической обстановкой и сейсмическим режимом. Для каждого участка выполнен вероятностный анализ сейсмической опасности. Все расчеты PSHA сделаны отдельно для «мягких» и для «твердых» грунтов. Оценивались вероятные интенсивности сотрясений и спектры (Фурье и реакции) ускорений колебаний грунта. В целях повышения информативности эксперимента для одного и того же участка производились расчеты с использованием различных моделей зон ВОЗ и повторяемости землетрясений. Итоговые оценки сделаны для землетрясений с разными средними периодами повторяемости. Варианты оценок, полученных для «мягких и «твердых» грунтов применительно к разным сейсмогеологическим условиям и для разных средних периодов повторяемости землетрясений затем сопоставлены между собой, на основании чего и сделаны окончательные выводы. **Результаты исследования.** Для исследуемых участков (гг. Владикавказ, Ставрополь, Моздок и ст. Кавказская) разработаны свои функции распределения вероятностей интенсивностей сотрясений, уровней спектральной плотности Фурье и спектральных ускорений «мягких» и «твердых» грунтов, определены значения этих параметров для землетрясений со средними периодами повторяемости от 100 до 10000 лет и соответствующие их разности (приращения балльности) и соотношения (спектральные характеристики). Анализ всех вариантов расчетов показал, что в соотношениях параметров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов наблюдается значительная переменность – по приращениям балльности до 2 баллов MSK, по спектральным характеристикам до 60%. Эти результаты показывают, что вероятностные оценки сейсмической опасности по традиционной «двухступенчатой» схеме, когда «грунтовая» составляющая общего эффекта оценивается отдельно от «очаговой» составляющей и затем учитывается в виде некоторой постоянной поправки, могут приводить к существенным искажениям. Более перспективным здесь является использованный в данной работе «одноступенчатый» подход.

Ключевые слова: землетрясения, вероятностный анализ сейсмической опасности, интенсивность сотрясений, спектры колебаний грунта, приращения балльности, спектральные характеристики.

Для цитирования: Чернов Ю.К. О новом подходе к учету влияния «грунтового» фактора при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 55-70. DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

Original paper

About a new approach to accounting for the influence of the “soil” factor in probabilistic assessments of seismic hazard of territories

Y.K. Chernov 

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

Received: 05.09.2023, revised: 20.11.2023, accepted: 30.11.2023

Abstract: Relevance. Recently, the data have begun to appear that in the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), it is better to use new “one-stage” calculation schemes to account soil conditions, which give more accurate estimates than the old “two-stage” ones. However, these data were received on limited material and, therefore, the question remains whether they are so general and are not a special case. In this article, an attempt is made to clarify this important circumstance in scientific, methodological and practical terms, which determines its relevance. **Aim.** To research the features and scale of fluctuations in integral probabilistic estimates of the increments of the score and spectral characteristics of “soft” soils relative to “hard” during earthquakes in areas with different seismogeological conditions. **Methods.** Four test sites of territories with different seismotectonic conditions and seismic regime are considered. A PSHA was performed for each site. All PSHA calculations are made separately for “soft” and “hard” soils. The probable intensities of shaking and the spectra (Fourier and reaction) of accelerations of soil vibrations were estimated. In order to increase the informativeness of the experiment for the same site, calculations were made using different models of PEF zones and earthquake repeatability. Final estimates are made for earthquakes with different average recurrence periods. The variants of estimates obtained for “soft” and “hard” soils in relation to different seismogeological conditions and for different average periods of earthquake repeatability are then compared with each other, on the basis of which the final conclusions are made. **Results.** For the studied sites (Vladikavkaz, Stavropol, Mozdok and village Kavkazskaya) were developed own probability distribution functions for earthquake intensities, Fourier spectral density levels and spectral accelerations of “soft” and “hard” soils, the values of these parameters for earthquakes with average repeatability periods from 100 to 10,000 years and their corresponding differences (intensity increments) and ratios (spectral characteristics) were determined. The analysis of all the calculation options showed that there is significant variability in the ratios of the vibration parameters of “soft” and “hard” soils – in intensity increments up to 2 units of MSK scale, in spectral characteristics up to 60%. These results show that probabilistic estimates of seismic hazard according to the traditional “two-stage” scheme, when the “soil” component of the total effect is estimated separately from the “focus” component and then taken into account in the form of some constant correction, can lead to significant distortions. The “one-stage” approach used in this paper is more prospective.

Keywords: earthquakes, probabilistic seismic hazard analysis, intensity of shaking, spectra of soil vibrations, intensity increments, spectral characteristics.

For citation: Chernov Y.K. About a new approach to accounting for the influence of the “soil” factor in probabilistic assessments of seismic hazard of territories. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 55-70. DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

Введение

Количественные оценки сейсмической опасности помимо своего чисто познавательного значения, являются одной из важнейших составляющих комплекса защитных мероприятий от вредного воздействия землетрясений. Уровень сейсмической опасности определяется рядом природных факторов, которые условно можно разделить на две основные группы. Первая – характеристики очагов возможных на данной территории землетрясений и глубинные свойства среды распространения сейсмических возмущений от очагов в расчетную точку и вторая – строение и свойства поверхностных грунтовых массивов, в которых и проявляются сейсмические эффекты.

В Российской Федерации решению проблемы сейсмической опасности служат три последовательно повышающих точность и детальность оценок вида сейсмического районирования – общее сейсмическое районирование (ОСР), детальное сейсмическое районирование (ДСР) и сейсмическое микрорайонирование (СМР) (см. [Медведев, 1962; Сейсмическое... , 1977; 1978; Касымов, 1979; Штейнберг и др., 1993; Оценка... , 1997; Геодинамика... 1997; The global... , 1999; Составление... , 1999; Заалишвили, 2009; Уломов, 2012; Общее... , 2016; Завьялов и др., 2018; Трифонов и др., 2019; Чернов, 2021]).

При ОСР и ДСР делается акцент на изучение «очаговой» группы факторов. Факторы же «грунтовой» группы, здесь учитываются в ограниченном виде – оценки даются только для некоторых «базовых» или «эталонных» грунтов. Поэтому на практике для грунтов, которые отличаются от «эталонных» в оценки ОСР и ДСР вводятся специальные поправки. Для этого используют два основных подхода. При первом (централизованно, на уровне норм и правил) разные грунты предварительно группируют в несколько типов по их «сейсмическим свойствам». В настоящий момент это «твердые» или «скальные», или «улучшенные» грунты (I категория СНиП по сейсмическим свойствам), «средние» или «мягкие», или переходные от «твердых» к «рыхлым» (II категория) и «рыхлые» или «ухудшенные» (III категория). В последних редакциях СНиП выделяется еще более «неблагоприятная» IV категория. Для каждой категории грунта предусматриваются свои поправки, одинаковые (т.е. не зависящие от «очаговых» факторов) на территории всей страны.

Второй подход, реализуется прежде всего в СМР. Здесь уже рассматриваются не условные осредненные типы грунтов, а реальные грунтовые разрезы (точнее модели реальных разрезов), что расширяет возможности для более точного определения степени и характера влияния грунтовой толщи на ожидаемые характеристики сейсмических воздействий.

К настоящему времени достигнут большой прогресс в развитии этого направления. Изучены закономерности и разработаны соответствующие методы, позволяющие достаточно точно оценивать реакцию различных грунтовых разрезов в зависимости от литологического состава, физико-механических свойств и конфигурации слагающих эти разрезы инженерно-геологических элементов, от частоты

и углов подхода сейсмических волн, от рельефа местности и других факторов. Причем, если ранее основные достижения, в основном касались колебательных сейсмических движений, то в последние годы наблюдаются очевидные успехи в изучении нелинейности сейсмической реакции грунтов с выходом на новые виды оценок сейсмической опасности, такие как сейсмогенное разжижение, сейсмогравитационные явления, сейсмические просадки грунта и др. (см. например, [Cotton et al., 2006; Akkar et al., 2014; Bozorgnia et al., 2014; Caprio, 2015; Fäh et al., 2012; Куруоглы, Эскисар, 2015; Mahmood et al., 2021; Заалишвили и др., 2021; 2022; Zumpano et al., 2022; Мельков и др., 2022]). Можно сказать, что сейчас уже в значительной мере наработана научная база, позволяющая производить адекватные оценки вклада «грунтовой составляющей» в общие сейсмические эффекты.

В то же время на практике, в основном, из-за недостаточного знания реальных характеристик грунтовой толщи и параметров, подходящих к ее подошве «исходных» сейсмических сигналов, зачастую не удается в полной мере реализовать в принципе имеющийся здесь потенциал. Поэтому при использовании второго подхода во многих случаях оценивается (хотя и с большей точностью), но по сути та же «грунтовая» поправка, которая затем вводится либо в готовые оценки ОСР или ДСР, либо (что бывает реже) в используемые в дальнейших расчетах модели сильных движений грунта (модели СДГ). Таким образом, отличительной чертой вышеуказанных «грунтовых» поправок как первого, так и второго типов является их слабая зависимость от параметров окружающего расчетную точку сейсмогенерирующего объема энергия-пространство-время.

Такая «двухступенчатая», как мы ее называем, схема расчетов сложилась и могла считаться в достаточной степени корректной в периоды преобладания детерминистских подходов. Сейчас же, в связи с переходом на вероятностные расчеты, ситуация изменилась. Так, проведенные в Геофизическом институте ВНЦ РАН исследования показали (см. [Чернов и др., 2022]), что при вероятностной постановке задачи вышеописанное разделение оценок на «очаговые» и «грунтовые» может приводить к значительным погрешностям. В то же время в данной работе подчеркивалось, что полученные результаты пока следует расценивать как частный случай, относящийся только к конкретно рассмотренной территории, а имеют ли они более общий характер следует выяснить в процессе дальнейших исследований. Рассмотрению именно этой задачи и посвящена данная работа, чем и определяется ее актуальность и значимость.

Информационная база и методика исследований

Настоящее исследование базируется на результатах наших предыдущих работ и является их продолжением. Некоторые из этих результатов подробно изложены в статье [Чернов и др., 2022], в которой также имеются ссылки на предыдущие наши публикации и первоисточники. Здесь лишь укажем, что первыми и задающими тон дальнейшим разработкам данного цикла были выявленные различия в структуре построенных на основе статистического анализа большого объема эм-

пирических данных, функций затухания спектров Фурье колебаний различных по своим сейсмическим свойствам (см. выше) «мягких» и «твердых» грунтов. Данные различия приводят к тому, что, например, отношения между спектрами колебаний одних и тех же типов грунтов (в нашем случае «мягких» и «твердых») не являются постоянными величинами, как это принимается обычно в отечественной практике оценок сейсмической опасности, а достаточно сложным образом меняются в зависимости от магнитуды землетрясения (M), расстояния до очага (D) и частоты спектральной составляющей (f).

В настоящей работе эти новые модели СДГ использованы для вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA) участков, расположенных в районах с высоким (г. Владикавказ), средним (гг. Ставрополь и Моздок) и низким (ст. Кавказская) уровнем сейсмичности. Рассчитывались функции распределения вероятностей не превышения (превышения) уровней кумулятивных или интегральных сейсмических воздействий, представляющие собой суперпозицию воздействий всех потенциально опасных для расчетного участка очагов землетрясений с учетом вероятности их возникновения в данном месте в заданный промежуток времени. В качестве прогнозируемых параметров воздействий рассмотрены обычно используемые в отечественной инженерно-сейсмологической практике макросейсмические интенсивности (балльности) сотрясений ($I_{\text{СП}}$), спектры Фурье ($|S|(f)$) и спектры реакции $SA(f)$ ускорений колебаний грунта. Обозначение интенсивности сотрясений символом $I_{\text{СП}}$ показывает, что данный параметр здесь, также, как в [Чернов и др., 2022] рассчитывается через спектр Фурье. По полученным функциям распределения оценивались уровни возможных воздействий для землетрясений со средними периодами повторяемости $t=100, 200, 500, 1000, 2500, 5000$ и 10000 лет. Общая расчетная схема и отдельные математические процедуры в настоящих исследованиях (включая оценки спектров реакции по спектрам Фурье) такие же, как и при выполнении ДСР территории РСО-Алания [Чернов, 2021; Чернов и др., 2022]. Все оценки сначала сделаны отдельно для «мягких» и для «твердых» грунтов, после чего по ним рассчитаны вероятные приращения балльности ($\Delta I_{\text{СП}}$) и спектральные характеристики Фурье ($\varphi(f)=|S|(f)_{\text{МЯГ}}/|S|(f)_{\text{ТВ}}$) и реакции ($\psi(f)=SA(f)_{\text{МЯГ}}/SA(f)_{\text{ТВ}}$) «мягких» грунтов по отношению к «твердым».

Для производства расчетов помимо описанных выше моделей СДГ использованы так называемые модели локальной сейсмичности, свои для каждого исследуемого участка. Для увеличения информативности эксперимента в ряде случаев для одного и того же участка рассмотрено несколько версий таких моделей. На рисунке 1 приведены используемые версии моделей зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ). Подробное описание этих моделей дается в первоисточниках [The global..., 1999; Составление..., 1999]. Здесь лишь поясним, что в наших обозначениях версии ДСР-1 и ДСР-2 соответствуют вариантам зон ВОЗ, разработанным в [Составление..., 1999] внутрорегиональным и внерегиональным методами.

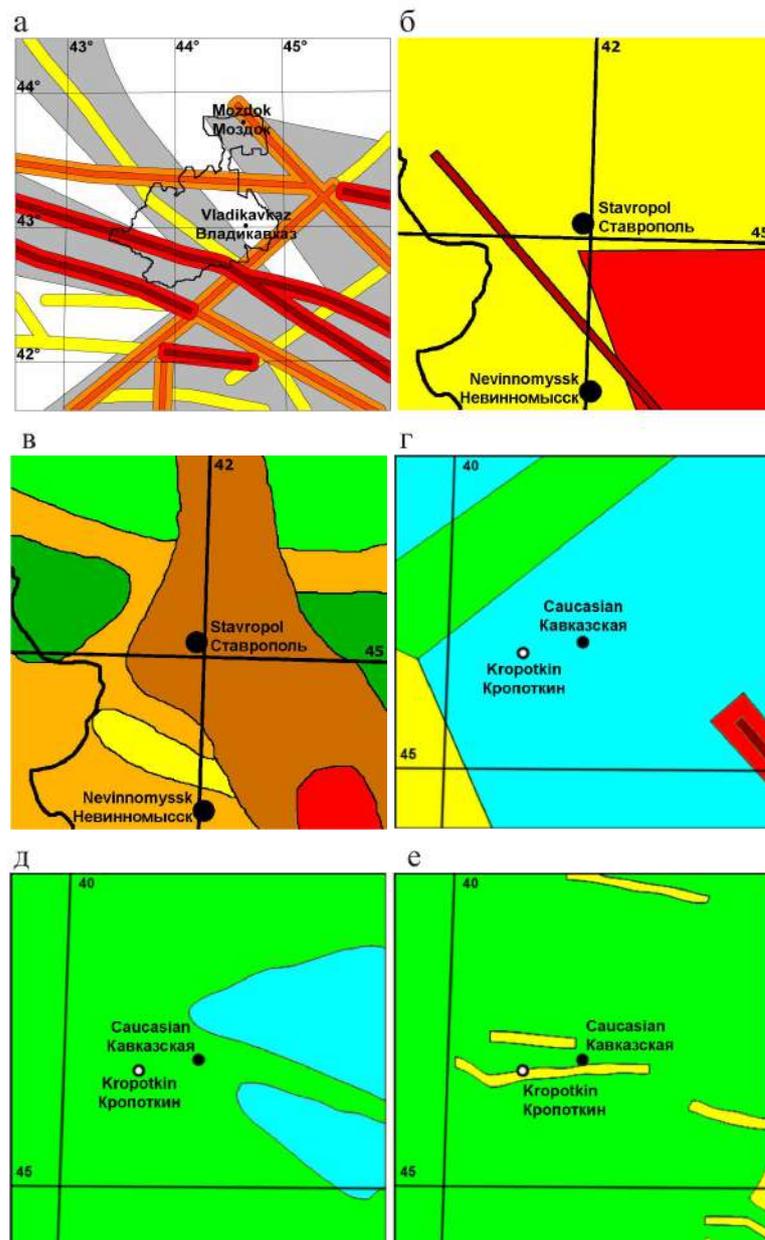


Рис.1. Модели зон ВОЗ для исследуемых районов: а – версия ОСР для гг. Владикавказ и Моздок, где ломаная черная линия – граница РСО-Алания (пояснения в [Чернов, 2021]); б и в – версии ОСР и ДСР-1, соответственно, для г. Ставрополь, где, темно-кричневый, красный, коричневый, светло-коричневый, желтый, зеленый и светло-зеленый цвета означают зоны с $M_{max} = 6,0, 5,5, 5,0, 4,5, 4,0, 3,5$ и $3,0$, соответственно; г, д и е – версии ОСР, ДСР-1 и ДСР-2, соответственно, для ст. Кавказская, где темно-коричневый и красный цвета означают, соответственно, осевые и боковые подзоны зоны с $M_{max} = 6,0$, желтый, зеленый и голубой цвета означают зоны с $M_{max} = 5,5, 4,5$ и $4,0$, соответственно /

Fig.1. Models of zones of possible earthquake focuses (PEF) for the researched areas: "a" – the version of the general seismic zoning (GSZ) for Vladikavkaz and Mozdok, where the broken black line is the border of the RSO–Alania (explanations in [Chernov, 2021]); "b" and "c" – the versions of the GSZ and the detailed seismic zoning (DSZ–1), accordingly, for Stavropol, where, dark-brown, red, brown, light-brown, yellow, green and light-green colors mean areas with $M_{max} = 6,0, 5,5, 5,0, 4,5, 4,0, 3,5$ and $3,0$, respectively; d, e and f – versions of the GSZ, DSZ–1 and DSZ–2, accordingly, for Caucasian vill., where dark-brown and red colors mean, accordingly, axial and lateral subzones of the zone with $M_{max} = 6,0$, yellow, green and blue colors mean zones with $M_{max} = 5,5, 4,5$ and $4,0$, respectively.

Прим.: а-а; б-б; в-в; г-г; д-д; е-е.

Модели повторяемости землетрясений разных магнитуд построены таким же способом, как и для ДСР территории РСО-Алания [Чернов, 2021].

Для района гг. Владикавказ и Моздок в качестве базового (общего, без разделения на зоны ВОЗ) для диапазона магнитуд $M=3,0-7,5$ принято выражение:

$$\lg N = -0,898M + 0,368 \quad (1)$$

Для района г. Ставрополь и ст. Кавказская аналогичное выражение для диапазона магнитуд $M=3,0-6,0$ имеет вид:

$$\lg N = -0,868M - 0,102 \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) N – среднее количество очагов землетрясений данной магнитуды, приведенное к площади $S=5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ и времени 1 год. Выражения (1) и (2) справедливы для землетрясений, сгруппированных по магнитудам с шагом 0,5 т.е. для $M=3,0$, $M=3,5$, $M=4,0$ и т.д. Далее, полученные по выражениям (1) и (2) значения $N(M)$ преобразованы (см. [Чернов, 2021]) в оценки, учитывающие показанные на рисунке 1 версии деления территорий на разные зоны ВОЗ. В графическом виде описанные модели для зон ВОЗ с $M_{\max}=7,5$ (район гг. Владикавказа и Моздока) и с $M_{\max}=6,0$ (район г. Ставрополя и ст. Кавказской) показаны на рис. 2. Аналогичные графики для зон ВОЗ с другими (меньшими) M_{\max} получаются из графиков на рисунке 2 отсечением правой части в соответствии с данными рисунка 1.

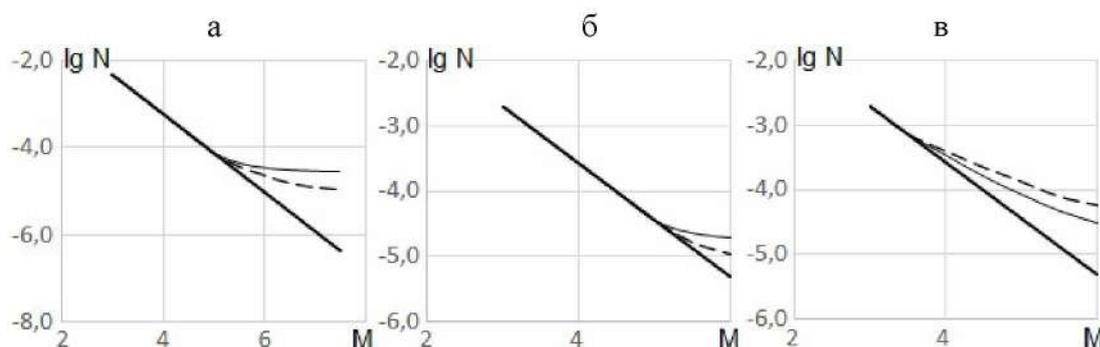


Рис. 2. Среднее количество землетрясений (N) разных магнитуд (M) (приведено к площади $S=5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ и времени $t=1$ год) для районов: а – гг. Владикавказ и Моздок и б – г. Ставрополь и ст. Кавказская, где толстые линии – общие для всего района, тонкая сплошная и пунктир – для осевых и боковых зон линейных зон ВОЗ по моделям ОСР, соответственно; в – г. Ставрополь и ст. Кавказская, где толстая линия – общая для всего района, тонкая сплошная линия и пунктир – для зон ВОЗ по моделям ДСР-1 и ДСР-2, соответственно /

Fig. 2. The average number of earthquakes (N) of different magnitudes (M) (given to an area of $S=5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ and time $t=1$ year) for the districts: "a" – Vladikavkaz and Mozdok and "b" – Stavropol and Kavkazskaya vill., where thick lines are common to the entire district, thin solid and stipple line – for the axial and lateral zones of the linear zones PEF according to the GSZ models, accordingly; "c" – Stavropol and Kavkazskaya vill., where a thick line is common to the entire district, a thin solid line and stipple line – for the PEF zones according to the DSZ-1 and DSZ-2 models, respectively.

Прим.: а-а; б-б; в-в.

Так же, как и в случае моделей повторяемости, в расчетах использованы показанные на рисунке 3 два варианта моделей распределения очагов землетрясений разных магнитуд по глубине – разработанные для района гг. Владикавказ и Моздок и для района г. Ставрополь и ст. Кавказская. Первый вариант – скорректированная модель из [Чернов, 2021]. Второй – это обобщение наших предыдущих разработок,

выполненных в рамках исследований по оценкам сейсмической опасности различных участков территорий Ставропольского и Краснодарского краев (Отчеты находятся в фондах ОАО «СтавропольТИСИЗ», ООО «Изыскатель», ООО «Научно-технический инженерно-геологический центр».

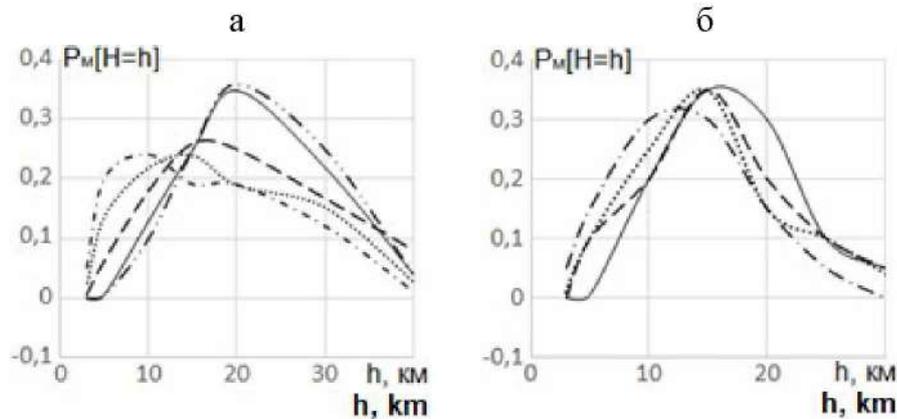


Рис. 3. Эмпирические функции плотности вероятности (гистограммы) распределения очагов землетрясений разных магнитуд по глубине ($P_M[H=h]$): а – для района гг. Владикавказ и Моздок и б – для г. Ставрополь и ст. Кавказская. Пунктир с точкой, точечная, пунктир, сплошная, пунктир с двумя точками – для $M=3; 4; 5; 6$ и $7-7,5$, соответственно /

Fig. 3. Empirical functions of probability density (histograms) of the distribution of earthquake foci of different magnitudes by depth ($P_M[H=h]$): “a” – for the area of Vladikavkaz and Mozdok and “b” – for Stavropol and Kavkazskaya vill. Stipple line with a dot, dotted line, stipple line, solid, stipple line with two dots – for $M=3; 4; 5; 6$ and $7-7.5$, accordingly.

Прим.: а-а; б-б.

Очаги потенциально опасных землетрясений моделировались площадками в форме эллипсов, большая (L) и меньшая (W) оси которых в зависимости от магнитуды определялись как:

$$\lg L = -0,040M^2 + 0,867M - 2,642 \quad (3)$$

$$\lg W = -0,023M^2 + 0,745M - 2,429$$

где L и W в км.

Выражения (3) являются обобщением определений, приведенных в различных публикациях (см. [Штейнберг и др., 1993; Wells, Coppersmith, 1994; Vakov, 1996; Геодинамика... 1997; The global... , 1999; Чернов, 2021]).

По тем же соображениям, что и в [Чернов, 2021] в расчетах принято, что большие оси эллипсов ориентированы горизонтально, а в поперечном направлении площадки наклонены под углом $\approx 60^\circ$ к горизонтальной поверхности. При этом азимутальная ориентация очагов небольших землетрясений ($M < 6$) в пределах разрешенных для них зон ВОЗ, произвольная, а более крупные очаги ориентированы преимущественно в направлении соответствующих зон ВОЗ (линеаменты на рисунке 1).

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 приведены фрагменты интегральных (кумулятивных) функций вероятностей не превышения интенсивностями сотрясений различных уровней за время экспозиции 50 лет ($P_{50}[I_{ст} \leq i]$), рассчитанные для разных исследуемых участков и для разных версий моделей зон ВОЗ и повторяемости землетрясений (модели ОСР, ДСР-1 и ДСР-2).

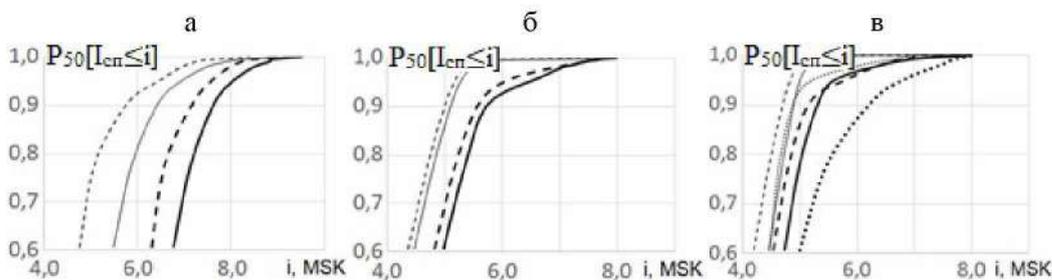


Рис. 4. Фрагменты графиков функций распределения вероятностей ($P_{50}[I_{cn} \leq i]$), рассчитанных для «мягких» (толстые линии) и «твердых» (тонкие линии) грунтов на участках: а – г. Владикавказ (сплошные линии) и г. Моздок (пунктир); б и в – г. Ставрополь и ст. Кавказская, соответственно, где сплошная, пунктир и точечная линии – для моделей ОСР, ДСР-1 и ДСР-2, соответственно / Fig. 4. Fragments of graphs of probability distribution functions ($P_{50}[I_{sp} \leq i]$) calculated for “soft” (thick lines) and “hard” (thin lines) soils in the sections: “a” – Vladikavkaz (solid lines) and Mozdok (stipple line); “b” and “c” – Stavropol and the Caucasian vill., accordingly, where the solid, stipple line and dotted line are for the GSZ, DSZ-1 and DSZ-2 models, respectively.

Прим.: а-а; б-б; в-в.

На рисунке 5 приведены результаты выполненных для рассматриваемых участков оценок разностей между интегральными (кумулятивными) интенсивностями сотрясений «мягких» и «твердых» грунтов (ΔI_{cn}) или, как еще говорят «приращений балльности» «мягких» грунтов по сравнению с «твердыми» при землетрясениях с разными средними периодами повторяемости. Данные рисунка показывают значительную вариабельность значений ΔI_{cn} для всех рассматриваемых участков. При этом в пределах каждого из участков есть свой разброс оценок ΔI_{cn} в зависимости от заложенных в расчеты моделей зон ВОЗ и повторяемостей землетрясений и величины t . Характер этих зависимостей на разных участках также различный. Так, например, значения ΔI_{cn} на участках в районах гг. Владикавказ и Моздок уменьшаются по мере увеличения среднего периода повторяемости землетрясений, а на участке г. Ставрополя и ст. Кавказская для моделей ОСР и ДСР-1, наоборот, увеличиваются. Для моделей ДСР-2 на том же участке ст. Кавказская, характер изменения ΔI_{cn} еще более сложный – сначала при возрастании t от 100 до 1000 лет наблюдается рост величины ΔI_{cn} , затем до значений $t \approx 5000$ лет, наоборот спад, после чего значения ΔI_{cn} стабилизируются. Амплитуда колебаний ΔI_{cn} для разных участков также может меняться – от $\sim 0,5$ баллов MSK для г. Владикавказа, до $\sim 1,8$ баллов MSK для г. Ставрополя. В целом по всем участкам и по всем расчетным моделям в диапазоне $t = 100-10000$ лет оценки ΔI_{cn} варьируют в пределах 0,28–2,13 балла MSK. Для диапазона, который отражен на отечественных картах ОСР $t = 500-5000$ лет оценки ΔI_{cn} меняются от 0,43 до 1,96 балла MSK.

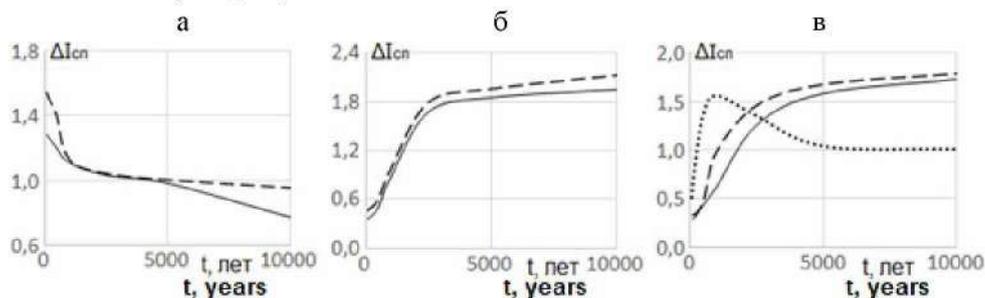


Рис. 5. Разности между интегральными (кумулятивными) интенсивностями сотрясений «мягких» и «твердых» грунтов (ΔI_{cn}), для землетрясений с разными t в районах: а – г. Владикавказ

(сплошная линия) и Моздок (пунктир); б и в – г. Ставрополь и ст. Кавказская, соответственно, где сплошные, пунктирные и точечные линии – оценки для моделей ОСР, ДСР-1 и ДСР-2; ΔI_{sp} в баллах MSK /

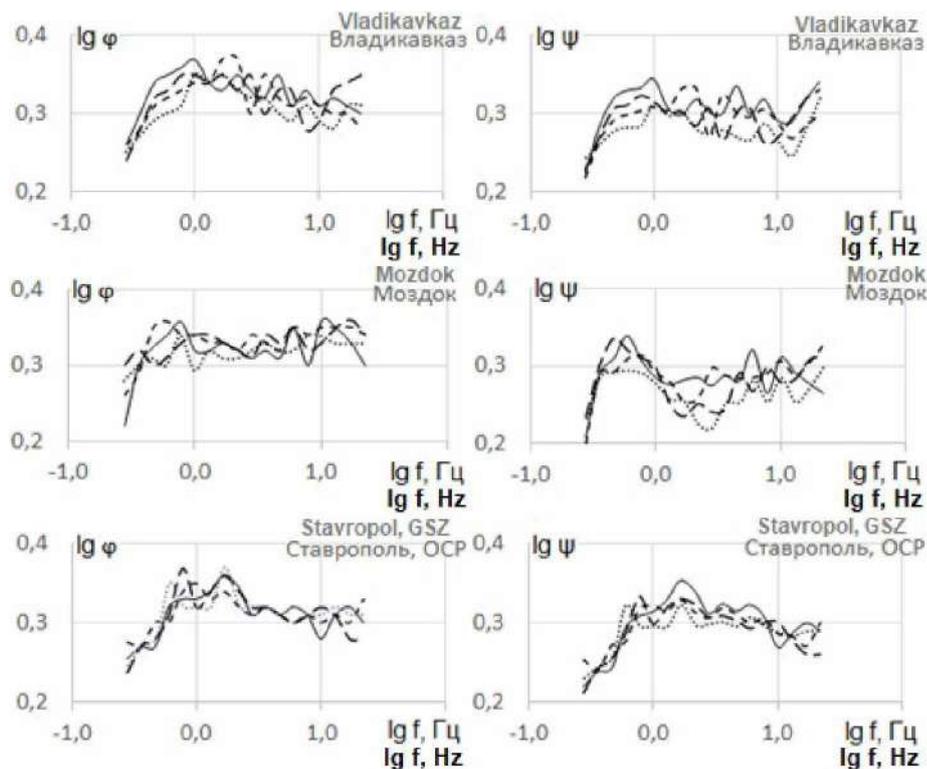
Fig. 5. Differences between the integral (cumulative) intensities of "soft" and "hard" soils (ΔI_{sp}), for earthquakes with different t in the areas: "a" – Vladikavkaz (solid line) and Mozdok (stippled line); "b" and "c" – Stavropol and Kavkazskaya vill., accordingly, where solid, stippled line and dotted line – estimates for the GSZ, DSZ-1 and DSZ-2; ΔI_{sp} models in MSK's score.

Прим.: а–а; б–б; в–в.

На рисунке 6 показаны полученные для разных участков, моделей и t оценки $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, рассчитанные по интегральным спектрам Фурье и спектрам реакции «мягких» и «твердых» грунтов.

Из рисунка видно, что так же, как и приращения балльности спектральные отношения, хотя и в несколько меньшей степени, но все же значительно (до 60%), флуктуируют в зависимости от пространственно-энергетических и временных параметров окружающего рассматриваемый участок сейсмогенерирующего пространства. О величине этих флуктуаций удобнее судить по рисунку 7, где $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ обобщены в виде отдельных значений на 18-ти фиксированных частотах, без разделения на участки, модели и средние периоды повторяемости.

Таким образом, результаты настоящих исследований, проведенных уже по отношению к разным территориям, с разной сеймотектонической обстановкой и сейсмическим режимом, подтверждают полученные нами ранее данные о том, что «сейсмические свойства» одного и того же типа грунта, т.е. его характеристики, влияющие на уровень сейсмической опасности в данной точке, не являются неким его постоянным качеством, а меняются от места к месту. Изменения эти связаны с изменяющимися по отношению к расчетной точке «очаговыми» факторами – расположением зон ВОЗ, сейсмическим режимом, глубинами и ориентацией очагов и др.



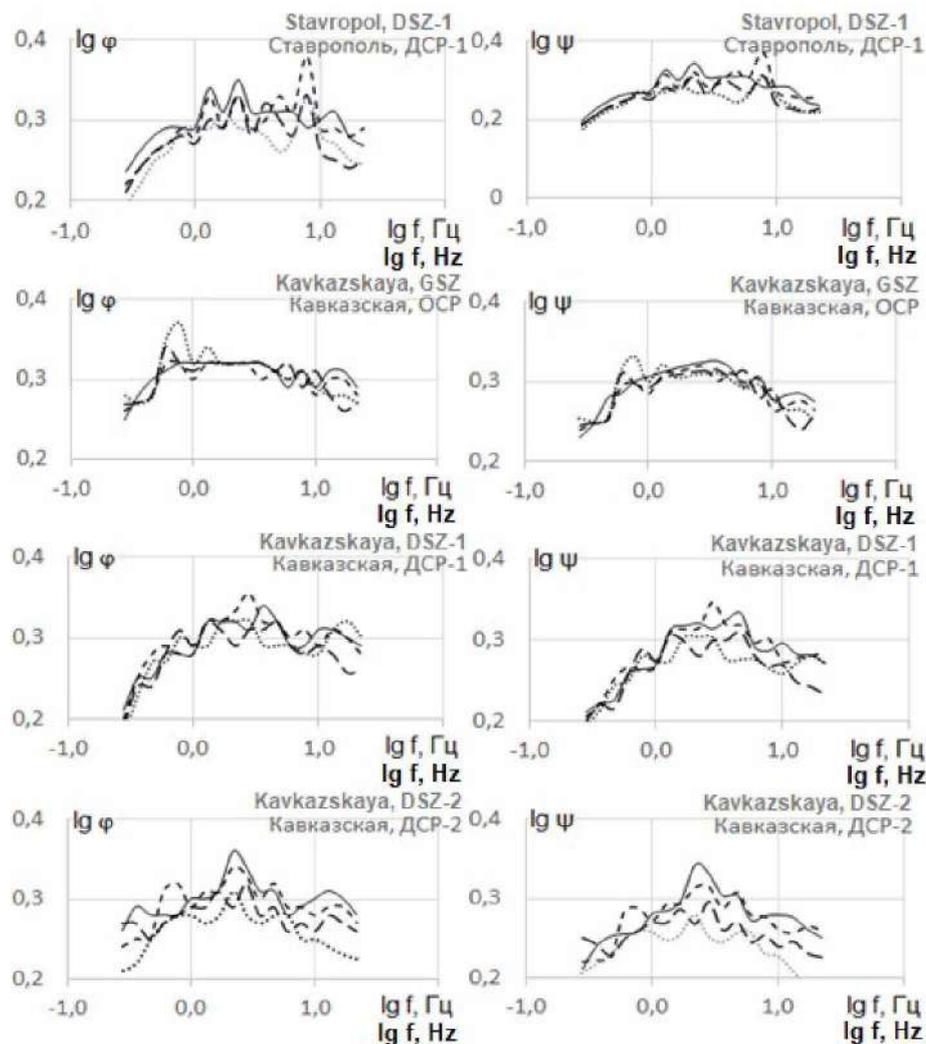


Рис. 6. Интегральные спектральные характеристики $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, где сплошная, короткий пунктир, длинный пунктир и точечная линии – оценки для $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет, соответственно /
 Fig. 6. Integral spectral characteristics $\varphi(f)$ and $\psi(f)$, where solid, short stipple line, long stipple line and dotted line are estimates for $t=500, 1000, 2500$ and 5000 years, accordingly.

В принципе, вышеописанные опыты, моделируют ситуации, возникающие при ОСР, ДСР или СМР, в том смысле, что оценки опасности производятся в местах с совершенно разными сочетаниями «очаговых» факторов, которые для каждой точки, вообще говоря, являются уникальными. Поэтому, проецируя вышеописанные результаты на обычную отечественную практику количественных оценок сейсмической опасности, можно заключить, что, разделяя единую цепочку природных факторов, формирующих интегральную картину сейсмических воздействий, наблюдаемых на поверхности на «очаговую» и «грунтовую» составляющие, мы рискуем получить искажения реальности. И искажения эти могут быть весьма значительными. Так, как показывает, например рисунок 5, размах флуктуаций величин $\Delta I_{\text{сн}}$ может превышать 2 балла MSK, в то время, как нормативы (и вообще, имеющийся в данной области консенсус) предполагают, что при переходе от грунтов I категории СНиП по сейсмическим свойствам к грунтам II категории, изменение интенсивности сотрясений составляет $\Delta I=1$ балл MSK. Т.е. ошибка определения величины более чем в два раза может превосходить саму величину. Ситуация может

усугубляться еще и тем, что увеличение ошибки в определении ΔI может возрастать при увеличении значений t (см. рисунок 5). Так, например, увеличение средних периодов повторяемости землетрясений требуется при расчете сейсмических воздействий для ответственных и особо ответственных объектов. То есть там, где требуется повышенная точность оценок она, наоборот, может снижаться.

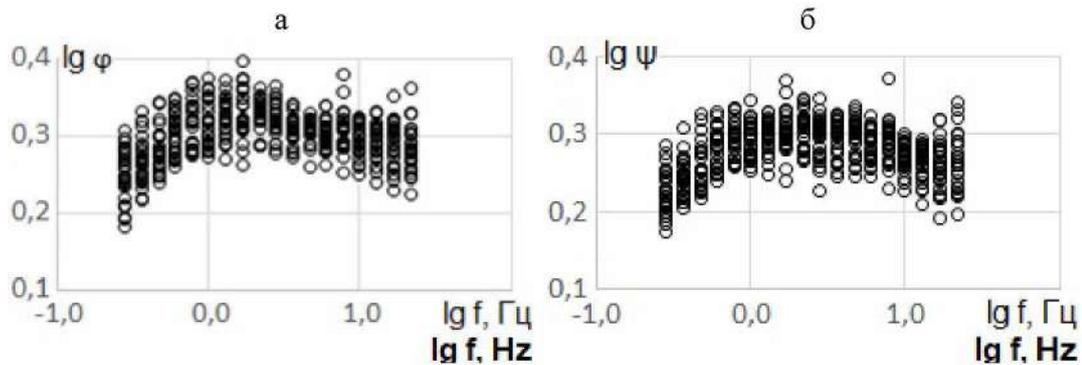


Рис. 7. Отношения $|S|_{\text{мяг}}/|S|_{\text{ме}}$ (а) и $SA_{\text{мяг}}/SA_{\text{ме}}$ (б) на разных частотах (f).
Обобщение данных, полученных для разных участков, моделей локальной сейсмичности и величины t /

Fig. 7. The relations of $|S|_{\text{soft}}/|S|_{\text{hard}}$ ("a") and $SA_{\text{soft}}/SA_{\text{hard}}$ ("b") at different frequencies (f).
Generalization of data received for different sites, models of local seismicity and parameter t
Прим.: а–а; б–б.

Здесь следует сразу сказать, что хотя полученные в настоящем исследовании результаты и базируются на расширенном экспериментальном материале (что повышает их надежность и реалистичность), они не являются окончательными. Учитывая важность рассматриваемых вопросов и, в особенности, практическую сложность их возможных решений, здесь еще требуются дополнительные проработки. Так, например, в наших предыдущих работах (см., например, [Чернов и др., 2022]) указывалось, что используемые в расчетах модели СДГ являются предварительными и их параметры по мере уточнения могут корректироваться. Насколько эти возможные корректировки могут отражаться на конечных вероятностных оценках предстоит еще выяснить.

Тем не менее уже сейчас накапливаются аргументы, говорящие о необходимости обратить на данную проблему больше внимания и одновременно подумать о возможных ее решениях.

Одно из таких решений – переход от старого, основанного на «двухступенчатых» расчетных схемах подхода к новому, «одноступенчатому», подобному тому который применен в настоящей работе. С точки зрения самого подхода – здесь все понятно и больших вопросов нет. Вопросы есть в том, как его вмонтировать в уже сложившуюся и вполне адекватную, с точки зрения наличия в ней трех уровней – ОСР, ДСР и СМР, систему. Представляется, что наиболее просто это можно было бы реализовать на уровне ОСР и ДСР, введя (сходно с тем, как это сделано в настоящем исследовании) в расчеты вместо одной модели СДГ для «среднего» грунта, например четыре «среднестатистических» модели для грунтов, соответствующих I, II, III и IV категории СНиП по «сейсмическим» свойствам. В итоге будут получены не три карты ОСР или ДСР для вероятностей не превышения $P_{50}[X \leq x] = 0,90, 0,95$ и $0,99$, а двенадцать карт (по четыре для каждого уровня вероятности), более

корректно учитывающие «грунтовый» фактор. Такое усложнение работы при ОСР или ДСР пока не кажется слишком большой ценой за ожидаемое приближение новых оценок к реальности. Уточняющие же функции ДСР, по-прежнему могут реализовываться за счет более точного и подробного, чем при ОСР, учета «очаговых» факторов. При ДСР можно было бы также получить дополнительное уточнение оценок, разработав уже не «среднестатистические», а «региональные» модели СДГ для каждого из четырех вышеуказанных типов грунта. Но это уже более сложная задача, которая, пока, по-видимому, может решаться в индивидуальном порядке.

В еще большей степени задача перехода на «одноступенчатую» схему вероятностных расчетов усложняется для СМР, где главным ресурсом для уточнения оценок опасности является учет именно разнообразных реакций местных грунтов. Создание моделей, в достаточной степени отражающих это многообразие обычными статистическими методами представляется проблематичным. Возможно, решения найдутся на основе методов численного моделирования, например создавая (и затем объединяя) большие количества (сотни, тысячи или более) вариантов оценок реакции данного грунтового комплекса при разных фиксированных условиях для входного сейсмического сигнала (углы и направление подхода, спектр и др.), которые, в свою очередь, будут определяться наличествующими в данном месте «очаговыми» факторами.

Выводы

1. Оценки PSNA, выполненные для участков с разными сейсмогеологическими условиями, показывают, что во всех случаях в соотношениях между параметрами колебаний «мягких» и «твердых» грунтов наблюдается значительная вариабельность, что, по-видимому свидетельствует о том, что вариабельность оценок такого рода является их общим свойством, и, поэтому, ее учет может повысить качество прогнозных оценок в целом.

2. Одним из путей вышеозначенного повышения качества вероятностных оценок сейсмической опасности могла бы быть замена преобладающей в российской практике «двухступенчатой» схемы расчетов новой «одноступенчатой». С наименьшими издержками и одновременно с наибольшими положительными эффектами такая замена, в реальных условиях могла бы начаться с оценок уровня ОСР.

3. Учитывая сложность и многогранность поднимаемых в статье вопросов, приведенные в ней результаты и соображения не являются прямой рекомендацией к использованию, а носят текущий информативный характер. В более завершенном виде такие рекомендации могут появиться позднее, после проведения дальнейших исследований, в процессе которых могут появиться существенные дополнения и уточнения.

Литература

1. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск. 1997. – 340 с.
2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М. Наука. – 2009. – 349 с.
3. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.

4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
5. Завьялов А.Д., Перетокин С.А., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Акатова К.Н. Общее сейсмическое районирование от карт ОСР-97 к ОСР-2016 и картам нового поколения в параметрах физических характеристик среды на сейсмический эффект сильных землетрясений. // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2018. – Т. 46. №4. – С. 47–68.
6. Касымов С.М. Инженерно-геологическая основа детального сейсмического районирования и микрорайонирования. Изд-во «Фан» УзССР. Ташкент. – 1979. – 224с.
7. Куруоглы М., Эскисар Т. Влияние локальных грунтовых условий на динамический грунтовый отклик на южном побережье залива Измир, Турция. // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56. № 8. – С. 1530–1544.
8. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат. 1962. – 284 с.
9. Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Фидарова М.И., Мерзликин Т.И., Персаева З.В. Влияние нелинейных свойств. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 72-84. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006.
10. 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.40–121.
11. Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска. Пособие для должностных лиц РАН. Объединенный институт физики Земли. 1997. – Москва. – 54с.
12. Сейсмическое микрорайонирование. / Под ред. С.В. Медведева. М.: Наука. 1977. – 248 с.
13. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Отв. ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. – М.: Наука, 1980. – 307 с.
14. Составление карты детального сейсмического районирования Ставропольского края. – I–6. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 1999.
15. Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Милановский С.Ю., Несынов В.В. Оценка сейсмических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов при решении задач сейсмического микрорайонирования. // *Геоэкология*. – 2019. – №5. – С. 74–81.
16. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсmobезопасность России». // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2012. – Т. 39. № 1. – С. 5–38.
17. Чернов Ю.К. Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. Т. 11. № 2. – С. 87–102. DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007.
18. Чернов Ю.К., Заалишвили В.Б., Чернов А.Ю. Некоторые новые данные о влиянии грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 85–100 DOI:10.46698/VNC.2022.32.20.007.
19. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // *Вопросы инженерной сейсмологии*. Вып. 34. М.: Наука. – 1993. С. 5–94.
20. Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // *Bull. Earthq. Eng.* – 2014. – Vol. 12. No. 1. – pp. 359–387. DOI:10.1007/s10518-013-9461-4.
21. Bozorgnia Y., Abrahamson N, Al Atik L, et. al. NGA-West2 Research Project. // *Earthquake Spectra*: August 2014. – Vol. 30. No. 3. – 2014. – pp. 973-987.
22. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2015. – Vol. 105. – pp. 1476–1490.

23. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. // *Journal of Seismology*. – 2006. – V. 10. – pp. 137–156.
24. Fäh D. et al. Coupled seismogenic geohazards in Alpine regions. // *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*. – 2012. – Vol. 53. Issue 4.
25. Mahmood A., Feezan Ahmad, Jiandong Huang, Muhammad Junaid Iqbal, Muhammad Safdar, Nima Pirhadi. Probabilistic evaluation of CPT-based seismic soil liquefaction potential: towards the integration of interpretive structural modeling and bayesian belief network[J]. // *Mathematical Biosciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 18. No. 6. – pp. 9233-9252. DOI: 10.3934/mbe.2021454.
26. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // *Annali di Geofisica*. – 1999. – Vol. 42. N 6. – 1232 p.
27. Vakov A.V. Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism. // *Tectonophysics*. – 1996. V. 261. Issue 1–3. – pp. 97–113. DOI:10.1016/0040-1951(96)82672-2.
28. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // *Bull. Seim. Soc. Am.* – 1994. –Vol. 84. №4 – pp. 974-1002.
29. Zumpano V., Pisano L., Filice F., Ugenti A., de Lucia D., Wasowski J., Santaloia F., Lollino P. Regional-Scale Seismic Liquefaction Susceptibility Mapping via an Empirical Approach Validated by Site-Specific Analyses. // *Geosciences*. – 2022. Vol. 12. 215 p.

References

1. Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Volume VI. Problems of seismic hazard in the Far Eastern region. Yuzhno-Sakhalinsk. 1997. 340 p. (in Russ.)
2. Zaalishvili V.B. Seismic microzoning of territories of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka. 2009. 349 p. (in Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikini T.I. Nonlinear vibrations of the soil column according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006. (in Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field of the day surface. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (in Russ.)
5. Zavyalov A.D., Peretokin S.A., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Akatova K.N. General seismic zoning from GSZ-97 to GSZ-2016 maps and new generation maps in the parameters of physical characteristics of the environment for the seismic effect of strong earthquakes. *Questions of engineering seismology*. 2018. Vol. 46. No. 4. pp. 47–68. (in Russ.)
6. Kasymov S.M. Engineering-geological basis of detailed seismic zoning and microzoning. Publishing house. Fan. UzSSR. Tashkent. 1979. 224 p. (in Russ.)
7. Kuruogly M., Eskisar T. Influence of local soil conditions on dynamic ground response on the southern coast of Izmir Bay, Turkey. *Geology and Geophysics*. 2015. Vol. 56. No. 8. pp. 1530–1544. (in Russ.)
8. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (in Russ.)
9. Melkov D.A., Gabaraev A.F., Fidarova M.I., Merzlikin T.I., Persaeva Z.V. Influence of nonlinear properties. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 72–84 DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006. (in Russ.)
10. General seismic zoning of the territory of the Russian Federation. Explanatory note to the set of maps OSR-2016 and a list of settlements located in seismically active zones. *Engineering surveys*. 2016. No. 7. pp. 40–121. (in Russ.)
11. Assessment of seismic hazard and seismic risk. Manual for public officials. Russian Academy of Sciences. United Institute of Physics of the Earth. Moscow. 54 p. (in Russ.)

12. Seismic microzoning. Edited by S.V. Medvedev. Moscow. Nauka. 1977. 248 p. (in Russ.)
13. Seismic zoning of the territory of the USSR. Methodological foundations and regional description of the map of 1978. Ed. V.I. Bune, G.P. Gorshkov. Moscow. Nauka. 1980. 307 p. (in Russ.)
14. Preparation of the map of detailed seismic zoning of the Stavropol Territory. 1–6. Moscow. Publishing House of the IFZ RAS. 1999. (in Russ.)
15. Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Milanovsky S.Yu., Nesynov V.V. Assessment of seismic properties of water-saturated dispersed soils in solving problems of seismic microzoning. *Geoecology*. 2019. No. 5. pp. 74–81. (in Russ.)
16. Ulomov V.I. Updating of normative seismic zoning as part of the united information system “Seismic safety of Russia”. *Questions of engineering seismology*. 2012. Vol. 39. No. 1. pp. 5–38. (in Russ.)
17. Chernov Yu.K. Experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic impacts on the territory of the Russian Federation. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 87–102. DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007. (in Russ.)
18. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A. Yu. Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 85–100 DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007. (in Russ.)
19. Steinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F., etc. *Methods of seismic impact assessment (manual)*. *Questions of engineering seismology*. Issue 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5–94. (in Russ.)
20. Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull. Earthq. Eng.* 2014. Vol. 12. No. 1. pp. 359–387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
21. Bozorgnia Y., Abrahamson N, Al Atik L, et. al. NGA-West2 Research Project. *Earthquake Spectra*: August 2014. Vol. 30. No. 3. pp. 973-987.
22. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105. pp. 1476–1490.
23. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*. 2006. Vol. 10. pp. 137–156.
24. Fäh D. et al. Coupled seismogenic geohazards in Alpine regions. *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*. 2012. Vol. 53. Issue 4.
25. Mahmood A., Feezan Ahmad, Jiandong Huang, Muhammad Junaid Iqbal, Muhammad Safdar, Nima Pirhadi. Probabilistic evaluation of CPT-based seismic soil liquefaction potential: towards the integration of interpretive structural modeling and bayesian belief network[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2021. Vol. 18. No. 6. pp. 9233–9252. DOI: 10.3934/mbe.2021454.
26. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. *Annali di Geofisica*. 1999. Vol. 42. No 6. 1232 p.
27. Vakov A.V. Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism. *Tectonophysics*. 1996. Vol. 261. Issue 1–3. pp. 97-113. DOI: 10.1016/0040-1951(96)82672-2.
28. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seim. Soc. Am.* 1994. Vol. 84. No 4. pp. 974–1002.
29. Zumpano V., Pisano L., Filice F., Ugenti A., de Lucia D., Wasowski J., Santaloia F., Lollino P. Regional-Scale Seismic Liquefaction Susceptibility Mapping via an Empirical Approach Validated by Site-Specific Analyses. *Geosciences*. 2022. Vol. 12. 215 p.

УДК 550.34+550.341+550.343

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

Оригинальная статья

Модель очаговой зоны землетрясения и прогноз параметров сильных движений грунта

О.О. Эртелева , Ф.Ф. Аптикаев 

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

Статья поступила: 04.08.2023, доработана: 17.11.2023, принята к публикации: 29.11.2023

Резюме: Актуальность работы. Прогноз количественных параметров сейсмического движения грунта, основанный на исследованиях сильных движений грунта – заключительная часть комплекса работ, по оценке сейсмической опасности любой территории. В то же время результаты исследований процессов генерации и распространения сейсмических волн в ближней зоне землетрясений имеют большое значение для физики очага землетрясения, являясь основой для построения адекватной модели очага и происходящих в нем процессов. Закономерности распространения сейсмического волнового поля выражаются в уравнениях связи параметров сейсмических колебаний с характеристиками очага и среды. Эти уравнения могут быть получены как исходя из теоретических положений, имеющихся в современной сейсмологической науке, так и из анализа накопленных данных по сильным движениям грунта. Не требует доказательства, что взаимопроникновение этих двух методов является наиболее плодотворным для развития научного прогресса. Тенденция последних десятилетий при разработке уравнений для прогноза параметров сильных движений грунта – выделение в волновом поле нескольких зон с различными зависимостями от параметров среды и очага. Прогнозные соотношения, получаемые с использованием такого метода, отличает уменьшение разброса оценок параметров колебаний и соответствие эмпирическим данным. При обработке статистических данных с использованием теории размерности и подобия установлено, что в поле сейсмических волн существуют подобные расстояния, на которых величины параметров колебаний подобны. Иными словами, существуют законы масштабирования параметров сейсмических движений грунта. Аналогичное утверждение можно найти и в теоретических работах, посвященных генерации сейсмических волн очагом землетрясения. **Цель работы** – используя теоретические положения о процессах в очаговой области, установить законы генерации и распространения параметров сильных движений грунта с учетом эмпирических данных, разработать модель очаговой области, не противоречащую эмпирическим данным, определить размеры очаговой области землетрясения. **Методы исследования** – статистический анализ эмпирических данных по сильным движениям грунта. **Результаты работы** – предложены уравнения затухания для амплитуд пиковых ускорений грунта в разломной, ближней и дальней зонах; прогнозные уравнения для преобладающих периодов и продолжительности колебаний сильных движений грунта; оценены размеры очаговой области землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, очаг, параметры сейсмических колебаний, разломная зона, ближняя зона, дальняя зона, подобные расстояния, затухание.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ИФЗ РАН.

Для цитирования: Эртелева О.О., Аптикаев Ф.Ф. Модель очаговой зоны землетрясения и прогноз параметров сильных движений грунта. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 71-84. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

Original paper

Earthquake source zone model and prediction of strong ground motion parameters

O.O. Erteleva^{ID}, F.F. Aptikaev^{ID}

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

Received: 04.08.2023, revised: 17.11.2023, accepted: 29.11.2023

Abstract: Relevance. Prediction of quantitative parameters of seismic ground motion, based on studies of strong ground motion records, is the final part of the set of works on the seismic hazard assessment of any territory. At the same time, the results of studying the processes of seismic wave's generation and propagation in the near zones of earthquakes are of great importance for the physics of the earthquake source, being the basis for constructing an adequate model of the source and the processes occurring in it. The regularities of propagation of a seismic wave field are expressed in the equations of connection between the parameters of seismic vibrations and the characteristics of the source and the medium. These equations can be obtained both from the theoretical positions available in today's seismological science, and from the analysis of accumulated data on strong ground motion records. It does not require proof that the interpenetration of these two methods is the most fruitful for the development of scientific progress. The trend of recent decades in the development of equations for predicting the parameters of strong ground motions is the identification of several zones in the wave field with different dependences on the parameters of the medium and source. The predictive ratios obtained using this method are distinguished by a decrease in the scatter of estimates of the fluctuation parameters and compliance with empirical data. When processing statistical data using the theory of dimension and similarity, it was found that in the field of seismic waves there are similar distances at which the values of the vibration parameters are similar. In other words, there are laws for scaling the parameters of seismic ground motion. A similar statement can be found in theoretical works devoted to the generation of seismic waves by an earthquake source. **The aim of the work** is – using theoretical provisions on processes in the source area, to establish the laws of generation and propagation of parameters of strong ground movements, taking into account empirical data, to develop a model of the source area that does not contradict empirical data, to determine the size of the earthquake source area. **Research methods** – statistical analysis of empirical data on strong ground motion. **Results of the work** – attenuation equations for the amplitudes of peak ground accelerations in the fault, near- and far-field zones are proposed; predictive equations for the prevailing periods and duration of vibration of strong ground motion; the sizes of the source area of the earthquake were estimated.

Keywords: earthquake, source, parameters of seismic vibrations, fault zone, near-field zone, far-field zone, similar distances, attenuation.

Acknowledgements: *The work was carried out according to the state task of the IPE RAS/*

For citation: Erteleva O.O., Aptikaev F.F. Earthquake source zone model and prediction of strong ground motion parameters. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 71-84. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

Введение

Из физики известно, что движение любой механической системы описывается тремя параметрами, имеющими размерность массы, пространства и времени. В сейсмологии на основании трех величин, имеющих эти размерности, определяются всевозможные другие характеристики сейсмического движения грунта: смещение,

скорость, ускорение, спектр, продолжительность колебаний и т.д. Для прогноза сейсмических воздействий в инженерной сейсмологии важно знать, как изменяются параметры колебаний грунта с изменением магнитуды, являющейся энергетической характеристикой сейсмических источников. Согласно теории размерностей и подобия, логарифмы всех параметров изменяются пропорционально логарифму энергии [Седов, 1978]. На практике условия подобия не всегда выполнимы, например, масса горных пород в очаге землетрясения остается постоянной, независимо от магнитуды. В таких случаях некоторые параметры будут изменяться по иным законам, которые можно оценить как по теоретическим закономерностям, так и по эмпирическим данным.

Очевиден тот факт, что магнитуда землетрясения и расстояние являются главными факторами, определяющими численное значение параметров колебаний грунта. К настоящему времени разработаны многочисленные уравнения, описывающие процесс генерации и распространения сейсмических волн [Graizer, Kalkan, 2016; Zuccolo et al., 2017; Коновалов и др., 2018; Stafford, 2019; Jaimes, Garsia-Soto, 2020; Gao et al., 2021; Bommer et al., 2022; Фидарова и др., 2023 и др.].

В попытке повысить точность прогноза, кроме магнитуды и расстояния, рассматриваются и другие факторы – грунтовые условия, механизм очага, особенности пути распространения колебаний и т.д. Современные уравнения затухания амплитуд ускорений насчитывают до 10 и более членов [Campbell, 1997; Stafford, 2019; Phung et al., 2020; Boore et al., 2021; Bommer et al., 2022; Keshri, Mohanty, 2023]. Однако, как известно, далеко не всегда сложные зависимости ведут к повышению точности получаемых результатов: оценки каждого члена ведут к накоплению погрешности расчетов за счет естественной неточности входных данных. Указанная проблема характеризуется в терминах эпистемической и алеаторной ошибок результата.

Одним из путей повышения точности прогнозных расчетов количественных характеристик сейсмических колебаний является выделение в волновом поле распространяющихся сейсмических волн нескольких зон, каждая из которых обладает своими зависимостями параметров от магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий. Накопленные многочисленные эмпирические данные подтверждают высказанное рядом исследователей [Trifunac, 1976; Artikaev, Kornichev, 1980] утверждение о том, что затухание амплитуд в ближней и дальней зонах описывается различными законами. При составлении карты ДСР Ставропольского края (ИФЗ, 1996), в работах [Artikaev, Erteleva, 2007; Graizer, Kalkan, 2007] вблизи разлома выделена еще одна зона – разломная, в которой при удалении от разлома амплитуды колебательного движения не уменьшаются, а, наоборот, возрастают. Подобное явление отмечалось в разных регионах, например, при Газлийском землетрясении [Газлийские землетрясения..., 1986; Чернов, 1989], в Греции [Skarlatoudis et al., 2013], на Северном Кавказе [Чернов и др., 2019] и др. Однако, ему либо не придавалось значения, либо оно считалось ошибкой измерения расстояний.

При статистической обработке представительного количества (иногда более тысячи) реальных акселерограмм установлено [Артикаев, 2012], что кривые затухания амплитуд ускорений масштабируются сдвигом по оси расстояний, а не по уровню, как это следует из определения понятия магнитуды. При этом эмпирический закон масштабирования описывается соотношением:

$$\partial(\lg R) / \partial M = 0.33. \quad (1)$$

При этом, подобные амплитуды находятся на подобных (или приведенных (нормированных) к некоему значению R , соответствующему значению магнитуды M) расстояниях R^* , которые в соответствии с формулой (1) определяются соотношением:

$$\lg R^* = \lg R - 0.33 M. \quad (2)$$

В то же время, согласно теории размерности и подобия [Седов, 1987], подобные расстояния R^* определяются в соответствии с энергией источника E :

$$\lg R^* = \lg R - E / 3. \quad (3)$$

Как видим, эмпирический (2) и теоретический (3) законы масштабирования вполне согласуются, однако, по определению, магнитуда и энергия имеют различные размерности. Но при исследованиях зависимости параметров сейсмических колебаний от магнитуды и веса взрывчатых веществ было обнаружено, что магнитуда по поверхностным волнам M пропорциональна весу заряда [Аптикаев, 2012; Ляхов, 1964]. Несоответствие размерностей магнитуды и энергии возникло потому, что определение магнитуды противоречит правилам теории размерностей и подобия: референтное расстояние 100 км выбрано постоянным, независимым от энергии сейсмического источника. Такой выбор был обусловлен тем, чтобы флуктуации амплитуды с расстоянием не зависели от магнитуды и определялись только строением среды. Итак, магнитуда может рассматриваться в качестве энергии источника E .

Тогда закон масштабирования амплитуд сильных движений грунта, описываемый уравнением (3), может быть записан в виде:

$$\lg R^* = \lg R - M / 3. \quad (4)$$

Правило нормирования расстояний, описываемое уравнением (4), вполне согласуется с оценками аналогичных коэффициентов, полученными другими авторами с использованием других методов (см., например, [Садовский и др., 1983; Wells, Coppersmith, 1994]).

Использованные данные

В работе использованы данные о параметрах сильных движений грунта при сейсмических событиях из разных регионов мира с различными механизмами очага, магнитудами, расстояниями и грунтовыми условиями в пунктах регистрации. Магнитуды рассмотренных землетрясений находятся в интервале $2 \leq M_S \leq 8$, эпицентральные расстояния – до 175 км, кратчайшие расстояния до плоскости разрыва – от 0.01 км до 100 км; классификация грунтов по сейсмическим свойствам согласно нормам СП 14.13330.2018.

Методика обработки данных

При обработке имеющихся данных использовались принципы параметризации записей землетрясений, приведенные в работе [Аптикаев, 2012]:

- 1) Параметры должны отражать основные черты изучаемого процесса, в данном случае важные с точки зрения расчетов на сейсмостойкость.
- 2) Параметры должны быть попарно независимыми в том смысле, что изменение при расчетах величины одного из параметров не должно вызывать изменения значений других параметров.

Выбранные таким образом параметры называют основными. В качестве таких приняты величины пикового ускорения, преобладающий период и продолжительность колебаний. Ширина импульса, являющаяся мерой продолжительности колебаний, определяется как интервал времени, в течение которого амплитуда огибающей превышает половину величины максимальной амплитуды записи.

По каждой записи оцениваются пиковое ускорение грунта и ширина импульса колебаний. Кроме того, для каждой из имеющихся записей рассчитывается спектр реакции, по которому определяется преобладающий период.

Чтобы учесть влияние таких факторов как механизм очага и тип грунта, данные разделяются на группы по механизмам очага и категориям грунта. В каждой образовавшейся группе отдельно исследуются распределения параметров распространяющихся сейсмических колебаний – строятся аппроксимирующие прямые. На заключительном этапе корреляционные соотношения, установленные для отдельных групп данных, анализируются для выявления влияния типа механизма очага и типа грунта на закономерности изменения характеристик сейсмического волнового фронта с расстоянием от разлома. Одновременно для всех исследуемых параметров определяются соответствующие стандартные отклонения.

Подробное описание данной системы параметров и эмпирического метода интересующийся читатель может найти, например, в монографии [Аптикаев, 2012].

В расчетах использовались приведенные расстояния, определяемые по формуле (4). В результате было установлено, что в каждой зоне, разломной, ближней и дальней, имеют место различные законы зависимости параметров сейсмических колебаний грунта от расстояния, механизма очага и грунтовых условий. Полученные результаты в графическом виде показаны на рисунке 1.

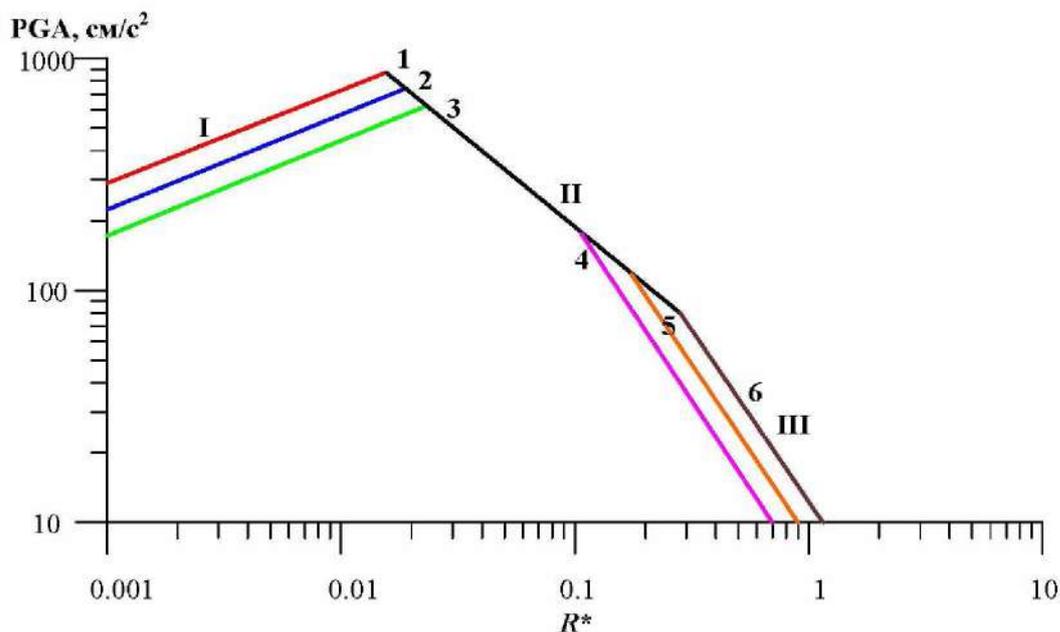


Рис. 1. Закон затухания амплитуд пиковых ускорений грунта (PGA). Условные обозначения:

I – разломная зона, II – ближняя зона, III – дальняя зона; 1 – взброс, 2 – сдвиг,

3 – сброс, 4 – грунты 1 категории, 5 – грунты 2 категории, 6 – грунты 3 и 4 категорий /

Fig. 1 – PGA attenuation law. Legend: I – fault zone; II – near-field zone, III – far-field zone;

1 – thrust, 2 – strike-slip, 3 – normal fault, 4 – grounds of 1 category (rock), 5 – grounds of 2 category (intermediate grounds), 6 – grounds of 3 and 4 categories (soft grounds)

Ускорения в разломной зоне.

Чтобы упростить расчеты, наименьшее приведенное расстояние было принято равным $\lg R_0^* = -3.000$. Для $M = 6$ этому значению соответствует 0.1 км. Распределение данных показывает, что возрастание амплитуд происходит до приведенного расстояния R_k^* – границы разломной и ближней зон. Пиковые ускорения на этой границе достигают максимального значения. По эмпирическим данным результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Ускорения в разломной зоне /
Peak ground accelerations in the fault zone**

Механизм очага / Focal mechanism	$\lg R_0^*$	PGA_0 , см/с ²	$\lg R_k^*$	$PGA_{\text{макс}}$, см/с ²
Взброс / thrust	-3.000	290	-1.808	868
Сдвиг / strike-slip	-3.000	223	-1.733	735
Сброс / normal	-3.000	172	-1.638	622

В таблице 1 R_0^* – начальное значение приведенного расстояния, R_k^* – конечное значение приведенного расстояния (граница разломной и ближней зон).

Ускорения вычисляются по формуле:

$$\lg PGA = \lg PGA_0 + 0.4 \lg R^* + 1.2 \pm 0.20. \quad (5)$$

Здесь и далее все приведенные оценки относятся к наибольшей амплитуде на горизонтальной компоненте.

Ускорения в разломной зоне зависят от механизма очага и не зависят от грунтовых условий. Резонансные явления, связанные с грунтами, практически отсутствуют.

Ускорения в ближней зоне.

В соседней с разломной ближней зоне ускорения уже затухают по степени 0.63. Процесс затухания ускорений PGA описывается весьма простым уравнением:

$$\lg PGA = 1.8 - 0.63 \lg R^* \pm 0.20 \quad (6)$$

При этом, амплитуды не зависят ни от механизма очага, ни от грунтовых условий. Резонансные явления, связанные с грунтами, практически отсутствуют.

Ускорения в дальней зоне.

Для этой зоны характерно возрастание затухания амплитуд колебаний (см., рисунок 1). В дальней зоне грунтовые условия влияют на уровень амплитуды и на другие параметры сейсмических колебаний. Эмпирические данные аппроксимируются уравнением:

$$\lg PGA = C_z - 1.4 \lg R^* \pm 0.20, \quad (7)$$

где C_z – коэффициент, зависящий от типа грунта в точке наблюдения: для грунтов 1-й категории $C_z = 0.748$, для грунтов 2-й категории $C_z = 0.944$ и для грунтов 3-й категории $C_z = 1.140$.

Преобладающий период колебаний в разломной и ближней зонах.

Акселерограммы для разломной и ближней зон обрабатывались совместно. Была проведена процедура, аналогичная примененной при исследовании затуха-

ния пиковых ускорений. При этом, оказалось, что зависимость T_0 от расстояния незначительна, а, следовательно, величина преобладающего периода в разломной и ближней зонах определяется магнитудой события. Полученное в результате уравнение прямой, аппроксимирующей эмпирические данные по преобладающему периоду колебаний в ускорениях, имеет вид:

$$\lg T_0 = M/6 - 1.55. \quad (8)$$

Эмпирические данные о преобладающих периодах в разломной и ближней зонах, а также аппроксимирующая прямая показаны на рисунке 2.

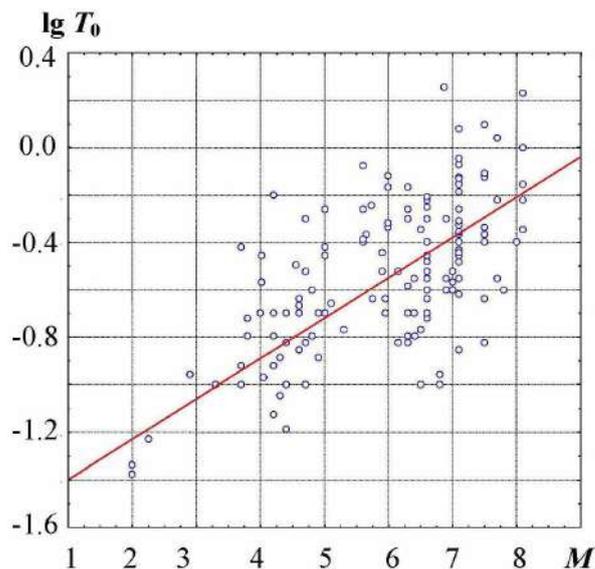


Рис. 2. Зависимость преобладающего периода от магнитуды в разломной и ближней зонах.

Красная линия – аппроксимирующая прямая /

Fig. 2. Dependence of predominant period from earthquake magnitude in fault zone and near-field zone

Преобладающий период колебаний в дальней зоне.

В дальней зоне преобладающий период описывается следующим эмпирическим уравнением:

$$\lg T_0 = M/6 + 0.25 \lg R^* - 1.73 + C_2 \pm 0.20, \quad (9)$$

где T_0 – преобладающий период ускорений;

R^* – нормированное по магнитуде кратчайшее расстояние до поверхности разлома;

$C_2 = -0.05$ для грунтов 1-й категории, 0.0 для грунтов 2-й категории и 0.1 для грунтов 3-й и 4-й категорий.

В дальней зоне на рыхлых грунтах могут возникать резонансные явления. Поскольку горные породы, слагающие земную кору, в разных регионах мало различаются по сейсмическим свойствам, константы в уравнении (9) относительно стабильны.

Ширина импульса в разломной и ближней зонах.

Продолжительность колебаний может определяться различным образом [SSG-9, 2010; McGuire, Barnhard, 1979]. В большинстве случаев эти определения даются

с нарушением правил размерностей и подобия. Согласно теории размерностей и подобия, длительность колебаний характеризуется шириной импульса t [Аптикаев, 2012]. Эмпирические данные для очаговой зоны показаны на рисунке 3.

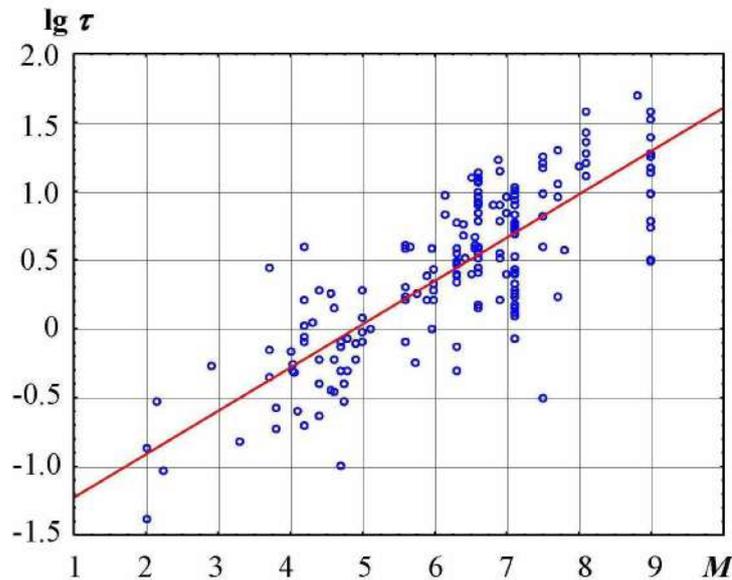


Рис. 3. Зависимость продолжительности колебаний от магнитуды в разломной и ближней зонах.
Красная линия – аппроксимирующая прямая /

Fig. 3. Dependence of vibration duration from earthquake magnitude in fault zone and near-field zone.
Red line is approximating line.

Анализ полученного распределения показал, что зависимость ширины импульса от расстояния в рассматриваемых зонах волнового поля несущественна. Уравнение аппроксимирующей прямой имеет вид:

$$\lg \tau = M / 3 - 1.61 \pm 0.29. \quad (10)$$

Ширина импульса в дальней зоне.

Ширина импульса в дальней зоне может быть описана следующим корреляционным соотношением:

$$\lg \tau = M / 3 - 1.811 + 0.5 \lg R^* + C_2 \pm 0.30, \quad (11)$$

где M – магнитуда землетрясения;

R^* – нормированное кратчайшее расстояние до поверхности разрыва,

C_2 – постоянная, отражающая влияние грунтовых условий: $C_2 = 0.00$ для грунтов 1-ой, $C_2 = 0.15$ – 2-ой и $C_2 = 0.55$ для 3-ей и 4-ой категорий.

Обсуждение результатов

Тенденция последних десятилетий – выделение в волновом поле сейсмических колебаний трех зон с различными затуханиями амплитуд и различными зависимостями параметров колебаний от магнитуды, типа подвижки по разлому, расстояния и грунтовых условий. В результате проведенных исследований было установлено, что для сильных землетрясений интенсивностью 7–9 баллов существуют три зоны, в которых параметры сейсмических колебаний по-разному зависят от магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий.

Анализ распределений эмпирических данных по пиковым ускорениям грунта показал, что в зоне, примыкающей к разлому, – разломной зоне – уровень ускорений с расстоянием возрастает и наблюдается зависимость амплитуды ускорений от механизма очага. В следующей за ней ближней зоне такая зависимость не выявлена. И в разломной, и в ближней зонах существенного влияния грунтовых условий на амплитуду ускорений не обнаружено. Следует заметить, что, тем не менее, сейсмическая интенсивность на рыхлых грунтах возрастает вследствие уменьшения несущей способности грунтов – трещин, просадок и других необратимых деформаций. Непосредственно над разломом, вышедшим на дневную поверхность, сейсмическое воздействие определяется не столько уровнем вибраций, сколько остаточными деформациями.

Объяснить описанные явления можно, если отказаться от плоской модели очага и считать, что очаг землетрясения – некоторый объем среды [Завьялов и др., 2021; Ризниченко, 1976; Stirling et al., 2013; Thingbaijam et al., 2017; Wells, Coppersmith, 1994]. При этом, определяющим фактором величины магнитуды сейсмического события является объем очага землетрясения, а не плотность энергии [Садовский и др., 1983; Певнев, 2021].

До землетрясения в очаге накапливается потенциальная энергия. Процесс землетрясения начинается тогда, когда достигается предельная деформация горных пород в области, включающей будущий разрыв, и накопленная энергия выделяется в виде энергии сейсмических волн. За малый интервал времени после начала движения по разлому малое количество потенциальной энергии переходит в энергию сейсмического движения. С течением времени количество сейсмической энергии возрастает – возрастают и амплитуды колебаний. Далее, в ближней зоне, по лучу амплитуды несколько уменьшаются вследствие геометрического расхождения. Такая модель распространения сейсмического волнового фронта подтверждается значениями затухания, выявленными по анализу эмпирических данных. Как видно из формул (5) и (6), в разломной зоне затухание амплитуд отсутствует, а в ближней протекает по степени меньше 1. Следовательно, и в разломной, и в ближней зонах после возникновения разрыва продолжается выделение сейсмической энергии.

Начиная с границы между ближней и дальней зонами, по эмпирическим данным затухание резко увеличивается. Можно считать, что выделением энергии в дальней зоне можно пренебречь. Эта граница характеризуется уровнем пикового ускорения $PGA \approx 175 \text{ см/с}^2$ на расстоянии $R^* = 0.107$ от поверхности разлома. Эти числовые характеристики границы ближней и дальней зон являются инвариантом, поскольку, как показал анализ, не зависят от магнитуды, расстояния и грунтовых условий. Вариации интенсивности связаны с влиянием продолжительности колебаний. Судя по резкому изменению затухания амплитуд, эта граница соответствует границе очаговой области. Поэтому совокупность разломной и ближней зон можно назвать очаговой зоной и интерпретировать как очаг землетрясения; граница очага землетрясения совпадает с границей ближней и дальней зон.

Выделенная очаговая зона обладает характерными особенностями и по преобладающему периоду, и по продолжительности колебаний. Согласно правилам теории размерностей и подобия, зависимость этих параметров от магнитуды должна быть такой же, как и для расстояний. Однако результаты проведенного исследования противоречат этому положению в очаговой зоне: коэффициент подобия для расстояния составляет $1/3$, для ширины импульса $1/3$, а для преобладающего пери-

ода 1/6. Нарушение условий подобия связано с тем, что выделение сейсмической энергии в пространстве начинается вдоль поверхности разлома, а распространение сейсмической энергии идет только перпендикулярно фронту волны. Обнаружилась независимость периода колебаний и ширины импульса от расстояния. Очевидно, очаговая область, как генератор сейсмических колебаний, колеблется как единое целое. Поэтому относительно малый слой четвертичных отложений мало сказывается на спектре колебаний, излучаемых очагом. Этот факт также соответствует границе очага, совпадающей с границей ближней и дальней зон.

Выводы

С использованием теории размерностей и подобия предложена модель очаговой зоны землетрясения, определены ее размеры.

Вблизи разлома волновое поле распространяющихся сейсмических колебаний по характеристикам распространения и затухания разделяется на 3 зоны (отсчет от поверхности разлома): разломную, ближнюю и дальнюю.

Разломная и ближняя зоны в совокупности образуют очаговую область, которая колеблется как единое целое.

Границей очаговой области является граница между ближней и дальней зонами со средним уровнем ускорения примерно $PGA \approx 175 \text{ см/с}^2$ на расстоянии $R^* = 0.107$ от поверхности разлома, что в среднем соответствует интенсивности 7.5 балла.

Предложены усовершенствованные уравнения затухания для пиковых ускорений, преобладающего периода и продолжительности колебаний.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. // Российская акад. наук. Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – Москва: Наука и образование. 2012. – 175 с.
2. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. / Под ред. Г. А. Мавлянова. – Ташкент: ФАН. 1986. – 368 с.
3. Завьялов А.Д., Зотов О.Д., Гульельми А.В. Новый подход к определению размера очаговой зоны землетрясений. // Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. (Иркутск, 26 – 30 апреля 2021 г.) – Иркутск: Изд-во ИРУ, 2021. – С. 190–191.
4. Коновалов А.В., Манайчев К.А., Степнов А.А., Гаврилов А.В. Региональная модель затухания сильных движений для о. Сахалин. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 45. №4. – С. 19–30. DOI: 10.21455/VIS2018.1-2.
5. Ляхов Г.М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. – М.: Недра, 1964. – 216 с.
6. Певнев А.К. Обоснование основных положений деформационной модели подготовки очага корового землетрясения. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – № 1. – С. 104–120. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.34.009.
7. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 9–27.
8. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясения от объема очага. // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 271. № 3. – С. 598–602.
9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. / Л.И. Седов. – 10-е изд., доп. – М.: Наука, 1987. – 430 с.
10. Фидарова М.И., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний

грунтовой толщи. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – № 1. – С. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

11. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. // Ташкент: ФАН. 1989. – 295 с.

12. Чернов Ю.К., Чернов А.Ю., Читишвили М.И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть 2. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – № 3. – С. 161–178. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753.

13. Aptikaev F., Erteleva O. Features of seismic waves propagation near fault. [Электронный ресурс]. // Proc. XXIV IUGG General Assembly (Perugia, July, 2 – 13, 2007). – Presentation 6374. – USMA. 2007. – ISBN 978-88-95852-25-6.

14. Aptikaev F., Kopnichev Yu. Correlation between seismic vibration parameters and type of faulting. // Proc. VII World Conference on Earthquake Engineering (Istanbul, September 8 – 13, 1980). – Istanbul, Turkey, 1980. – Vol. 1. – pp. 107–110.

15. Bommer J.J., Stafford P.J., Ruigrok E., Rodriguez-Marek A., Ntinalexis M., Kruiver P.P., Edwards B., Dost B., van Elk J. Ground-motion prediction models for induced earthquakes in the Groningen gas field, the Netherlands. // Journal of Seismology – 2022. – Vol. 26. – pp. 1157–1184. DOI:10.1007/s10950-022-10120-w.

16. Boore D.M., Stewart J.P., Skarlatoudis A.A., Seyhan E., Margaris B., Theodoulidis N., Scordilis E., Kalogeras I., Klimis N., Melis N.S. A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Greece. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2021. – Vol. V. 111. No. 2. – pp. 857–874. DOI: 10.1785/0120200270.

17. Campbell K.W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. // Seism. Research Letters. – 1997. – Vol. 68. No. 1. – pp. 154–179. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.154.

18. Gao J.-C., Chan C.-H., Lee C.-T. Site-dependent ground-motion prediction equations and uniform hazard response spectra. // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 292. No. 106241. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106241.

19. Graizer V., Kalkan E. Summary of the GK15 ground-motion prediction equation for horizontal PGA and 5% damped PSA from shallow crustal continental earthquakes. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2016. – Vol. 106. No. 2. – pp. 687–707. DOI: 10.1785/0120150194.

20. Graizer V.M., Kalkan E. Ground Motion Attenuation Model for Peak Horizontal Acceleration from Shallow Crustal Earthquakes. // Earthquake Spectra. – 2007. – Vol. 23. No. 3. – pp. 585–613. – DOI: 10.1193/1.2755949.

21. Jaimes M.A., García-Soto A.D. Updated ground motion prediction model for Mexican intermediate – depth intraslab earthquakes including V/H ratios. // Earthquake Spectra. – 2020. – Vol. 36. No. 3. – pp. 1298–1330. DOI: 10.1177/8755293019899947.

22. Keshri C.K., Mohanty W.K. Next generation ground-motion prediction equations for Indo-Gangetic Plains, India. // J. Earth System Science. – 2023. – Vol. 132. No. 85. – pp. 84–107. DOI:10.1007/s12040-023-02092-3.

23. McGuire R.K., Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking: preprint. – 1979. – 17 p.

24. Phung V.-B., Loh C.H., Chao S.H., Chiou B.S.J., Huang B.-S. Ground motion prediction equation for crustal earthquakes in Taiwan. // Earthquake Spectra. – 2020. – Vol. 36. No. 4. – pp. 2129–2164. DOI: 10.1177/8755293020919415.

25. Skarlatoudis A.A., Papazachos C.B., Margaris B.N., Ventouzi C., Kalogeras I. and the EGELADOS Group. Ground-motion prediction equations of intermediate-depth earthquakes in the Hellenic Arc, southern Aegean subduction area. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2013. – Vol. 103. No. 3. – pp. 1952–1968. DOI: 10.1785/0120120265.

26. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations: IAEA Safety Standards Series, STI/PUB/1448. – Vienna. 2010. – 80 p.

27. Stafford P.J. Continuous integration of data into ground-motion models using Bayesian updating. // *Journal of Seismology*. – 2019. – Vol. 23. No. 1. – pp. 39–57. DOI: 10.1007/s10950-018-9792-3.

28. Stirling M., Goded T., Berryman K., Litchfield N. Selection of earthquake scaling relationships for seismic hazard analysis. // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 2013. – Vol. 103. No. 6. – pp. 2993–3011. DOI:10.1785/0120130052.

29. Thingbaijam K.K.S, Martin Mai P, Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws. // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 2017. – Vol. 107. No. 5. – pp. 2225–2246. DOI:10.1785/0120170017.

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

31. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 1994. – Vol. 84. No. 4. – pp. 974–1002.

32. Zuccolo E., Bozzoni F., Lai C. G. Regional low-magnitude GMPE to estimate spectral accelerations for earthquake early warning applications in southern Italy. // *Seism. Research Letters*. – 2017. – Vol. 88. No. 1. – Pp. 61–71. DOI: 10.1785/0220160038.

References

1. Aptikaev F.F. Instrumental seismic intensity scale. Russian Academy of Sciences, Institute of Physics of the Earth named after. O.Yu. Schmidt. Moscow. Science and Education. 2012. 175 p. (In Russ.)

2. Gazli earthquakes of 1976 and 1984 / Ed. G.A. Mavlyanov. Tashkent. FAN. 1986. 368 p. (In Russ.)

3. Zavyalov A.D., Zotov O.D., Guglielmi A.V. A new approach to determining the size of the focal zone of earthquakes. All-Russian conference dedicated to the memory of Prof. S. I. Sherman (Irkutsk, April 26 – 30, 2021). Abstracts. Irkutsk: IRU Publishing House. 2021. pp. 190–191. (In Russ.)

4. Konovalov A.V., Manaychev K.A., Stepnov A.A., Gavrilov A.V. Regional model of strong ground motions attenuation for Sakhalin Island. *Voprosy inzhenernoy seysmologii. Questions of engineering seismology*. 2018. Vol. 45. No. 4. pp. 19–30. DOI: 10.21455/VIS2018.1-2. (In Russ.)

5. Lyakhov G.M. Fundamentals of explosion dynamics in soils and liquid media. Moscow. Nedra. 1964. 216 p. (In Russ.)

6. Pevnev A.K. Substantiation of the main concepts for the deformation model of the crustal earthquake source preparation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 104–120. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.34.009. (In Russ.)

7. Riznichenko Yu.V. Dimensions of the crustal earthquake source and seismic moment. *Research on the physics of earthquakes*. M.: Nauka, 1976. Pp. 9–27. (In Russ.)

8. Sadovskii M.A., Pisarenko V.F., Steinberg V.V. On the dependence of earthquake energy on the seismic focus volume. *Dokl. Akad. Nauk SSSR (Doklady Akademii Nauk)*. 1983. Vol. 271. No. 3. pp. 598–602. (In Russ.)

9. Sedov L.I. *Methods of similarity and dimension in mechanics*. 10th ed. Moscow. Nauka. 1987. 430 p. (In Russ.)

10. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13 No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005. (in Russ.)

11. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative assessment of seismic hazard of the territories. Tashkent. FAN. 1989. 295 p. (in Russ.)

12. Chernov Yu.K., Chernov A.Yu., Chitishvili M.I. Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Part II. Ge-

ology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 161–178. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753. (In Russ.)

13. Aptikaev F., Erteleva O. Features of seismic waves propagation near fault. In: Proc. XXIV IUGG General Assembly (Perugia, July, 2 – 13, 2007). Presentation 6374. USMA. 2007. ISBN 978-88-95852-25-6.

14. Aptikaev F., Kopnichev Yu. Correlation between seismic vibration parameters and type of faulting. In: Proc. VII World Conference on Earthquake Engineering (Istanbul, September 8-13, 1980). Istanbul, Turkey, 1980. Vol. 1. pp. 107–110.

15. Bommer J.J., Stafford P.J., Ruigrok E., Rodriguez-Marek A., Ntinalexis M., Kruiver P.P., Edwards B., Dost B., van Elk J. Ground-motion prediction models for induced earthquakes in the Groningen gas field, the Netherlands. *Journal of Seismology* 2022. Vol. 26. pp. 1157–1184. DOI:10.1007/s10950-022-10120-w.

16. Boore D.M., Stewart J.P., Skarlatoudis A.A., Seyhan E., Margaris B., Theodoulidis N., Scordilis E., Kalogeras I., Klimis N., Melis N.S. A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Greece. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2021. Vol. 111. No. 2. pp. 857–874. DOI: 10.1785/0120200270.

17. Campbell K.W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seism. Research Letters*. 1997. Vol. 68. No. 1. pp. 154–179. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.154.

18. Gao J.-C., Chan C.-H., Lee C.-T. Site-dependent ground-motion prediction equations and uniform hazard response spectra. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 292. No. 106241. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106241.

19. Graizer V., Kalkan E. Summary of the GK15 ground-motion prediction equation for horizontal PGA and 5% damped PSA from shallow crustal continental earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2016. Vol. 106. No. 2. pp. 687–707. DOI: 10.1785/0120150194.

20. Graizer V.M., Kalkan E. Ground Motion Attenuation Model for Peak Horizontal Acceleration from Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*. 2007. Vol. 23. No. 3. pp. 585–613. DOI: 10.1193/1.2755949.

21. Jaimes M.A., García-Soto A.D. Updated ground motion prediction model for Mexican intermediate – depth intraslab earthquakes including V/H ratios. *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. No. 3. pp. 1298–1330. DOI: 10.1177/8755293019899947.

22. Keshri C.K., Mohanty W.K. Next generation ground-motion prediction equations for Indo-Gangetic Plains, India. *J. Earth System Science*. 2023. Vol. 132. No. 85. pp. 84–107. DOI:10.1007/s12040-023-02092-3.

23. McGuire R.K., Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking: preprint. 1979. 17 p.

24. Phung V.-B., Loh C.H., Chao S.H., Chiou B.S.J., Huang B.-S. Ground motion prediction equation for crustal earthquakes in Taiwan. *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. No. 4. pp. 2129–2164. DOI: 10.1177/8755293020919415.

25. Skarlatoudis A.A., Papazachos C.B., Margaris B.N., Ventouzi C., Kalogeras I. and the EGELADOS Group. Ground-motion prediction equations of intermediate-depth earthquakes in the Hellenic Arc, southern Aegean subduction area. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2013. Vol. 103. No. 3. pp. 1952–1968. DOI: 10.1785/0120120265.

26. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations: IAEA Safety Standards Series, STI/PUB/1448. Vienna. 2010. 80 p.

27. Stafford P.J. Continuous integration of data into ground-motion models using Bayesian updating. *Journal of Seismology*. 2019. Vol. 23. No. 1. pp. 39–57. DOI: 10.1007/s10950-018-9792-3.

28. Stirling M., Goded T., Berryman K., Litchfield N. Selection of earthquake scaling relationships for seismic hazard analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2013. Vol. 103. No. 6. pp. 2993–3011. DOI:10.1785/0120130052.

29. Thingbaijam K.K.S, Martin Mai P, Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2017. Vol. 107. No. 5. pp. 2225–2246. DOI:10.1785/0120170017.
30. Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1976. Vol. 66. No. 1. pp. 189–219.
31. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. Vol. 84. No. 4. pp. 974–1002.
32. Zuccolo E., Bozzoni F., Lai C. G. Regional low-magnitude GMPE to estimate spectral accelerations for earthquake early warning applications in southern Italy. *Seism. Research Letters.* 2017. Vol. 88. No. 1. pp. 61–71. DOI: 10.1785/0220160038.

УДК 550.4+504.4.054

DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007

Оригинальная статья

Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса

В.Е. Закруткин , В.Н. Решетняк 

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

Статья поступила: 05.10.2023, доработана: 28.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В пределах угледобывающих районов Восточного Донбасса среди техногенных геохимических потоков особую роль играют техногенные шахтные воды, с которыми в речную сеть ежегодно поступает около 800 тонн железа. Наряду с водной средой железом обогащаются и донные отложения, которые, выполняя депонирующие функции, одновременно, при определенных гидрологических условиях, могут служить источником вторичного загрязнения водной среды железом, а также другими типоморфными металлами техногенных шахтных вод. **Цель исследований.** Изучение распределения железа и его основных минералов в речных отложениях Восточного Донбасса, оценка роли природных и техногенных факторов в таком распределении. **Методы исследований.** При анализе содержаний железа отдельное внимание уделялось пелитовой фракции осадков с размером частиц менее 0,01 мм. Изучение ассоциации аутигенных минералов железа выполнено методами электронно-зондовых исследований на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU с системой энергодисперсионного микроанализа. **Результаты исследований.** По содержанию железа речные отложения бассейна Тузлова превосходят аналогичные образования в бассейне Северского Донца, особенно в пелитовой фракции. Это обусловлено тем, что в бассейне Тузлова нагрузка высокоминерализованных техногенных шахтных вод на речные системы значительно выше. Выявлено, что для донных отложений малых рек в целом характерны большие содержания железа, нежели для осадков средних рек, причем как в целом в валовых пробах, так и в пелитовой фракции. Установлена положительная взаимосвязь между количеством пелитовой фракции и содержанием железа в донных отложениях вне зависимости от размера реки. Основная форма нахождения железа в речных осадках – минеральная. К основным минералам железа в изученных речных осадках относятся гидроокислы железа, магнетит, пирит, сидерит и ильменит. Обнаружено, что по суммарному содержанию аутигенных минералов железа донные отложения малых рек практически вдвое превосходят осадки средних. Влияние техногенных шахтных вод на речные отложения проявляется в увеличении содержаний аутигенных минералов железа, которые образуются в условиях постоянного поступления железа с шахтными водами в преимущественно пелитовых, обогащенных органическим веществом илах.

Ключевые слова: донные отложения, железо, Восточный Донбасс, угледобывающая промышленность, техногенные шахтные воды, аутигенные минералы железа.

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

Для цитирования: Закруткин В.Е., Решетняк В.Н. Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 85-98. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007

DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007

Original paper

Distribution of iron and its minerals in river sediments of Eastern Donbass

V.E. Zakrutkin , V.N. Reshetnyak 

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

Received: 05.10.2023, revised: 28.11.2023, accepted: 04.12.2023

Abstract: Relevance. Within the coal-mining regions of the Eastern Donbass among the technogenic geochemical flows technogenic mine waters play a special role, they carrying about 800 tons of iron annually into the river network. As in the aquatic environment iron is also accumulates in river sediments, which performing deposition functions and at the same time, under certain hydrological conditions serving as a source of secondary pollution of the aquatic environment with iron as well as other typomorphic metals of technogenic mine waters. **Aim.** Study of iron and its main minerals distribution in the river sediments of the Eastern Donbass, assessment of the role of natural and technogenic factors in this distribution. **Methods.** When analyzing the iron content special attention was paid to the pelitic fraction of sediments with a particle size of less than 0.01 mm. The study of the authigenic iron minerals assemblage have carried out using electron probe methods on a scanning electron microscope VEGA II LMU with an energy dispersive microanalysis system. **Results.** Iron content in the river sediments of the Tuzlov basin exceeds those in the Seversky Donets basin, especially in the pelitic fraction. This is due to the fact that the load of highly mineralized technogenic mine waters on river systems is much higher in the Tuzlov basin. It was revealed that, in general, iron concentrations are higher in the small rivers sediments than those in the middle river sediments, both in total samples and in the pelitic fraction. A positive correlation has been established between the amount of pelitic fraction and the iron content in river sediments, regardless of the size of the river. The main occurrence form of iron in river sediments is mineral. The main iron minerals in the studied river sediments are iron hydroxides, magnetite, pyrite, siderite, and ilmenite. It has been found that content of authigenic iron minerals in small rivers sediments are almost twice as high as those in the middle rivers sediments. The influence of technogenic mine waters on river sediments appears in an increase in the content of authigenic iron minerals, which are formed under conditions of constant iron supply with mine waters in predominantly pelitic alluvium enriched in organic matter.

Keywords: river sediments, iron, Eastern Donbass, coal-mining industry, technogenic mine waters, authigenic iron minerals.

Acknowledgments: *The reported study was funded by the Russian Science Foundation, project number 22-27-00305, <https://rscf.ru/project/22-27-00305/> at the Southern Federal University.*

For citation: Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N. Distribution of iron and its minerals in river sediments of Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4):85-98. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007

Введение

Наиболее подходящим эпитафием к настоящей статье могли бы стать слова выдающегося отечественного геохимика академика А.Е. Ферсмана: «Железо не только самый главный металл окружающей нас природы, – оно основа культуры и промышленности, оно орудие войны и мирного труда. И трудно во всей таблице

Менделеева найти другой элемент, который был бы так связан с прошлыми, настоящими и будущими судьбами человечества».

Среди металлов по распространённости в земной коре железо занимает второе место после алюминия. Благодаря высокому кларку (4,65) и химическим свойствам оно играет важнейшую роль в окружающей среде в целом, а также в отдельных её компонентах. По объёму производства и потребления железо находится на первом месте. Ежегодная добыча металла составляет сотни миллионов тонн, что на порядок больше, чем его выносятся с речным стоком. Однако величина технофильности железа, в сравнении с другими металлами, относительно невелика ($6,6 \times 10^7$), что обусловлено его высоким кларком в земной коре. Модуль же техногенного давления металла, наоборот, один из самых высоких и составляет по оценке Н.Ф. Глазовского 500 – 1000 кг/км² в год [Глазовский, 1982]. Добывая железо из земных недр, ежегодно переводя большие его количества из техногенных потоков в природные, человечество способствует формированию «ожелезненных» ландшафтов, которые могут представлять опасность для здоровья проживающего там населения.

В пределах угледобывающих районов Восточного Донбасса среди техногенных геохимических потоков особую роль играют техногенные шахтные воды, с которыми в речную сеть ежегодно поступает около 800 тонн железа. Находясь в зоне влияния техногенных шахтных вод, многие реки утратили свои природные свойства [Гавришин, 2018; Мохов и др., 2005]. Стало невозможным использование речной воды не только для питья, но и для орошения сельскохозяйственных угодий. Наряду с водной средой железом обогащаются и донные отложения, которые, выполняя депонирующие функции, одновременно, при определенных гидрологических условиях, могут служить источником вторичного загрязнения водной среды железом, а также другими типоморфными металлами техногенных шахтных вод. В этой связи очевидно, что исследования, направленные на выявление закономерностей распределения и форм нахождения железа и других металлов в речных отложениях, должны стать ключевым элементом гидроэкологического мониторинга.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования являлись донные отложения малых и средних рек двух бассейнов – Северского Донца (реки Большая Каменка, Малая Каменка, Лихая, Калитва, Быстрая, Кундрючья, Большая Гнилуша) и Тузлова (реки Большой Несветай, Малый Несветай, Аюта, Атюхта, Грушевка, Кадамовка и Тузлов) в пределах Ростовской области. Как видно из таблицы 1, большая часть из них относится к категории малых. Именно малые реки заслуживают первостепенного внимания, поскольку являются наиболее чувствительным индикатором экологического состояния водосборных площадей.

Опробование донных отложений, как правило, осуществлялось в створах, расположенных в верховьях рек или на участках вне зоны влияния крупных источников загрязнения; в низовьях рек для оценки суммарного воздействия различных техногенных источников загрязнения на водосборах, а также выше и ниже мест поступления в речную сеть техногенных шахтных вод – основного источника железа. Отбор проб проводили согласно нормативным документам (ГОСТ 17.1.5.01-80, 2002; ГОСТ Р 51232-98, 1999) с использованием дночерпателя Ван-Вина. В связи с гранулометрической неоднородностью аллювия каждую пробу составляли из нескольких (обычно 3–5) частных проб, охватывающих всю ширину русла.

Средние содержания железа в речных отложениях Восточного Донбасса /
Average content of iron in river sediments within Eastern Donbass

Река / River	Категория реки / River category	Расход воды, м ³ /с Discharge, m ³ /h		Средние содержания пелитовой (П) и песчано-алевритовой (ПА) фракций в речных отложениях / Average share of pelitic (P) and sandy-silty(SS) fractions in river sediments	Средние содержания железа, мг/кг / Average iron content, mg/kg	
		в устье/ in mouth	в населенном пункте/ near the settlement		в валовой пробе/ in total sample	в пелитовой фракции/ in pelitic fraction
Бассейн Северского Донца / Seversky Donets Basin						
Большая Каменка/ Bolshaya Kamenka	Малая/ Small	2,49	2,70 (пос. Первомайка/ Pervomaika village)	Ил алеврито-пелитовый (П 78%, ПА 22%)/ Silty-pelitic alluvium (P 78%, SS 22%)	42300	24450
Малая Каменка/ Malaya Kamenka	Малая/ Small	0,09	0,19 (х. Волченский/ Volchensky hamlet)	Ил пелито-песчано-алевритовый (ПА 60 %, П 40%)/ Pelitic-sandy-silty alluvium (SS 60%, P 40%)	28467	20467
Лихая/ Likhaya	Малая/ Small	0,38	1,23 (х. Богураев/ Boguraev hamlet)	Ил алеврито-пелитовый (П 80%, ПА 20%)/ Silty-pelitic alluvium (P 80%, SS 20%)	37033	20600
Калитва/ Kalitva	Средняя/ Middle	12,26	15,2 (х. Погорелов/ Pogorelov hamlet)	Ил пелито-алеврито-песчаный (ПА 89 %, П 11%)/ Pelitic-silty-sandy alluvium (SS 89%, P 11%)	9700	12200
Быстрая/ Bystraya	Средняя/ Middle	1,37	4,44 (х. Худяковский/ Khudyakovsky hamlet)	Ил алеврито-песчаный (ПА 92%, П 8%)/ Pelitic alluvium (P 92%, SS 8%)	12800	17900
Кундрючья/ Kundryuchya	Средняя/ Middle	5,46	4,40 (х. Мостовой/ Mostovoy hamlet)	Ил алеврито-пелитовый (П 77%, ПА 23%)/ Silty-pelitic alluvium (P 77%, SS 23%)	37867	26732
Большая Гнилуша/ Bolshaya Gnilusha	Малая/ Small	0,55	-	Ил алеврито-пелитовый (П 88%, ПА 12 %)/ Silty-pelitic alluvium (P 88%, SS 12%)	57700	31047
Среднее по бассейну/ Basin average	-	3,23	4,10	Ил песчано-алеврито-пелитовый (П 54%, ПА 46%)/ Sandy-silty-pelitic alluvium (P 54%, SS 46%)	31378	21541

Река / River	Категория реки / River category	Расход воды, м ³ /с Discharge, m ³ /h		Средние содержания пелитовой (П) и песчано-алевритовой (ПА) фракций в речных отложениях / Average share of pelitic (P) and sandy-silty(SS) fractions in river sediments	Средние содержания железа, мг/кг/ Average iron content, mg/kg	
		в устье/ in mouth	в населенном пункте/ near the settlement		в валовой пробе/ in total sample	в пелитовой фракции/ in pelitic fraction
Бассейн Тузлова / Basin Tuzlov						
Большой Несветай/ Bolshoy Nesvetai	Малая/ Small	0,32	1,10 (с. Гребцово/ Grebtsovo village)	Ил песчано-алеврито-пелитовый (П 65%, ПА 35%)/ Sandy-silty-pelitic alluvium (P 65%, SS 35%)	36833	27666
Малый Несветай/ Malyy Nesvetai	Малая/ Small	0,19	-	Ил песчано-алеврито-пелитовый (П 60%, ПА 40%)/ Sandy-silty-pelitic alluvium (P 60%, SS 40%)	26567	26631
Аюта/ Ayuta	Малая/ Small	0,40	-	Ил алеврито-пелитовый (П 75%, ПА 25%)/ Silty-pelitic alluvium (P 75%, SS 25%)	39133	33119
Атюхта/ Atyukhta	Малая/ Small	0,13	-	Ил пелито-песчано-алевритовый (ПА 67%, П 33%)/ Pelitic-sandy-silty alluvium (SS 67%, P 33%)	30450	34616
Грушевка/ Grushevka	Малая/ Small	1,47	0,39 (г. Шахты/ the Shakhty city)	Ил алеврито-пелитовый (П 76%, ПА 24%)/ Silty-pelitic alluvium (P 76%, SS 24%)	30625	36304
Кадамовка/ Kadamovka	Малая/ Small	0,42	-	Ил песчано-алеврито-пелитовый (П 74%, ПА 26%)/ Sandy-silty-pelitic alluvium (P 74%, SS 26%)	33700	27391
Тузлов/ Tuzlov	Средняя/ Middle	6,13	2,20 (с. Несветай/ Nesvetai village)	Ил алеврито-пелитовый (П 75%, ПА 25%)/ Silty-pelitic alluvium (P 75%, SS 25%)	35150	33184
Среднее по бассейну/ Basin average	-	1,29	0,69	Ил песчано-алеврито-пелитовый (П 67%, ПА 33%)/ Sandy-silty-pelitic alluvium (P 67%, SS 33%)	33120	30997

Гранулометрический состав отложений определялся ситовым, пипеточным и комбинированным методами. Определение минерального состава частиц песчано-алевритовой размерности осуществлялось под бинокулярным микроскопом после отмучивания осадка и обработки иммерсионными препаратами с последующим делением на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции. Отдельное внимание уделялось пелитовой фракции осадков с размером частиц менее 0,01 мм, которая, как известно, является основным носителем многих металлов, включая железо.

Определение концентраций железа проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре «Квант-2АТ» в лаборатории АО «Южгеология».

Изучение ассоциации аутигенных микроминералов выполнено методами электронно-зондовых исследований, обеспечивающих получение данных о строении и составе агрегатов, габитусе и элементом составе кристаллов минералов. Изучались образцы илов, нанесенные на предметные стекла в виде суспензии. Измерения выполнены в «Центре исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета на растровом электронном микроскопе *VEGA II LMU* (фирмы *Tescan*) с системой энергодисперсионного микроанализа *INCA ENERGY 450/XT*. Поверхность образцов напылялась углеродом. Изображения получены с использованием *BE*-кольцевого детектора отраженных электронов сцинтиляционного типа (*YAG* кристалл), обеспечивающего получение информации о фазовой и химической неоднородности материала.

Результаты и обсуждение

Речные отложения Восточного Донбасса внешне представляют собой осадки от светло-серого до черного цвета, иногда с коричневатым оттенком. Многие из них имеют полужидкую консистенцию с большим количеством разлагающегося органического вещества современного происхождения. Они существенно отличаются по гранулометрическому составу. Это могут быть как пелитовые илы с долей пелитовой фракции более 90% (отдельные створы рек Большая Гнилуша, Кундюря, Тузлов и Малый Несветай), так и алеврито-песчаные (доля пелитовой фракции <10%, некоторые створы рек Калитва, Быстрая, Атюхта).

Что касается содержания железа, то, как видно из данных таблицы 1, речные отложения бассейнов Северского Донца и Тузлова отличаются друг от друга, особенно заметно при сравнении пелитовой фракции. Так, если по содержанию Fe в валовой пробе речные отложения бассейна Тузлова превосходят аналогичные образования бассейна Северского Донца всего лишь в 1,06 раза, то при сравнении их пелитового компонента, разница между бассейнами возрастет до 1,44 раза. Все это вполне объяснимо, если учесть, что в первом из названных бассейнов нагрузка высокоминерализованных, обогащенных железом техногенных шахтных вод на речные системы значительно выше, чем во втором [Гавришин и др., 2018; Закруткин и др., 2016].

Интересно сравнить между собой по количеству железа донные отложения малых и средних рек. Результаты такого сравнения суммированы на рисунке 1. Из него видно, что наибольшие средние содержания железа как в осадке в целом, так и в пелитовой фракции характерны для малых рек. При этом важно отметить, что и количество пелитовой фракции в донных осадках также снижается от малых рек

к средним (в среднем 67,2% и 42,9%, соответственно). Еще более убедительно о зависимости между содержаниями железа и количеством пелитового компонента в донных осадках свидетельствуют данные, представленные на рисунке 2, где отчетливо видно как с уменьшением доли пелитовой фракции в речных отложениях снижаются и концентрации в них железа.

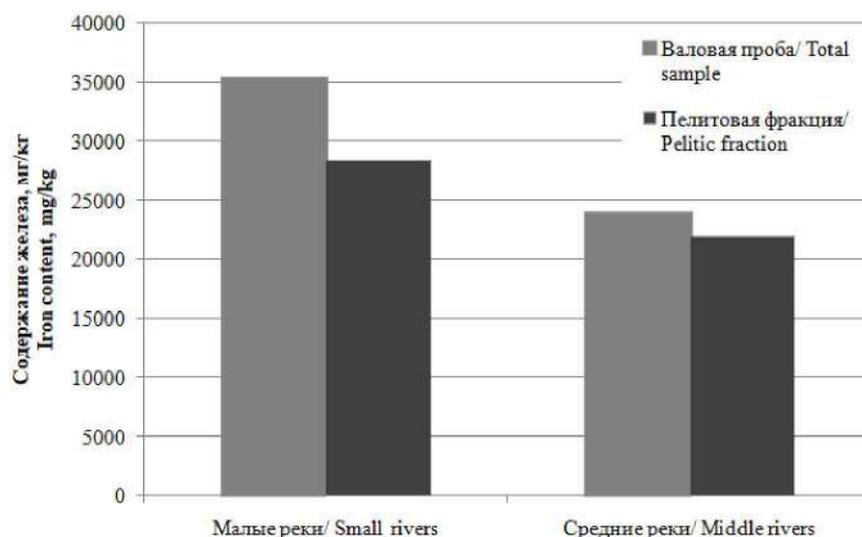


Рис. 1. Распределение содержаний железа в донных отложениях рек в целом и в их пелитовой фракции в зависимости от размера рек /

Fig. 1. Distribution of iron content in total sample and pelitic fraction of river sediments depending on the size of rivers

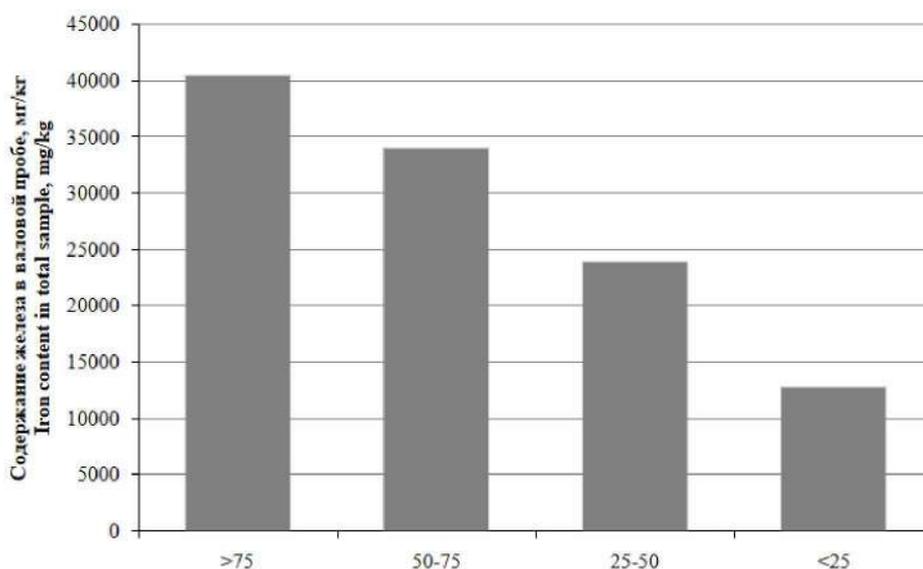


Рис. 2. Распределение содержаний железа в валовой пробе донных отложений в зависимости от количества в них пелитовой фракции /

Fig. 2. Distribution of iron content in the total sample of river sediments depending on the pelitic fraction share

Основная форма нахождения железа в донных отложениях рек Восточного Донбасса – минеральная. Основными минералами железа в изучаемых осадках являют-

ся гидроокислы железа, магнетит, пирит, сидерит и ильменит. Последний относится к терригенным аксессуарам и зачастую имеет относительно высокие содержания в преимущественно песчано-алевритовых осадках, не затронутых в значительной степени техногенным воздействием. Однако, его количество в речных илах в среднем примерно в 20 раз меньше количества аутигенных минералов железа, сформировавшихся в стадию раннего диагенеза [Закруткин и др., 2023]. Именно они и стали объектом первоочередных исследований. Описание минералов железа в донных осадках в условиях техногенного воздействия встречается и в других работах [Янин, 2018; Малахов и др., 2010; Блинов и др., 2003].

Среди аутигенных минералов доминируют гидроксиды и оксиды (магнетит) железа, в то время как сульфиды (пирит, марказит) и карбонаты железа (сидерит) занимают резко подчиненное положение. Показательно, что речные отложения бассейна Тузлова почти вдвое превосходят соответствующие образования бассейна Северского Донца по суммарному количеству аутигенных минералов железа (в расчете на осадок в целом).

Водные оксиды железа в речных отложениях Восточного Донбасса представлены рентгеноаморфными агрегатами ферригидрита в виде налетов, пленок и волокнистых форм. При дальнейшей дегидратации и понижении редокс-потенциала ферригидрит, как известно, переходит в гидрогетит, гётит, гематит и далее в магнетит. Однако, важно отметить, что все перечисленные минералы, кроме магнетита, в изучаемых осадках нами не обнаружены. Поэтому вполне вероятно, что формирование магнетита за счет гидроокислов железа осуществлялось в основном напрямую, минуя промежуточные стадии. А это, в свою очередь, говорит о высокой скорости диагенетического минералообразования в неравновесных условиях [Закруткин и др., 2023].

Аутигенному магнетиту в последние годы уделяется много внимания. Это и естественно, поскольку многочисленные исследования наглядно продемонстрировали его широкие возможности при решении широко спектра научных и прикладных задач, в первую очередь как носителя фундаментальной информации об условиях формирования и эволюции Земли, её коры, месторождений полезных ископаемых [Лихачев, 2017], при палеотектонических реконструкциях [Bakhmutov, Poliachenko, 2014], а также при выявлении особенностей раннедиагенетического минералообразования в современных осадках [Косарева и др., 2014; Опекунов и др., 2021; Рейхард и др., 2015; Bauer et al., 2020; Channell et al., 2013; Dinarès-Turell et al., 2003; Lin et al., 2020; Roberts et al., 2012].

В речных отложениях восточного Донбасса магнетит встречается в виде мелких (3–4 мкм) хорошо сохранившихся одиночных кристаллов октаэдрической, реже ромбододекаэдрической формы, либо их агрегатов, сцементированных глинистым веществом. Иногда наблюдаются шестигранные таблитчатые формы, свойственные мушкетовиту – продукту замещения гематита магнетитом. Его кристаллы обычно более крупные, ступенчатого строения, что свидетельствует о быстром их росте при высоких значениях пересыщения кристаллизационного раствора [Закруткин и др., 2023].

Среди аутигенных сульфидов наиболее распространённым и устойчивым является пирит. Значительно реже встречается марказит. Кроме этих минералов в донных осадках присутствует гидротроилит – рентгеноаморфный коллоидальный водный моносульфид железа ($\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), представляющий начальную стадию выпа-

дения сульфидных минералов. Отмечается он в виде налетов, пятен, колломорфных агрегатов, мелких вкраплений.

Пирит в донных отложениях восточного Донбасса представлен главным образом фрамбоидальными формами размером 5-10 мкм [Закруткин и др., 2023]. Помимо фрамбоидов встречаются одиночные хорошо огранённые октаэдрические кристаллы, а также россыпи микрокристаллов, отражающие последовательность формирования фрамбоидального пирита от зарождения свободных индивидов до сфероидов и глобул. Подобная последовательность является типичной для ранне-диагенетического пирита [Нерадовский и др., 2009].

Условия, благоприятные для формирования марказита, возникают в донных отложениях, скорее всего, лишь на строго локальных участках, вероятно, в местах непосредственного влияния кислых шахтных вод. Однако, необходимо иметь в виду, что марказит метастабилен по отношению к пириту и со временем превращается в пирит, поэтому в виде самостоятельных выделений он практически не встречается в исследуемых отложениях. Изредка его можно обнаружить совместно с пиритом в виде смешанных форм с признаками незавершённого фазового перехода марказита в пирит.

Сидерит в изученных донных осадках присутствует в виде преимущественно совместных с кальцитом агрегатов кристаллов размером 20-30 мкм. Помимо сидерита, как самостоятельного минерала, в донных отложениях нередко встречаются железосодержащий кальцит (феррокальцит) и кальцийсодержащий сидерит (сидеритоп). Морфологически они схожи с сидеритом и отличаются от него по химическому составу.

Ниже, по аналогии с железом, демонстрируются особенности распределения указанных минералов в донных отложениях в зависимости от категории рек. Как видно из данных таблицы 2, по суммарному количеству аутигенных минералов в донных отложениях малые реки (1,21%) вдвое превосходят средние (0,6%). Это было ожидаемо, поскольку, как отмечалось ранее, именно малые реки лидируют в сравнении со средними и по количеству железа, и по количеству пелитового материала в речных осадках. А как показывают исследования ряда авторов [Закруткин и др., 2023; Астахова, 2007; Rogozin et al., 2016], диагенетические преобразования минералов в ряду гидроокислы железа – магнетит – пирит – сидерит происходят в существенно пелитовых осадках, обогащенных органическим веществом.

Таблица 2/ Table 2

Средние содержания железа (в мг/кг) и его основных минералов (в % на осадок) в донных отложениях малых и средних рек / Average content of iron (mg/kg) and its main minerals (in % per sediment) in small and middle river sediments

Показатели/ Characteristic	Малые реки/ Small rivers	Средние реки/ Middle rivers
Содержание железа/ Iron content	35307	23860
Гидроокислы железа/ Iron hydroxides	1,02	0,58
Магнетит/ Magnetite	0,18	0,02
Пирит, марказит, %/ Pyrite, marcasite	0,00	0,01
Сидерит/ Siderite	0,01	0,00
Сумма аутигенных минералов железа, %/ Total content of authigenic iron minerals, %	1,21	0,60

Как уже неоднократно отмечалось, основным источником железа в речных системах Восточного Донбасса являются техногенные шахтные воды. Для оценки влияния последних на речные отложения проведены исследования в пределах трех групп створов малых рек, в наибольшей степени подверженных техногенному воздействию: 1) верхних, расположенных в 500 м выше сброса в речную сеть техногенных шахтных вод; 2) нижних, расположенных в 100 и 500 м от источника ниже по течению реки и 3) устьевых.

На рисунке 3 показано распределение содержаний железа в валовых пробах речных отложений и выделенной из них пелитовой фракции по группам створов. Донные осадки створов, расположенных ниже сброса техногенных шахтных вод, как и следовало ожидать, характеризуются наибольшими содержаниями железа, как в валовой пробе, так и в пелитовой фракции. Причем наибольший эффект воздействия зафиксирован уже в непосредственной близости от источника. Он еще прослеживается на расстоянии 500 м и исчезает в устьевых створах, расположенных в 20-40 км от мест поступления в речную сеть техногенных шахтных вод. Обращают внимание более низкие содержания Fe в устьевых створах по сравнению с верхними. Дело в том, что в пределах Восточного Донбасса верхние створы зачастую не являются фоновыми. Многие малые реки, особенно в бассейне Тузлова, берут свое начало в пределах техногенно преобразованных территорий, поблизости от крупных шахт и населенных пунктов (промышленных центров). Кроме того, железо с шахтными водами может поступать не только по известным нам путям, с водоизливом из шахт и отстойников, но и «снизу», с подземными водами, и в этом случае можно говорить не о точечном, а о диффузном загрязнении, которое может проявляться и выше мест сброса техногенных шахтных вод.

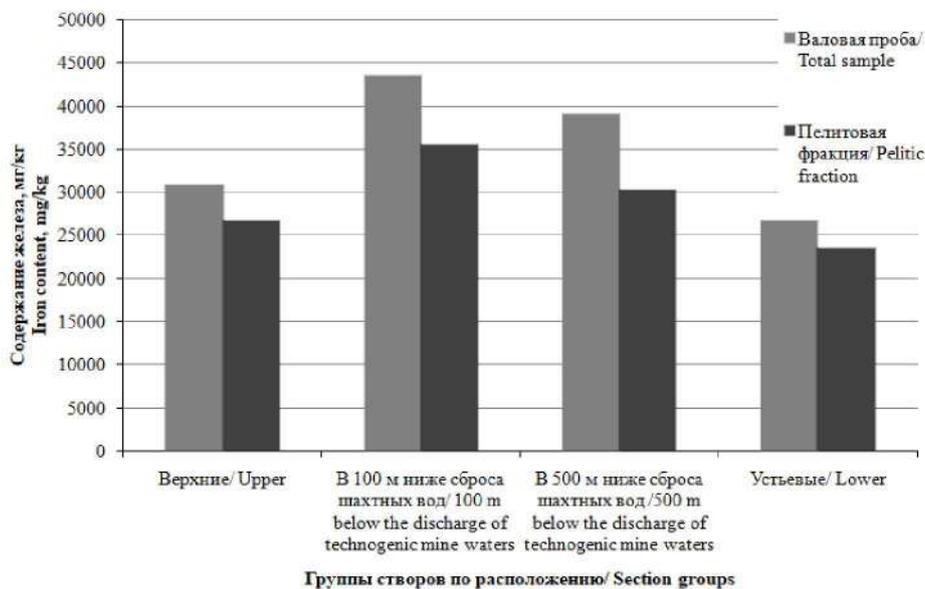


Рис. 3. Распределение содержаний железа в донных отложениях в зависимости от группы створов/

Fig. 3. Distribution of iron content in river sediments depending on the sections group

В таблице 3 показано распределение основных минералов железа в пределах створов, расположенных выше и ниже сброса техногенных шахтных вод. Не удивительно, что картина в целом напоминает картину распределения железа (см. ри-

сунок 3). Видно, в частности, что сумма содержаний аутигенных минералов железа в осадках даже в створах, расположенных в 500 м ниже техногенных источников (0,83%), заметно выше их количества в верхних створах (0,68 %). Причем, основу этой суммы составляют гидроокислы железа и магнетит. Сидерит же и пирит встречаются в виде единичных зерен. Это характерно и в целом для донных отложений, как малых, так и средних рек (см. таблицу 2).

Таблица 3/ Table 3

Распределение железа (в мг/кг) и его основных минералов (в % на осадок) в речных отложениях по группам створов /
Distribution of iron (mg/kg) and its main minerals (in % per sediment) in river sediments by section groups

Показатели/ Characteristic	Створы/ Section group		
	Верхние/ Upper	В 500 м ниже сброса техногенных шахтных вод/ 500 m below the discharge of technogenic mine waters	Устьевые/ Lower
Содержание железа / Iron content	24400	28875	23460
Гидроокислы железа / Iron hydroxides	0,65	0,76	0,59
Магнетит/ Magnetite	0,03	0,06	0,01
Пирит, марказит/ Pyrite, marcasite	0,00	0,00	0,00
Сидерит/ Siderite	0,00	0,01	0,00
Сумма аутигенных минералов железа, %/ Total content of authigenic iron minerals, %	0,68	0,83	0,60

Отсюда вытекает один из важных выводов, раскрывающих особенности диагенетического минералообразования в речных отложениях Восточного Донбасса [Закруткин и др., 2023]: на раннем этапе диагенеза изученных донных осадков наиболее предпочтительным с энергетической точки зрения является формирование из гидроокислов железа магнетита. Именно «магнетитовая реакция» начинается раньше, протекает быстрее и с меньшими затратами органического вещества – мощного источника энергии восстановительного процесса, чем «сидеритовая» и тем более «пиритовая».

Выводы

1. По содержанию железа речные отложения бассейна Тузлова превосходят аналогичные образования в бассейне Северского Донца, что особенно заметно при сравнении пелитовых фракций, которые являются, как известно, основным носителем многих металлов, включая железо. Такое превосходство обусловлено тем, что в первом из названных бассейнов нагрузка высокоминерализованных, обогащенных железом техногенных шахтных вод на речные системы значительно выше, чем во втором.

2. При сравнении между собой по количеству железа донных отложений малых и средних рек выяснилось, что наибольшие средние содержания Fe как в осадке в целом, так и в пелитовой фракции характерны для малых рек. Установлена также зависимость между количеством пелитовой фракции и содержанием железа в донных отложениях, вне зависимости от размера реки: с уменьшением доли пелитового компонента в речных отложениях снижается и концентрация в них железа. Малые реки также превосходят средние и по количеству аутигенных минералов железа.

3. Речные отложения подвергаются существенному влиянию техногенных шахтных вод, в результате чего в них образуются довольно обширные (выходящие за пределы 500 м) литохимические ореолы рассеяния Fe. В этой связи появляется возможность, проводя литохимическое опробование донных отложений, выявлять скрытые места поступления техногенных шахтных вод в речную сеть.

Литература

1. Астахова Н.В. Аутигенные образования в позднекайнозойских отложениях окраинных морей Востока Азии. / Владивосток: Дальнаука, 2007. – 244 с.
2. Блинов С.М., Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А. Современное техногенное минералообразование в аллювии рек Кизеловского угольного бассейна. // Российская академия наук – Уральское отделение – Минералогия техногенеза. – 2003. – Т. 4. – С. 20–38.
3. Гавришин А.И. Шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на состав подземных и поверхностных вод региона. // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45. № 5. – С. 555–565. DOI: 10.1134/S0321059618050085.
4. Гавришин А.И., Борисова В.Е., Торопова Е.С. Распределение химического состава шахтных вод на территории Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №2. – С. 5–15. DOI: 10.23671/VNC.2018.2.13923.
5. Глазовский Н.Ф. Техногенные потоки вещества в биосфере. // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука. – 1982. – С. 7–28.
6. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Гибков Е.В., Складенко Г.Ю. Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. Т. 13. № 3. – С. 102–121. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008.
7. Закруткин В.Е., Складенко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества: монография. / Ростов н/Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – 172 с.
8. Косарева Л.Р., Нургалиев Д.К., Фаттахов А.В., Кузина Д.М., Крылов П.С. Предварительные данные о магнитных свойствах осадков озера Балхаш (Казахстан). // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. – 2014. Том 156, кн.1. – С. 137–147.
9. Лихачев А.П. Условия образования магнетита и его рудных скоплений // Отечественная геология. – 2017. – № 4. – С. 44–53.
10. Малахов И.Н., Алехина Т.Н., Иванченко В.В., Бобко А.А., Журавель Н.Р. Условия формирования донных осадков устьевых участков рек Днепровско-Бугского лимана в условиях антропогенной нагрузки. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – №2. – С. 69–78.
11. Мохов А.В., Журбицкий Б.И., Карасев Г.К., Дымна А.И. Влияние угольного комплекса на геоэкологическую ситуацию. // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / гл. ред. Г.Г. Матишов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. – С. 129–138.
12. Нерадовский Ю.Н., Даувальтер В.А., Савченко Е.Э. Генезис фрамбоидального пирита в современных осадках озер (Кольский полуостров). // Записки РМО. – 2009. – №6. – С. 50–56.
13. Опекунов А.Ю., Янсон С.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю. Минеральные фазы металлов в техногенных осадках рек Санкт-Петербурга при экстремальном загрязнении. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2021. – Т. 66, выпуск 2. – С. 267–288. DOI: 10.21638/spbu07.2021.205.
14. Рейхард Л.Е., Новигатский А.Н., Алексеева Т.Н., Дара О.М., Коченкова А.И., Маторина Н.С. Диагенетическое минералообразование в современных донных осадках Белого моря. // XII Съезд Российского минералогического общества «Минералогия во всем пространстве сего слова» (сборник конференции). Горный университет, г. Санкт-Петербург,

Октябрь. 2015. – С. 52–55.

15. Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). / М.: НПИ «АРСО», 2018. – 415 с.

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

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

18. Channell J.E., Hodell D.A., Margari V., Skinner L.C., Tzedakis P.C., Kesler M.S. Biogenic magnetite, detrital hematite, and relative paleointensity in Quaternary sediments from the Southwest Iberian Margin. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2013. – Vol. 376. – pp. 99–109. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.06.026.

19. Dinarès-Turell J., Hoogakker B.A.A., Roberts A.P., Rohling E.J., Sagnotti L. Quaternary climatic control of biogenic magnetite production and eolian dust input in cores from the Mediterranean Sea. // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2003. – Vol. 190. – pp. 195–209. DOI: 10.1016/S0031-0182(02)00605-3.

20. Lin Z., Sun X., Roberts A. P., Strauss H., Lu Y., Yang X., Gong J., Li G., Brunner B., Peckmann J. A novel authigenic magnetite source for sedimentary magnetization. // *Geology*. – 2020. – Vol. 49, No. 4. – pp. 360–365. DOI: 10.1130/G48069.1.

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

22. Rogozin D.Yu., Balaev D.A., Semenov S.V., Shaikhutdinov K.A., Bayukov O.A. Magnetic Properties of Bottom Sediments from Meromictic Shira Lake (Siberia, Russia). // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 469. – pp. 819–823. DOI: 10.1134/S1028334X16080067.

References

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

2. Blinov S.M., Maksimovich N.G., Menshikova E.A. Modern technogenic mineral formation in the alluvium of the rivers of the Kizelovsky coal basin. Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Mineralogy of Technogenesis. 2003. Vol. 4. pp. 20–38. (In Russ.)

3. Gavrishin A.I. Mine waters of Eastern Donbass and their influence on the composition of groundwater and surface waters in the region. *Water resources*. 2018. Vol. 45. No. 5. pp. 555–565. DOI: 10.1134/S0321059618050085. (In Russ.)

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

5. Glazovsky N.F. Technogenic flows of matter in the biosphere. Mining and geochemistry of natural ecosystems. Moscow. Nauka. 1982. pp. 7–28. (In Russ.)

6. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu. Authigenic iron minerals in river sediments of Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 102–121. DOI: 10.46698/VNC.2023.95.74.008. (In Russ.)

7. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. Surface and underground waters within the technogenically disturbed geosystems of Eastern Donbass: formation of chemical composition and quality assessment: monograph. – Rostov-on-Don: Southern Federal University. 2016. 172 p. (In Russ.)

8. Kosareva L.R., Nurgaliev D.K., Fattakhov A.V., Kuzina D.M., Krylov P.S. Preliminary data on the magnetic properties of sediments from Lake Balkhash (Kazakhstan). *Scientific notes of Kazan University. Natural Sciences*. 2014. Vol. 156. Book. 1. pp. 137–147. (In Russ.)
9. Likhachev A.P. The conditions of magnetite and its ore clusters formation. *Russian Geology*. 2017. No. 4. pp. 44–53. (In Russ.)
10. Malakhov I.N., Alekhina T.N., Ivanchenko V.V., Bobko A.A., Zhuravel N.R. Conditions for the formation of bottom sediments in the mouth areas of rivers of the Dnieper-Bug estuary under conditions of anthropogenic load. *Geology and mineral resources of the World Ocean*. 2010. No. 2. pp. 69–78. (In Russ.)
11. Mokhov A.V., Zhurbitsky B.I., Karasev G.K., Dymna A.I. The influence of the coal complex on the geo-ecological situation. In: *Problems and prospects for the integrated development of mineral resources of Eastern Donbass*. Ed. G.G. Matishov. Rostov-on-Don: SSC RAS. 2005. pp. 129–138. (In Russ.)
12. Neradovsky Yu.N., Dauwalter V.A., Savchenko E.E. Genesis of framboidal pyrite in modern sediments of lakes (Kola Peninsula). *Notes of RMO*. 2009. No. 6. pp. 50–56. (In Russ.)
13. Opekunov A.Yu., Yanson S.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu. Mineral phases of metals in technogenic sediments of St. Petersburg rivers under extreme pollution. *Bulletin of St. Petersburg University*. 2021. Vol. 66. Issue 2. pp. 267–288. DOI: 10.21638/spbu07.2021.205. (In Russ.)
14. Reichard L.E., Novigatsky A.N., Alekseeva T.N., Dara O.M., Kochenkova A.I., Matorina N.S. Diagenetic mineral formation in modern bottom sediments of the White Sea. In: *Proc. XII Cong. of the Rus. Miner. Soc. Mineralogy in the entire space of this word*. Mining University, St. Petersburg. 2015. pp. 52–55. (In Russ.)
15. Yanin E.P. Technogenic river silts (formation conditions, material composition, geochemical features). Moscow. NP “ARSO”, 2018. 415 p. (In Russ.)
16. Bakhmutov V.G., Poliachenko I.B. New paleomagnetic data on the Silurian and Devonian sedimentary rocks from Podolia, SW Ukraine, and kinematics of the East European platform in the Middle Paleozoic. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5. Issue 4. pp. 1045–1058. DOI: 10.5800/GT-2014-5-4-0167.
17. Bauer K.W., Byrne J.M., Kenward P.A., Simister R.L., Michiels C.C., Friese A., Vuillemin A., Henny C., Nomosatryo S., Kallmeyer J., Kappler A., Smit M.A., Francois R., & Crowe S.A. Magnetite biomineralization in ferruginous waters and early Earth evolution. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. Vol. 549. 116495. DOI:10.31223/osf.io/prhuz.
18. Channell J.E., Hodell D.A., Margari V., Skinner L.C., Tzedakis P.C., Kesler M.S. Biogenic magnetite, detrital hematite, and relative paleointensity in Quaternary sediments from the Southwest Iberian Margin. *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 376. pp. 99–109. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.06.026.
19. Dinarès-Turell J., Hoogakker B.A.A., Roberts A.P., Rohling E.J., Sagnotti L. Quaternary climatic control of biogenic magnetite production and eolian dust input in cores from the Mediterranean Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2003. Vol. 190. pp. 195–209. DOI: 10.1016/S0031-0182(02)00605-3.
20. Lin Z., Sun X., Roberts A. P., Strauss H., Lu Y., Yang X., Gong J., Li G., Brunner B., Peckmann J. A novel authigenic magnetite source for sedimentary magnetization. *Geology*. 2020. Vol. 49. No. 4. pp. 360–365. DOI: 10.1130/G48069.1.
21. Roberts A.P., Chang L., Heslop D., Florindo F., & Larrasoña J.C. Searching for single domain magnetite in the “pseudo-single-domain” sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations. *Journal of Geophysical Research*. 2012. Vol. 117. B08104. DOI:10.1029/2012JB009412.
22. Rogozin D.Yu., Balaev D.A., Semenov S.V., Shaikhutdinov K.A., Bayukov O.A. Magnetic Properties of Bottom Sediments from Meromictic Shira Lake (Siberia, Russia). *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 469. pp. 819–823. DOI: 10.1134/S1028334X16080067.

УДК 553.6; 553.5; 691.42; 691.43

DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008

Оригинальная статья

Особенности цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана

А.Р. Юсупов , С.А. Мамаев , З.А. Юсупов , А.С. Мамаев 

Институт геологии Дагестанского научного центра РАН,
Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75,
e-mail: dangeogis@mail.ru

Статья поступила: 11.09.2023, доработана: 24.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Резюме: Актуальность работы. Содержание ОКТ (опал-кристобалит-тридимитовой) фазы и цеолитов в кремнисто-карбонатных породах Дагестана суммарно достигает до 50% при содержании кальцита выше 30%. Нами проводились лабораторные исследования данных пород, в которых содержание ОКТ фазы составляет около 30%, цеолитов до 27%, кальцита до 26%. В результате исследований установлено, что цеолитсодержащие кремнисто-карбонатные породы, распространенные в эоценовых отложениях на территории Республики Дагестан, можно использовать для получения теплоизоляционных материалов. **Цель исследования.** Целью наших исследований является рассмотрение данных пород как сырья для производства строительных материалов, в соответствии с результатами лабораторно-технологического изучения. **Методы исследований.** Определялись прочность полученных изделий при сжатии и изгибе, также плотность и теплотехнические свойства. Изучение теплоизоляционных характеристик проводилось в соответствии с ГОСТ 16381–77 «Материалы строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования». Методом рентгенографического фазового анализа определялся минеральный состав образцов, также получен химический состав исследуемого образца. **Результаты исследований.** Результаты исследования сырья показали, что карбонатно-кремнистая цеолитсодержащая порода, по составу и свойствам соответствующая материалу пробы ЛТ-1, может быть использована в качестве заполнителя в составе композиционных смесей со связующим для приготовления твердых строительных растворов пониженной теплопроводности, легких конструктивно-теплоизоляционных и других материалов.

Ключевые слова: цеолиты, цеолитсодержащие породы, кремнистые породы, кальцит, эоцен, опал-кристобалит-тридимит, теплоизоляционные материалы, Дагестан.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Института геологии ДФИЦ РАН № НИОКТР 1021060808457-2-1.5.6 и № НИОКТР 1021060808460-6-1.5.6.

Для цитирования: Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Особенности цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 99–107. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008

DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008

Original paper

Features of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan

A.R. Yusupov^{ORCID}, S.A. Mamaev^{ORCID}, Z.A. Yusupov^{ORCID}, A.S. Mamaev^{ORCID}

Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
75 Yaragskogo Str., Makhachkala 367010, Russian Federation,
e-mail: dangeogis@mail.ru

Received: 11.09.2023, revised: 24.11.2023, accepted: 04.12.2023

Abstract. Relevance. The content of the OCT (opal-cristobalite-tridymite) phase and zeolites in the siliceous-carbonate rocks of Dagestan reaches a total of 50% with a calcite content above 30%. The laboratory studies of these rocks were conducted and OCT is about 30%, zeolites up to 27%, calcite up to 26%. As a result of research, it has been established that zeolite-containing siliceous-carbonate rocks, common in Eocene deposits on the territory of the Republic of Dagestan, can be used to obtain thermal insulation materials. **Aim.** The aim of research is to consider these rocks as raw materials for the production of building materials, in accordance with the results of laboratory and technological studies. **Research methods.** The strength of the resulting products in compression and bending, as well as density and thermal properties were determined. The study of thermal insulation characteristics was carried out in accordance with GOST 16381–77 “Thermal insulating materials for construction. Classification and general technical requirements.” The mineral composition of the samples was determined by the method of x-ray phase analysis, and the chemical composition of the studied sample under study was also obtained. **Results.** The results of the study of raw materials showed that carbonate-siliceous zeolite-containing rock, which in composition and properties corresponds to the material of the LT-1 sample, can be used as composite mixtures with a binder for the preparation of solid mortars of low thermal conductivity, lightweight structural thermal insulation and other materials.

Keywords. Zeolites, zeolite-containing rocks, siliceous rocks, calcite, Eocene, opal-cristobalite-tridymite, Thermal insulation materials, Dagestan.

Acknowledgement: *The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geology of the Far Eastern Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences No. NIOKTR 1021060808457-2-1.5.6 and No. NIOKTR 1021060808460-6-1.5.6.*

For citation: Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S., Features of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 99-107. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008

Введение

Цеолитсодержащие кремнисто-карбонатные породы и цеолиты находят применение в разных отраслях сельского хозяйства, промышленности, в здравоохранении, производстве нетрадиционных видов строительных материалов, в области охраны окружающей среды и других областях [Талпа и др., 1992; Халиков, 2014; Хардигов, 2005; Хардигов и др., 1992; Горшков, Гладких, 2010; Ma et al., 2018; Ivanov, 2019]. С каждым годом разрабатываются новые все более совершенные технические условия применения различных видов цеолитсодержащего сырья. [Горшков, Гладких, 2010; Давидюк, Несветаев, 2010; Иванова и др., 2003; Guoa et al., 2012].

ОКТ фаза также является природным сорбентом наряду с цеолитами. Физико-химические свойства ОКТ дополняют и расширяют основные показатели пород и, в конечном итоге, влияют на технологические свойства, качество цеолитового сырья и возможные области его применения [Конюхова, Дистанов, 2000; Entropa et al., 2010].

Теплоизоляционные материалы, полученные из цеолитсодержащих пород по современным технологиям должны соответствовать определенным требованиям. Изделия полученные из этого сырья должны иметь теплопроводность менее $0,175 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, при удельном весе менее 600 кг/м^3 . Также должны иметь стабильные физико-механические и теплотехнические свойства; отсутствие токсических веществ. [Иванова и др., 2003; Гагарин, Козлов, 2011; Жуков и др., 2015; Панов и др., 2008; Мамонтов и др., 2013; Моргун и др., 2015; Тотурбиев и др., 2022; Wei Li et al., 2012].

Цель работы. Вопрос создания минерально-сырьевой базы цеолитов в европейской части России является весьма актуальным. Одной из наиболее перспективных с геологической точки зрения является территория Северного Кавказа и юга Русской платформы [Юсупов и др., 2021; Юсупов и др., 2022].

Кремнистые породы опал-кристобалит-тридимитового (ОКТ) состава с содержанием цеолитов (10–50 %) развиты на Левашинском и Рубасчайском участках Республики Дагестан (РД) [Юсупов и др., 2021; Юсупов и др., 2022]. На других участках региона такие породы проявлены в ограниченном объеме. Впервые эти породы Дагестана нами рассматриваются как сырье для получения теплоизоляционных материалов. Это имеет большое значение для республики и других регионов России при современном растущем объеме строительства.

Методы исследований



Общая характеристика пробы. Работа проведена на измельченных продуктах цеолитсодержащих пород, отобранных на месторождении Дюбек (рис. 1) (пробы №№ 1–2), (пробы №№ 3–4) и (пробы №№ 5–6). Исходные пробы имели одинаковую массу. Для испытаний пробы были объединены в одну лабораторную технологическую пробу с общей массой 6,3 кг. Она замаркирована как ЛТ-1.

Рис. 1. Схема расположения месторождения Дюбек. /

Fig. 1. Layout of the Dyubek field.

Минеральный состав пробы ЛТ-1 следующий: глинистые минералы – 8%, кальцит – 26%, кварц – 6%, ОКТ – 30%, цеолиты – 27%, полевые шпаты – 3%. В химическом составе пробы SiO_2 – 48,0–63,55%,

CaO – 7,28-24,69%, Al₂O₃ – 3,57-10,56%, Fe₂O₃ – 0,97-2,51%, MgO – 0,49-1,57%, Na₂O – 0,27–1,09%, K₂O – 0,71–1,09%. Потери при прокаливании по частным пробам изменяются от 11,14 до 20,66 %. Наибольший размер частиц не превышает 1 мм. Содержание частиц крупности – 1,0+0,5 мм составляет 15 %, – 0,5+0,0 мм – 85%.

Вспученных частиц в пробе, прокаленной при 1000 °С, не обнаружено.

Изучение теплоизоляционных характеристик проводилось в соответствии с ГОСТ 16381–77 «Материалы строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования». По ГОСТ, теплоизоляционные материалы и изделия строительного назначения должны удовлетворять следующим требованиям: теплопроводность не больше 0,175 Вт/м·К; плотность (объемная масса) не больше 600 кг/м³; стабильные физико-механические и теплотехнические свойства; отсутствие токсических веществ.

По теплопроводности материалы и изделия подразделяются на классы: «А» – низкой теплопроводности (до 0,06 Вт/м·К); «Б» – средней теплопроводности (св. 0,06 до 0,115 Вт/м·К); «В» – повышенной теплопроводности (св. 0,115 до 0,175 Вт/м·К). Материалы и изделия с низкой теплопроводностью относятся к наиболее качественным.

По возгораемости теплоизоляционные материалы и изделия подразделяются на группы: негоряемые; трудно сгораемые; сгораемые.

По плотности материалы подразделяются на «ОНП» - особо низкой плотности (меньше 75 кг/м³); «НП» - низкой плотности (от 75 до 175 кг/м³); «СП» средней плотности (от 175 до 350 кг/м³); «ПЛ» - плотные (от 350 до 600 кг/м³). Для тепловой изоляции промышленного оборудования и трубопроводов применяют материалы плотностью свыше 400 кг/м³, а для тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений только при соответствующих технико-экономических обоснованиях применяются материалы плотностью свыше 500 кг/м³ [Панов и др., 2008; Куковский, 1966; Наумов и др., 1959; Роговой, 1974; Uygunoğlu et al., 2011; Johannes et al., 2011].

Результаты исследований

Технологическая оценка возможности применения в производстве теплоизоляционных изделий из цеолитсодержащих пород проводилась на исходной и прокаленной при 1000°С пробах с крупностью частиц меньше 1 мм.

Исходная сухая карбонатно-кремнистая цеолитсодержащая порода имеет насыпную массу 960 кг/м³ и теплопроводность в слое – 0,143 Вт/м·К (определение теплопроводности проводилось на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «100» при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности»).

Обожженная при температуре 1000°С цеолитовая порода имеет насыпную массу 750 кг/м³, что меньше не обожженной породы, в 1,3 раза. Теплопроводность обожженной породы в слое – 0,142 Вт/м·К, что соответствует теплопроводности исходного материала.

Таким образом, по теплопроводности как исходная, так и обожженная цеолитсодержащие породы относятся к зернистым негоряемым твердым теплоизоляционным материалам класса «В» (с теплопроводностью от 0,115 до 0,175 Вт/м·К); подобная теплопроводность соответствует значениям ГОСТ 16381-77 «Материалы

строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования». При этом насыпная масса пробы ($750-960 \text{ кг/м}^3$) не удовлетворяет требованиям указанного ГОСТа (600 кг/м^3).

Повышенная теплопроводность карбонатно-кремнистой цеолитсодержащей породы позволяет использовать ее в качестве теплоизоляционного заполнителя при производстве строительных материалов с пониженной теплопроводностью и, возможно, строительных растворов, применяемых для кладки и штукатурки, а также при изготовлении конструкционно-теплоизоляционных материалов, таких как легкие бетоны.

Для определения теплопроводности изделий, полученных с карбонатно-кремнистыми цеолитсодержащим заполнителем, изготавливались плитки размером $100 \times 100 \times 20$ мм. В качестве вяжущего использовались гипс, цемент, известь. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Плотность и теплопроводность изделий из смесей гипс, цемент, известь, ЛТ-1 /
Density and thermal conductivity of products made from mixtures of gypsum, cement,
lime, LT-1**

Сырьевая смесь / Raw mixture	Плотность, кг/м^3 / Density, kg/m^3	Теплопроводность, Вт/м К / Thermal conductivity, W/m K
гипс 50 % + ЛТ-1 исходная 50 % / gypsum 50% + LT-1 original 50%	1220	0,287
гипс 50 % + ЛТ-1 прокаленная 50 % / gypsum 50% + LT-1 calcined 50%	1360	0,264
цемент 1 ч + ЛТ-1 сырая 3 ч / cement 1 h + LT-1 raw 3 h	1360	0,319
цемент 1 ч + ЛТ-1 прокаленная 3 ч / cement 1 h + LT-1 calcined 3 h	1230	0,270
известь 1 ч + ЛТ-1 сырая 4 ч / lime 1 h + LT-1 raw 4 h	1180	0,262
известь 1 ч + ЛТ-1 прокаленная 4 / lime 1 h + LT-1 calcined 4	1070	0,205
цемент 1 ч + гипс 2 ч + ЛТ-1 сырая 6 ч / cement 1 h + gypsum 2 h + LT-1 raw 6 h	1350	0,275
цемент 1 ч + известь 2 ч + ЛТ-1 сырая 6 ч / cement 1 h + lime 2 h + LT-1 raw 6 h	1220	0,287

Из табл. 1 видно, что по теплопроводности ($0,205 - 0,319 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) плитки, изготовленные на основе вяжущих, представленных цементом, известью и гипсом или их смесью, с применением заполнителей из сырой или термообработанной цеолитсодержащей породы, не отвечают требованиям ГОСТ 16381-77 (теплопроводность не должна превышать $0,175 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). Однако теплопроводность этих изделий значительно ниже, чем теплопроводность изделий, приготовленных на основе аналогичных вяжущих с применением кварцевого песка ($0,367-0,540 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), а также изделий, изготовленных только из одного цемента ($0,723 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) или гипса ($0,620 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), и керамического полнотелого кирпича ($0,566 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). Поэтому при изготовлении строительных материалов и изделий с пониженной теплопроводностью применение цеолитсодержащей породы в качестве заполнителя является бо-

лее эффективным по сравнению с кварцевым заполнителем, или по сравнению с изделиями, изготавливаемыми на основе одних указанных выше вяжущих без каких-либо заполнителей.

Прочностные свойства изделий, полученных с цеолитсодержащим заполнителем, определялись на образцах, изготовленных способом пластического формования в виде прямоугольных призм размером 160×40×40 мм. Определение прочности проводили на изделиях в возрасте 28 суток по методике ГОСТ 8462–85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе». Результаты испытания сведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

**Прочность при сжатии и прочность при изгибе изделий
из смесей гипс, цемент, известь, ЛТ-1 /
Compressive strength and bending strength of products from mixtures
of gypsum, cement, lime, LT-1**

Сырьевая смесь / Raw mix Strength	Прочность при сжатии, МПа / In compression, MPa	Прочность при изгибе, МПа / Strength at bending, MPa
гипс 50 % + ЛТ-1 исходная 50 % / gypsum 50% + LT-1 original 50%	1,81	0,87
гипс 50 % + ЛТ-1 прокаленная 50 % / gypsum 50% + LT-1 calcined 50%	2,92	1,91
цемент 1 ч + ЛТ-1 сырая 3 ч / cement 1 h + LT-1 raw 3 h	8,36	1,24
цемент 1 ч + ЛТ-1 прокаленная 3 ч / cement 1 h + LT-1 calcined 3 h	4,25	1,53
известь 1 ч + ЛТ-1 сырая 4 ч / lime 1 h + LT-1 raw 4 h	1,15	0,40
известь 1 ч + ЛТ-1 прокаленная 4 / lime 1 h + LT-1 calcined 4	0,48	0,42

Дополнительно были проведены испытания по *возможностям использования цеолитсодержащей породы для приготовления строительных растворов*. Согласно ГОСТ 28013-98 «Растворы строительные. Общие технические условия», цеолитсодержащие породы могут быть применены для изготовления строительных растворов, которые по прочности при сжатии отвечают требованиям на марки М4 (на основе сырьевой смеси «известь 1 ч + ЛТ-1 прокаленная 4 ч»), марки М10 (на основе сырьевой смеси «известь 1 ч + ЛТ-1 сырая 4 ч», «гипс 50 % + ЛТ-1 сырая 50 %»), марки М25 (на основе сырьевой смеси «цемент 1 ч + ЛТ-1 прокаленная 3 ч»), марки М50 (на основе сырьевой смеси «гипс 50 % + ЛТ-1 прокаленная 50 %»), марки М75 (на основе сырьевой смеси «цемент 1 ч + ЛТ-1 сырая 3 ч»). По плотности затвердевшие растворы в проектном возрасте относятся к легким растворам (плотность меньше 1500 кг/м³).

Вывод (предварительный): карбонатно-кремнистая цеолитсодержащая порода, по составу и свойствам соответствующая материалу пробы ЛТ-1, может быть использована в качестве заполнителя в составе композиционных смесей со связующим для приготовления твердых строительных растворов пониженной теплопроводности, легких конструкционно-теплоизоляционных и других материалов.

Литература

1. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий». // Строительные материалы. – 2011. – № 8. – С. 2–6.
2. Горшков А.С., Гладких А.А. Мероприятия по повышению энергоэффективности в строительстве. // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 246–250.
3. Давидюк А.Н., Несветаев Г.В. Эффективные материалы и конструкции для решения проблемы энергосбережения зданий. // Жилищное строительство. – 2010. – № 3. – С. 16–20.
4. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В. Строительные системы и особенности применения теплоизоляционных материалов. // Жилищное строительство. – 2015. – № 7. – С. 49–51.
5. Иванова А.С., Черных В.Н. Новые теплоизоляционные материалы (их свойства и области применения). // Неделя науки СПбПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч2. – 2003 – С. 116–117.
6. Колюхова Т.П., Дистанов У.Г. Технологическая классификация смешанных кремнистых цеолитсодержащих пород. // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 9. – С. 45–46.
7. Куковский Е.Г. Особенности строения и физико-химические свойства глинистых минералов. / Киев. Наукова Думка. – 1966. 132 с.
8. Мамонтов А.А., Ярцев В.П., Струлев С.А. Анализ влажности различных утеплителей в ограждающих конструкциях здания при эксплуатации в отопительный период. // Academia. Архитектура и строительство. – 2013. – № 4. – С. 117–119.
9. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Черенкова И.А. К вопросу об эффективности теплоизоляции фасадов гражданских зданий. // Жилищное строительство. – 2015. – № 4. – С. 21–24.
10. Наумов М.М., Кашкаев И.С., Буз М.А., Шейнман Е.Ш. Технология глиняного кирпича. – М.: Стройиздат. 1959. 16. с.
11. Панов Ю.Т., Чинова Л.А., Кудряшов А.В., Панов С.Ю., Панкратов А.В. Влияние плотности и дисперсных наполнителей на теплопроводность пенопластов. // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51. Вып. 2. – С. 92–94.
12. Роговой М.И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М., Стройиздат. – 1974. 41 с.
13. Талпа Б.В., Агарков Ю.В., Бардин Ю.Ю. Кремнистые породы – новая сырьевая база стройиндустрии Северного Кавказа. // Разведка и охрана недр. – 1992. – №11. – С. 12–14.
14. Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Тотурбиев А.Б. Низкообжиговая, энергосберегающая, экологически безопасная технология производства керамических материалов на основе глинистых сланцев. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т.12. – №1. – С. 148–161.
15. Халиков Д.А. Классификация теплоизоляционных материалов по функциональному назначению. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–6. – С. 1287–1291.
16. Хардигов А.Э. Цеолиты Северного Кавказа. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та. 2005. 224 с.
17. Хардигов А.Э., Бойко Н.И., Агарков Ю.В. Цеолиты Восточного Предкавказья и перспективы их практического использования. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1992. – №6. – С. 86–91.
18. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Исследование цеолитсодержащих кремнистых пород Дагестана для получения минеральной добавки в цемент. // Вестник геонаук. – 2021. – №10(322). – С. 42–46.
19. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Цеолитсодержащие кремнистые породы Дагестана как добавка для получения керамической волластонитсодержа-

щей облицовочной плитки. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т.12. – №4. – С. 142–152.

20. Entropa A.G., Brouwersb H.J.H., Reindersc A.H. Evaluation of energy performance indicators and financial aspects of energy saving techniques in residential real estate. // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. Issue 5. – pp. 618–629.

21. Ivanov K.S. Influence of the methods of preparing silicate-sodium mixture on the formation of the structure of the structure of foam glass ceramics. // *Glass Physics and Chemistry*. – 2019. – Vol. 45. No. 1. – pp. 60–65.

22. Johannes Reichla, Andrea Kollmann. The baseline in bottom-up energy efficiency and saving calculations – A concept for its formalisation and a discussion of relevant options. // *Applied Energy*. – 2011. – Vol. 88. – Issue 2. – pp. 422–431.

23. Guoa W., Qiaoa X., Huanga Y., Fanga M., Hanb X. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone. // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 50. – pp. 196–203.

24. Ma T., Tang T., Ding X., Huang X., Zhao Y. Thermal regime analysis and protective measure evaluation for wide embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau. // *International Journal of Civil Engineering*. – 2018. – Vol. 16. – pp. 1303–1316.

25. Uygunođlua T., Keçebaşb A. LCC analysis for energy-saving in residential buildings with different types of construction masonry blocks. // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – Issue 9. – pp. 2077–2085.

26. Wei Li, Jinzhong Zhu, Zhimin Zhu. The Energy-saving Benefit Evaluation Methods of the Grid Construction Project Based on Life Cycle Cost Theory. // *Energy Procedia*. – 2012. – Vol. 17. –Part A. – pp. 227–232.

References

1. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Requirements for thermal protection and energy efficiency in the draft updated SNiP “Thermal protection of buildings”. *Construction Materials*. 2011. No. 8. pp. 2–6. (In Russ.)

2. Gorshkov A.S., Gladkikh A.A. Measures to improve energy efficiency in construction. *Academia. Architecture and construction*. 2010. No. 3. pp. 246–250. (In Russ.)

3. Davidyuk A.N., Nesvetaev G.V. Efficient materials and designs to solve the problem of energy saving in buildings. *Housing construction*. 2010. No. 3. pp. 16–20. (In Russ.)

4. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V. Construction systems and features of the use of thermal insulation materials. *Housing construction*. 2015. No. 7. pp. 49–51. (In Russ.)

5. Ivanova A.S., Chernykh V.N. New thermal insulation materials (their properties and areas of application). *Materials of the interuniversity scientific conference. Part 2*. 2003. pp. 116–117. (In Russ.)

6. Konyukhova T.P., Distanov U.G. Technological classification of mixed siliceous zeolite-containing rocks. *Exploration and protection of subsoil*. 2000. No. 9. pp. 45–46. (In Russ.)

7. Kukovsky E.G. Structural features and physicochemical properties of clay minerals. / Kyiv, *Naukova Dumka*, 1966, 132 p. (In Russ.)

8. Mamontov A.A., Yartsev V.P., Strulev S.A. Analysis of the humidity of various insulation materials in the building envelope during operation during the heating season. *Academia. Architecture and construction*. 2013. No. 4. pp. 117–119. (In Russ.)

9. Morgun V.N., Morgun L.V., Cherenkova I.A. On the issue of the effectiveness of thermal insulation of facades of civil buildings. *Housing construction*. 2015. No. 4. pp. 21–24. (In Russ.)

10. Naumov M.M., Kashkaev I.S., Buz M.A., Sheinman E.Sh. *Clay brick technology*. Moscow. Stroyizdat. 1959. 16 p. (In Russ.)

11. Panov Yu.T., Chizhova L.A., Kudryashov A.V., Panov S.Yu., Pankratov A.V. The influence of density and dispersed fillers on the thermal conductivity of foam plastics. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2008. Vol. 51. Issue. 2. pp. 92–94. (In Russ.)

12. Rogovoy M.I. Technology of artificial porous fillers and ceramics. Moscow. Stroyizdat. 1974. p. 41. (In Russ.)
13. Talpa B.V., Agarkov Yu.V., Bardin Yu.Yu. Siliceous rocks are a new raw material base for the construction industry of the North Caucasus. Exploration and protection of subsoil. No. 11. 1992. pp. 12–14. (In Russ.)
14. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbiev A.B. Low-firing, energy-saving, environmentally friendly technology for the production of ceramic materials based on clay shale. Geology and geophysics of Russian South. 2022. Vol.12. No. 1. pp. 148–161. (In Russ.)
15. Khalikov D.A. Classification of thermal insulation materials by functional purpose. Fundamental research. 2014. No. 11-6. pp. 1287–1291. (In Russ.)
16. Khardikov A.E. Zeolites of the North Caucasus. Rostov-on-Don. Rost. Univ. 2005. 224 p. (In Russ.)
17. Khardikov A.E., Boyko N.I., Agarkov Yu.V. Zeolites of Eastern Ciscaucasia and prospects for their practical use. Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 1992. No. 6. pp. 86–91. (In Russ.)
18. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S. Study of zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan to obtain a mineral additive for cement. Bulletin of Geosciences. 2021. No. 10. Issue 322. pp. 42–46. (In Russ.)
19. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S. Zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan as an additive for producing ceramic wollastonite-containing facing tiles. // Geology and geophysics of Russian South. 2022. Vol.12. No. 4. pp. 142–152. (In Russ.)
20. Entropa A.G., Brouwersb H.J.H., Reindersc A.H. Evaluation of energy performance indicators and financial aspects of energy saving techniques in residential real estate. Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. Issue 5. pp. 618–629.
21. Ivanov K.S. Influence of the methods of preparing silicate-sodium mixture on the formation of the structure of foam glass ceramics. Glass Physics and Chemistry. 2019. Vol. 45. No. 1. pp. 60–65.
22. Johannes Reichla, Andrea Kollmann. The baseline in bottom-up energy efficiency and saving calculations – A concept for its formalization and a discussion of relevant options. Applied Energy. 2011. Vol. 88. Issue 2. pp. 422–431.
23. Guoa W., Qiaoa X., Huang Y., Fanga M., Hanb X. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone. Energy and Buildings. 2012. Vol. 50. pp.196–203.
24. Ma T., Tang T., Ding X., Huang X., Zhao Y. Thermal regime analysis and protective measure evaluation for wide embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau. International Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 16. pp. 1303–1316.
25. Uygunoğlu T., Keçebaş A. LCC analysis for energy-saving in residential buildings with different types of construction masonry blocks. Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 9. pp. 2077–2085.
26. Wei Li, Jinzhong Zhu, Zhimin Zhu. The Energy-saving Benefit Evaluation Methods of the Grid Construction Project Based on Life Cycle Cost Theory. Energy Procedia. 2012. Vol.17. Part A. pp. 227–232.

УДК 691.542

DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

Оригинальная статья

Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт на этапе вскрытия продуктивного пласта

Э.Р. Гасумов¹, Р.А. Гасумов²¹Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ1010,
г. Баку, пр. Азадлыг, 20;²Северо-Кавказский Федеральный университет, Россия, 355000,
г. Ставрополь, ул. Ленина, 419, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Статья поступила: 21.06.2023, доработана: 29.11.2023, принята к публикации: 05.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрены вопросы улучшения качества вводимых в эксплуатацию скважин, обеспечивающие гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт». Качество выполнения каждой операции предложено оценивать обобщёнными коэффициентами, на основании которых по предложенному порядку должен рассчитываться показатель качества скважины. Качество скважины предложено оценивать: отличное, хорошее, посредственное и плохое, величину обобщённых коэффициентов предложено рассчитывать в зависимости от значений параметров, косвенно характеризующих качество выполненного этапа работы. Предложено качество освоения пласта оценивать по показателю «оценка продуктивности». Приведен алгоритм расчёта показателя качества. Рассмотрены основные направления определяющие качество вводимых в эксплуатацию скважин, обеспечивающие гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт»: техническое; технологическое; организационное. Изложен механизм оценки качества выполнения каждого этапа строительства скважин посредством определённого количества параметров (элементов качества), характеристик. Изложены подходы определения качества скважины по совокупности факторов, характеризующих результаты последовательных операций при ее строительстве в комплексе. Приведен перечень контролируемых критериев оценки соответствия строительства скважины, а также представлены формулы для вычисления величин их отклонений от требований проектной документации. **Цель исследований.** Разработка методики и механизма оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт», формируемой на этапе строительства скважин. **Методы исследования.** Сбор, обобщение и обработка промысловых и экспертных материалов, результатов наблюдений, расчёты полученных теоретических зависимостей и их анализ с использованием методов математической статистики с помощью современных технических и программных средств. Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и экспериментальных исследований. **Результаты работы.** Разработана методика оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт» позволяющая оценить эффективность строительства вводимых в эксплуатацию скважин и выполнения технологических решений проектной документации.

Ключевые слова: скважина, качество, оценка, конструкция, производительность, гидродинамическое совершенство.

Для цитирования: Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 108–123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

Original paper

Estimation of the hydrodynamic perfection of the well-reservoir system at the stage of opening a productive reservoir

E.R. Gasumov¹, R.A. Gasumov²

¹Azerbaijan State University of Oil and Industry, Azerbaijan Technical University,
20 Azadlig Ave., Baku AZ1010, Azerbaijan;

²North Caucasian Federal University, 419 Lenina Str., Stavropol 355000, Russian Federation,
e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Received: 21.06.2023, revised: 29.11.2023, accepted: 05.12.2023

Abstract: Relevance. The article deals with the issues of improving the quality of well completion, which ensures the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system. The quality of each operation is proposed to be assessed by generalized coefficients, on the basis of which, according to the proposed procedure, the well quality indicator should be calculated. It is proposed to evaluate the quality of the well: excellent, good, mediocre and poor, the values of the generalized coefficients are proposed to be calculated depending on the values of the parameters that indirectly characterize the quality of the completed work stage. It is stated that the quality of reservoir development is proposed to be assessed by the indicator “productivity assessment”. An algorithm for calculating the quality index is given. The main directions that determine the quality of well completion and ensure the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system are considered: technical; technological; organizational. The mechanism for assessing the quality of each stage of well construction by a certain number of parameters (quality elements) and characteristics is outlined. Approaches for determining the quality of a well by a set of factors characterizing the results of successive operations during its construction in a complex are outlined. A list of controlled criteria for assessing the conformity of well construction, as well as formulas for calculating the values of their deviations from the requirements of project documentation, is given.

Aim. Development of methodology and mechanisms for assessing the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system formed at the stage of wells. **Methods.** Collection, generalization and processing of field and expert materials, observation results, calculations of the obtained theoretical dependencies and their analysis using methods of mathematical statistics with the help of modern hardware and software. The tasks were solved by carrying out theoretical and experimental studies. **Results.** A methodology for assessing the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system, which makes it possible to evaluate the efficiency of well construction and completion and the implementation of technological solutions for design documentation.

Keywords: well, quality, evaluation, design, productivity, hydrodynamic perfection.

For citation: Gasumov E.R., Gasumov R.A. Estimation of the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system formed at the stage of opening a productive reservoir. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 108-123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

Введение

В связи с большим объёмом разведочного бурения в осложнённых горно-геологических условиях особое значение приобретает обеспечение гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт», формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. Повышение эффективности и качества строительства скважин

остаётся важной научно-технической задачей и становится все более актуальной при освоении новых месторождений УВ.

Анализ состояния развития добычи углеводородов (УВ) показывает, что значительное количество введённых в эксплуатацию скважин построено неудовлетворительно, имеет низкие дебиты, для него не достигнуто гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт», в связи чем, возникает необходимость проведения дополнительных мероприятий по интенсификации продуктивных пластов (ПЗП) для устранения последствий, вызванных некачественным завершением их строительства.

Решение задачи улучшения качества на заключительном этапе строительства скважин обеспечивающее гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт» включает в себя в основном следующие направления: техническое (повышение обоснованности выбора буровых установок, мощности наземного оборудования и т.п.); технологическое (выбор режима бурения, программ промывки скважин, совершенствование составов буровых и тампонажных растворов, предупреждение горно-геологических осложнений при завершении строительства скважин, обеспечение контроля за технологическими процессами и т.д.); организационное (включает комплекс мероприятий по совершенствованию буровой техники и технологии, внедрению новых материалов и реагентов, геофизических и контрольно-измерительных средств, совершенствованию организации производства и т.п.).

Особое влияние на качество строительства скважин оказывает правильность составления проектно-сметной документации (ПСД), которая должна определять архитектурные, функционально-технологические, конструктивные и инженерно-технические решения для обеспечения сооружения объекта, с использованием инновационных технологий. Под качеством строительства скважины принято понимать выполнение требований ПСД и безаварийную проводку её трассы; отсутствие межколонных давлений (МКД) и межпластовых перетоков (что обеспечивается качеством крепления); отсутствие загрязнения продуктивного пласта фильтрами бурового и цементного растворов, а самое главное обеспечение гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт» для получения притока пластового флюида на проектном уровне. Гидродинамически совершенной скважина является тогда, когда при завершении строительства характер и качество вскрытия продуктивного пласта соответствуют проектным решениям и достигнута основная цель – получен полноценный приток пластового флюида.

Разработка методики оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт», формируемой на этапе завершения строительства (вскрытия продуктивного пласта, крепления и освоения) позволяет оценить качество строительства скважин, обосновать выбор технологий по повышению (восстановлению) продуктивности скважин с учётом геологических особенностей, включая дополнительные методы интенсификации пластового флюида.

Большое значение имеет возможность явно отражать совершенство скважины по характеру вскрытия пласта, уменьшенному радиусу скважины на основе использования исключительно реальных характеристик ствола скважины, непроницаемой ПЗП, состоянию и формированию каналов в интервале перфорации, системе размещения фильтра и др., поскольку скважина считается несовершенной с точки зрения качества вскрытия продуктивных пластов в том случае, когда проницаемость в интервале продуктивного горизонта снижена по сравнению с естественной породой-коллектором.

Методы исследований

Для достижения поставленных целей в работе проведены обработка промысловых и экспертных материалов, результатов наблюдений, расчёты полученных теоретических зависимостей и их анализ с использованием методов математической статистики с помощью современных технических и программных средств. Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и экспериментальных исследований. Используются показатели, полученные в результате вычислительного эксперимента, рассчитываемые для различных численных значений определяющих факторов.

Результаты работы и их обсуждение

Для освоения месторождений УВ необходимо установление гидродинамической связи между продуктивной залежью и скважиной, которая служит каналом для транспортировки пластового флюида на поверхность земли.

При строительстве скважин важным этапом является процесс завершения, который включает в себя набор технологических процессов обеспечивающих гидродинамическое совершенство системы “скважина-пласт”: первичное и вторичное вскрытие продуктивных пластов; формирование надёжного канала (ствола скважины) соединяющего залежи УВ с устьем скважины; обеспечение герметичности созданного канала (обсаживание и крепление); испытания пласта; вызов пластового флюида; освоение скважины; интенсификация притока (при необходимости) [Хвастунов и др., 2002; Suleymanov et al., 2016].

Важным этапом завершения строительства скважин является первичное вскрытие продуктивных пластов бурением, так как от этого во многом зависит изменение фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) пласта-коллектора. В связи чем, полнота проводимых работ на данном этапе в скважинах определяет, она совершенна или нет по качеству вскрытия продуктивного горизонта. Несовершенство скважин имеет несколько видов (рис. 1).

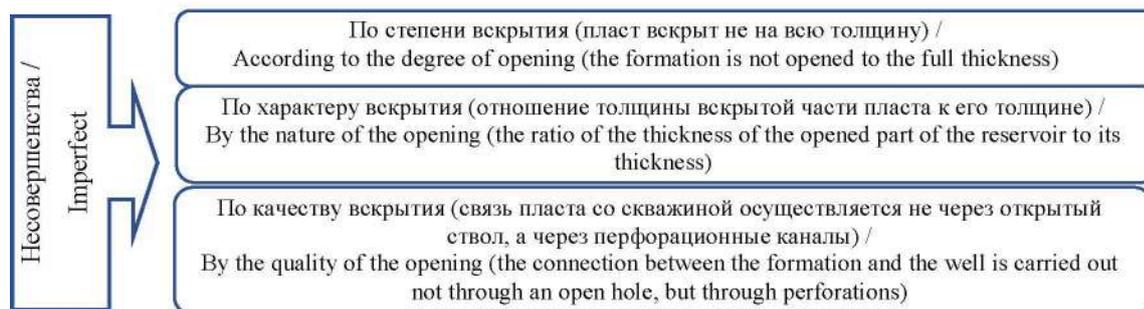


Рис. 1. Виды несовершенства скважин /

Fig. 1. Types of well imperfections

Скважины считаются несовершенными по качеству вскрытия продуктивного горизонта, когда при бурении снижена естественная проницаемость пласта-коллектора. А гидродинамически совершенной скважина считается тогда, когда характер и качество вскрытия являются совершенными по степени, то есть сохранены фильтрационно-ёмкостные свойства (ФЕС) продуктивного пласта, с учётом скин-эффекта (1). Для оценки данного показателя используется коэффициент гидрога-

зодинамического совершенства и «скин-эффект» [Мордвинов и др., 2001]. Скин-эффект определяется по формуле:

$$S_k = \ln \frac{R_z}{R_c} \left(\frac{k_{пл}}{k_z} - 1 \right), \quad (1)$$

где R_z – радиус загрязнённой зоны пласта; R_c – радиус скважины, $k_{пл}$ – проницаемость пласт-коллектора, k_z – проницаемость загрязненной зоны пласта. Если $S_k > 0$, то это означает, что проницаемость вскрытой части пласта уменьшилась, если $S_k = 0$, то проницаемость ПЗП осталась неизменной, если $S_k < 0$, то проницаемость ПЗП стала выше проницаемости пласта.

Кроме технико-технологических факторов, на качество строительства (в том числе завершения) скважин существенное влияние оказывают горно-геологические параметры вскрываемого продуктивного горизонта, и связанные с ними осложнения и возможные аварии. Наиболее пагубные последствия для продуктивных пластов возникают при поглощении бурового и тампонажного растворов, обусловленном репрессией на ПЗП на этапе завершения строительства скважин [Гасумов, 2015; Мусаев, 2020; Rahmanifard, Plaksina, 2019].

Качество строительства скважины и её качество по завершению строительства, не одно и то же. В первом случае оценивается качество процесса по сооружению объекта, во втором – качество объекта, полученного в результате строительства. При этом качественное строительство скважин это, когда в соответствии с ПСД обеспечены уровень добычи УВ и надёжность подземного геотехнического сооружения [Ибатуллина, 2006; Каюмов, 2016]. Качество строительства скважин определяется качеством выполнения трёх основных составляющих процесса строительства скважин: технологии бурения, крепления и освоения (испытание) пласта [Методика ТатНИПИнефть, 2005; Ибатуллина, 2006].

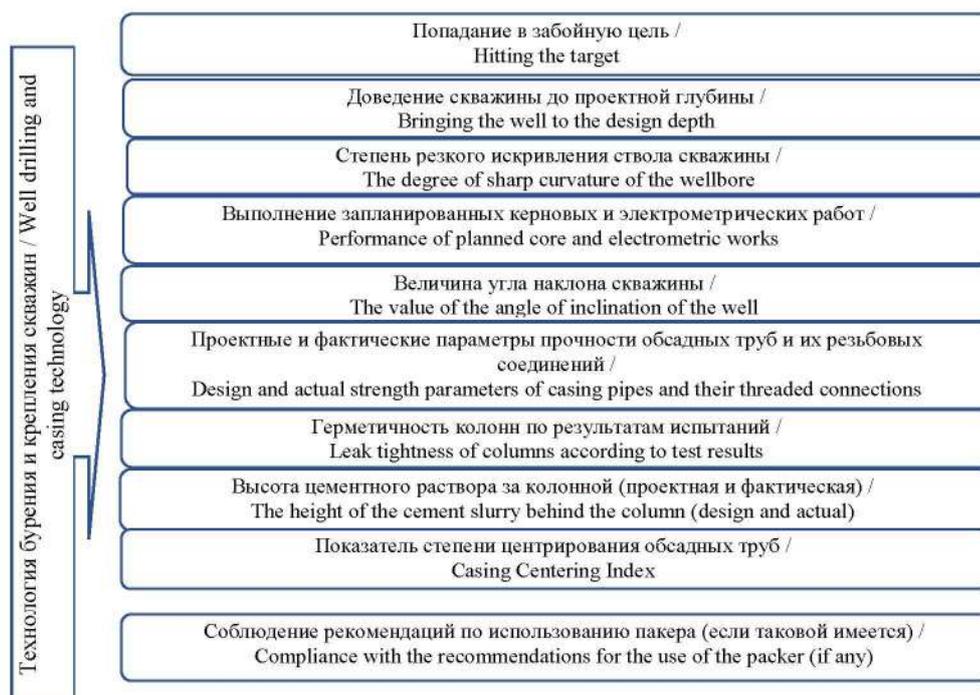


Рис. 2. Показатели качества технологии бурения и крепления скважин /

Fig. 2. Indicators of the quality of drilling and casing technology

Качество выполнения каждой операции предложено оценивать обобщёнными коэффициентами: бурение – K_b ; крепление – K_k и освоение – K_n , на основании которых по определённым правилам должен рассчитываться показатель качества скважины K . Качество скважины предложено оценивать: отличное, хорошее, посредственное и плохое [Повалихин, Берова, 2021].

Отметим, что величины обобщённых коэффициентов K_b , K_k и K_n рассчитываются в зависимости от значений параметров, косвенно характеризующих качество выполненного этапа работы.

По показателям качества технологии бурения и крепления скважин оценивается качество строительства скважин [Балаба, 2006; 2008] (рис. 2).

Качество освоения (испытание) пласта предложено оценивать по показателю «оценка продуктивности», который рассчитывается как отношение фактической продуктивности пласта к потенциальной. Отмечается, что при соблюдении всех условий вскрытия пласта показатель «оценка продуктивности» $K_n \leq 1$, а если пласт вскрывается без соблюдения проектных решений, то $K_n = 0,5$.

Алгоритм расчёта показателя качества следующий (2). Вначале определяются значения обобщённых коэффициентов K_b , K_k и K_n . Для этого (для каждого этапа строительства скважины) рассчитываются количественные значения элементов качества; определяются значения их желательных вероятностей (с использованием специальных таблиц, не приведённых в статье); рассчитываются единичные показатели параметров по трафаретному графику (не приведённому в статье). Коэффициенты K_b , K_k и K_n рассчитываются по формуле:

$$K_{об} = \frac{n}{\left(\frac{1}{d_{(б,к,н)_1}} + \dots + \frac{1}{d_{(б,к,н)_N}} \right)}, \quad (2)$$

где n – количество показателей качества каждого этапа строительства скважины; $d_{(б,к,н)_1} \dots d_{(б,к,н)_N}$ – единичные показатели элементов качества (коэффициентов K_b , K_k и K_n соответственно). Коэффициент качества скважины предложено рассчитывать, как среднее арифметическое значений обобщённых коэффициентов:

$$K = \frac{K_b + K_k + K_n}{3}. \quad (3)$$

В зависимости от значения коэффициента K скважина (3) получает оценку качества: отлично ($K \geq 0,80$); хорошо ($K \geq 0,63$); посредственно ($0,37 \geq K < 0,63$); плохо ($K < 0,37$). При $K_n = 1$ качество отдельных показателей реализации ПСД соответствует требованиям. Качество выполнения каждого этапа оценивается определённым количеством параметров (элементов качества), характеристиками которых являются: количественные значения (определяемые по данным контроля), желательные вероятности и значения единичных показателей (рис. 3).

Разработана система снижения коэффициентов в случае невыполнения ограничивающих условий (указанных в проекте, действующих нормативных документах и т.д.) [Ибатуллина, 2006; Балаба и др., Рябоконт, 2006].

С учётом полученных значений коэффициентов корректируется стоимость работ, причём снижение составляет не более 10% от стоимости строительства скважины.

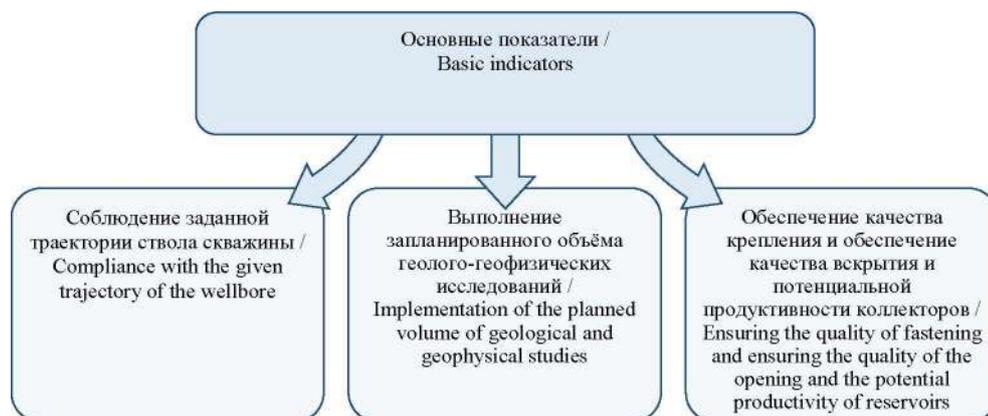


Рис. 3. Основные показатели для оценки качества строительства скважин /
 Fig. 3. Key indicators for assessing the quality of well construction

Оценку качества завершённого строительством скважины рациональным представляется выполнять с использованием алгоритма, предложенного в [Пейсигов, 2004], с учётом приоритетности функционального назначения.

Качество скважины, как и любого объекта, определяется историей ее строительства, при котором оценка качества скважины [Белоусов, 1998] определяется как среднее арифметическое оценок качества выполнения отдельных этапов ее строительства. Коэффициент качества скважины, основанный на среднем арифметическом оценок по этапам, сглаживает конечный результат и не учитывает того, что плохие результаты выполненного последующего этапа не могут быть скомпенсированы хорошими результатами выполнения предыдущего. Например, если качество бурения и крепления хорошее ($K_b=0,8$, $K_k=0,7$), а качество вскрытия низкое ($K_n=0,4$), то оценка качества скважины будет равна $K=0,63$, т.е. оценка качества «хорошо», но при этом такая скважина будет нуждаться в дополнительных работах по интенсификации притока.

Качество скважины предлагается определять по совокупности факторов, характеризующих результаты последовательных операций при ее строительстве в комплексе. Оценку качества предложено определять в зависимости от численного значения показателя (коэффициента) качества. Численное значение показателя качества предложено рассчитывать по количественным значениям определяющих факторов с учётом степени их влияния на качество по формуле средневзвешенного значения [Бронштейн, Семендяев, 2010; Гутуров, Никифоров, 2012]:

$$K = \sum_{i=1}^n (m_i \cdot q_i), \quad (4)$$

где n – количество определяющих факторов; q_i – количественная оценка фактора, которая характеризует отдельный результат выполнения какой-либо операции. Количественное значение фактора рассчитывается по данным ГИС или измерений ($0 \leq q_i \leq 1$); m_i – весовой коэффициент фактора (коэффициент значимости) представляет собой ожидаемую вероятность влияния определяющего фактора на качество скважины ($0 \leq m_i \leq 1$). Величины коэффициентов значимости (факторов), не поддаются прямому измерению или вычислению, поэтому их определение проводится экспертным методом (4) [Ахмедов и др., 2009; Хвастунов и др., 2002].

В связи с чем, при разработке методики оценки качества скважины важным является получение набора определяющих факторов, формул для расчёта их количественных значений и алгоритма получения коэффициентов значимости факторов. Выявлено восемь факторов, влияющих на качество завершённого строительством скважины (рис. 4) [Гасумов, 2014; Ахмедов и др., 2009; Балаба, 2008]. Доминирующие факторы (выделены голубым цветом на рис. 4) определяют возможность использования эксплуатационной скважины по функциональному назначению [Suleimanov et al., 2016; Rahmanifard, Plaksina, 2019]:

- если забой скважины вышел за пределы допустимого диапазона, то это может означать, что скважина не вошла в продуктивный пласт, и добыча невозможна, либо скважина будет «отбирать» добычу у соседней скважины, либо выйдет за границы лицензионного участка;

- кавернозность ствола, пробуренного под обсадные колонны, влияет на качество их цементирования и герметичность крепи. Низкое качество цементирования способно привести к появлению МКД, межпластовых перетоков и образованию грифонов;

- проницаемость ПЗП и дебит скважины являются показателями возможности получения продукции в промышленных объёмах.

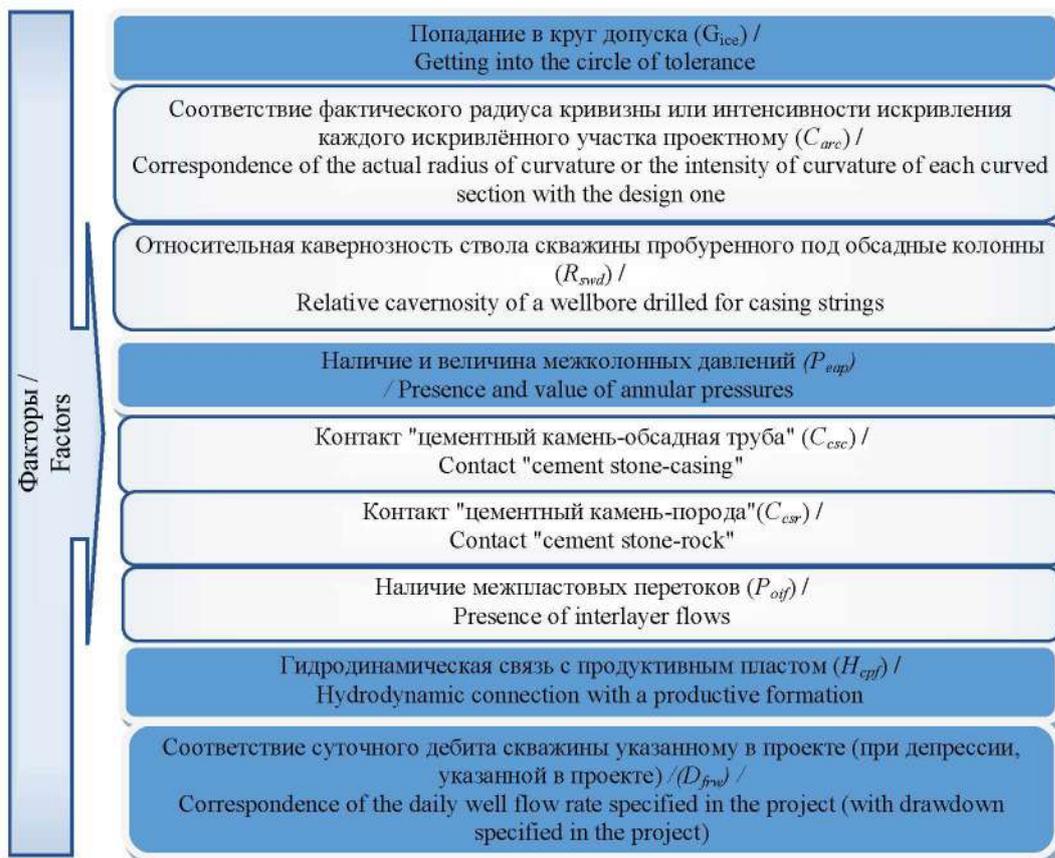


Рис. 4. Факторы, влияющие на качество скважин по результатам их строительства /

Fig. 4. Factors Affecting Well Completion Quality

Формулы для расчёта количественных значений факторов получены с использованием следующих принципов [Пейсиков, 2004] (рис. 5):

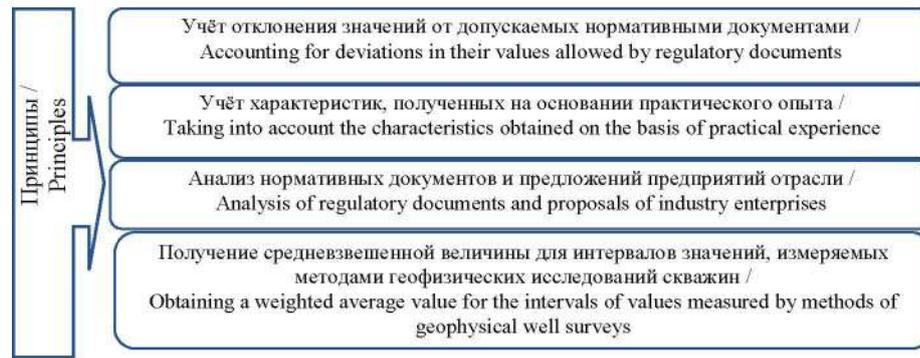


Рис. 5. Принципы, используемые для расчёта количественных значений факторов /
Fig. 5. Principles used to calculate the quantitative values of factors

В таблице 1 приведён перечень определяющих факторов и формулы для расчёта их количественных значений [Балаба, 2006; Повалихин, Берова, 2021].

Таблица 1 / Table 1

**Определяющие факторы и формулы для расчёта их количественных значений /
Determining factors and formulas for calculating their quantitative values**

Факторы / Factors	Количественное значение фактора q_i / The quantitative value of the factor
G_{ice}	$q_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{при } R_\phi \leq R_{np} \\ 0 & \text{при } R_\phi > R_{np} \end{cases}$
C_{arc} Для наклонно-направленных скважин / For directional wells	$q_2 = \begin{cases} \frac{X_\phi}{X_{np}} & \text{при } X_\phi < X_{np} \\ \frac{X_{np}}{X_\phi} & \text{при } X_\phi > X_{np} \end{cases}$
R_{swd} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_3 = \begin{cases} \frac{k_{np}}{k_\phi} & \text{при } k_{np} \leq k_\phi \\ 1 & \text{при } k_{np} > k_\phi \end{cases}$
P_{cap} Учитывается максимальная величина МКД (AP) / The maximum annular pressure (AP) is taken into account	$q_4 = \begin{cases} 1,0 & \text{при } \text{МКД} = 0,0 \\ 0,8 & \text{при } 0 < \text{МКД} \leq 0,1 \cdot P_{проект} \\ 0,6 & \text{при } 0,1 \cdot P_{проект} < \text{МКД} \leq P_{проект} \\ 0 & \text{при } P_{проект} < \text{МКД} \end{cases}$
C_{esc} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_5 = \begin{cases} 0 & \text{при } q_4 = 0 \\ \frac{r_0 l_0 + r_1 l_1 + r_2 l_2}{l_0 + l_1 + l_2} & \text{при } 0 < q_4 \leq 1 \end{cases}$ Отсутствует $r_0 = 0$; частичный $r_1 = 0,6$; сплошной (жесткий) $r_2 = 1$. / Missing $r_0 = 0$; partial $r_1 = 0,6$; solid (hard) $r_2 = 1$.
C_{csr} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_6 = \begin{cases} 0 & \text{при наличии МПП} \\ \frac{r_0 l_0 + r_1 l_1 + r_2 l_2}{l_0 + l_1 + l_2} & \text{при отсутствии МПП} \end{cases}$ Отсутствует $r_0 = 0$; частичный $r_1 = 0,6$; сплошной (жесткий) $r_2 = 1$. / Missing $r_0 = 0$; partial $r_1 = 0,6$; solid (hard) $r_2 = 1$.
P_{oif} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_7 = \begin{cases} 0 & \text{при } q_4 = 0 \\ 1 - \frac{\sum \varepsilon_i \cdot l_i}{L_\phi} & \text{при } 0 < q_4 \leq 1 \end{cases}$
$H_{срф}$	$q_8 = \begin{cases} 1 & \text{при } k_{np} \leq k_\phi \\ \frac{k_\phi}{k_{np}} & \text{при } k_{np} > k_\phi \end{cases}$
$D_{фв}$	$q_9 = \begin{cases} 1 & \text{при } Q_{np} \leq Q_\phi \\ \frac{Q_\phi}{Q_{np}} & \text{при } Q_{np} > Q_\phi \end{cases}$

где $P_{\text{прогн.}}$ – прогнозная величина МКД, при которой допускается эксплуатация скважин; R – радиус круга (ствола скважины) допуска; X – радиус кривизны (м) или интенсивность искривления (град/10 м); ε_i – эксцентриситет i -го интервала колонны; l_i – длина i -го интервала, м; l_0, l_1, l_2 – суммарные длины интервалов, характеризующиеся оценками r_0, r_1, r_2 соответственно;

Значения коэффициентов значимости не универсальны, а их величины определяются при выполнении оценки качества каждой конкретной скважины. Для разных регионов и типов скважин значения коэффициентов значимости отличаются и могут быть установлены экспертным путём, в баллах влияния каждого фактора на качество скважины, на основе промысловых данных [Методика ТатНИПИнефть, 2005; Белоусов, 2008].

Согласованность экспертных оценок в таком случае определяется значением коэффициента вариации k_r и обобщённым значением точечных экспертных оценок – медианой Me [Пейсиков, 2004; Хвастунов и др., 2002; Ахмедов и др., 2009]:

$$k_r = \frac{qrt_3 - qrt_1}{2 eM} \quad (5)$$

Согласованность оценок считается слабой, если $k_r > 0,5$, (5). Оценки можно считать хорошо согласованными, если $k_r < 0,2$. Если по какому-либо фактору или коэффициенту оценки экспертов оказались рассогласованными (т. е. $k_r > 0,2$), то рекомендуется выполнить дополнительное оценивание. Эксперты, получая в ходе обмена мнениями дополнительную информацию, могут изменить свою оценку в сторону приближения к истине. Если не удалось достичь сходимости оценок, то предлагаются обобщённые оценки [Efendiyev et al., 2018; Kuang et al., 2021].

Свойства медианы, которые обуславливают ее выбор в качестве характеристики среднего, следующие:

- медиана ближе к истине, чем не менее половины всех индивидуальных экспертных оценок;
- сумма абсолютных значений отклонений экспертных оценок от медианы минимальна по сравнению с суммой любой другой характеристики среднего.

Коэффициент значимости i -го фактора m_i рассчитывается по формуле (6):

$$m_i = \frac{eM_i}{\sum_{i=1}^n eM_i} \quad (6)$$

Качество скважины, завершённой строительством, и соответствие нормативным документам при строительстве, оценивается приёмочной комиссией и оценки оформляются в виде акта. Оценки качества законченной строительством скважины следующие: отлично, если $0,9 < K \leq 1,0$; хорошо, если $0,8 < K \leq 0,9$; удовлетворительно, если $0,6 \leq K \leq 0,8$. Оценка «плохо» не применяется, так как методология разрабатывается для добывающих скважин. Значение коэффициента K определяется вычислительным экспериментом. Изменяя количественные значения факторов, которые характеризуют отдельный результат выполнения какой-либо операции так, чтобы их наборы соответствовали уровню “отлично”, “хорошо” и “удовлетворительно” при оценке качества скважин, рассчитывают соответствующий диапазон значений K . Конечно, в выборе численных значений факторов присутствует элемент субъективности, поэтому окончательные значения диапазонов K (для разных регионов имеют различные значения), соответствующие отличной, хорошей и удовлетворительной

оценкам качества скважины, могут быть скорректированы [Пейсиков, 2004; Ахмедов и др., 2009].

По определению, соответствие – это выполнение требований строительства скважин по ПСД. Отмечается, что основным содержанием бурового супервайзинга является прямое или косвенное определение соответствия требованиям [Балаба, 2006, 2008].

В связи с вышеизложенным, показатель выполненных разделов ПСД (S) при строительстве скважины рассчитывается в предположении равнозначности разделов проекта по степени исполнения и предложено определять его по формуле:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i, \quad (7)$$

где s_i – отношение количества подразделов i -го раздела, выполненного в соответствии с требованиями рабочего проекта на строительство скважины g_i , к общему количеству подразделов n_i i -го раздела [Балаба, 2006]:

$$s_i = \frac{g_i}{n_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Оценка соответствия выполняется в зависимости от величины показателя соответствия (8): $S=1,0$ – соответствует; $0,8 \leq S < 1,0$ – соответствует с допусаемым отклонением; $S < 0,8$ – имеются серьёзные отклонения.

Качество скважины, с учётом её функционального назначения, определяется как совокупность свойств и соответствующей им комплексной ресурсоёмкости [Гасумов, 2015; Балаба и др., 2006].

Оценка качества строительства скважин путём определения комплексного показателя качества ($K_{кв}$), зависит от степени выполнения различных этапов проектных решений, и определяется путём сравнения показателей по фактически выполненным работам с показателями, заложенными в проектных решениях [Гасумов, 2014, 2015; Голик и др., 2019].

Формулы для расчёта показателей эффективности по каждому разделу ПСД представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Перечень технических решений проектной документации и оценки их выполнения /
List of technical solutions for design documentation and assessment of their
implementation**

Показатели по проекту (K_i) / Project indicators	Разделы- проекта / Stripped project	Оценки выполнения технических решений, соблюдение технических решений проекта / выполнены: / Evaluation of the implementation of technical solutions, compliance with the technical solutions of the project / completed:		
		В полном объёме / In full	С отклонениями, не отразившимися на качестве скважины / With deviations that did not affect the quality of the well	С отклонениями, отразившимися на качестве скважины / With deviations, affecting well quality
Конструкция скважины $K_{кн}$ / Well design	4	1	0,5	0
Профиль ствола скважины $K_{сп}$ / Wellbore profile	2	1	0,5	0

Буровые растворы $K_{бр}$ / Drilling fluids	2	1	0,5	0
Углубление скважины K_{yc} / Well deepening	5	1	0,5	0
Крепление скважины $K_{кр}$ / Well fixing	9	1	0,5	0
Вторичное вскрытие продуктивных пластов $K_{вв}$ / Secondary opening of productive layers	6	1	0,5	0
Освоение скважины $K_{ос}$ / Well development	2	1	0,5	0
Соблюдение природоохранных мероприятий при строительстве скважины $K_{пм}$ / Compliance with environmental measures during well construction	8	1	0,5	0
Продолжительность строительства скважины $K_{пс}$ / Well construction time		1	0,5	0

Если техническое решение по ПСД выполнено в полном объеме, то это означает, что качество строительства скважин можно оценить: высокое $K_{кч}=0,8-1,0$; среднее $K_{кч}=0,5-0,8$; низкое $K_{кч}<0,5$. $K_{ин}$ определяется как среднее арифметическое значение показателей выполнения разделов (n) ПСД ($n \leq 8$) [Белоусов, 1998; Гасумов, 2015]:

$$K_{ин} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i^n)}{n}, \tag{9}$$

где $K_{ин}$ – комплексный показатель качества строительства скважины (9); K_i – показатель выполнения разделов проектной документации (рассчитывается как среднее арифметическое оценок реализации технических решений, составляющих данный раздел); i – порядковый номер раздела проектной документации.

Оценка соответствия строительства скважин заключается в определении степени выполнения требований ПСД на строительство скважин (рис. 6) [Белоусов, 1998; Гасумов, 2015; Поваляхин, Беров, 2021; Балаба, 2008].



Рис. 6. Факторы, влияющие на качество завершения строительства скважин /

Fig. 6. Factors Affecting Well Completion Quality

Для оценки соответствия строительства скважин обязательным является соблюдение контролируемых критериев процесса строительства скважин, при бурении и креплении каждого интервала [Аветов и др., 2008].

Фиксация соответствия контролируемых критериев включает: сбор и анализ информации о фактических значениях контролируемых критериев; сравнение фактических значений контролируемых критериев со значениями, предусмотренными проектной документацией на строительство скважины; выявление отклонений фактических значений контролируемых критериев от значений, предусмотренных проектной документацией; документальное оформление выявленных отклонений фактических значений контролируемых критериев от значений, предусмотренных проектной документацией.

Перечень критериев, соответствие которым фиксируется при завершении строительства скважин: плотность бурового раствора; фильтрация бурового раствора; режим параметров бурения; компоновка обсадной колонны; технологическая оснастка обсадной колонны; скорость спуска обсадной колонны; компонентный состав буферной жидкости; тип и плотность тампонажного раствора; высота подъема цементного раствора за колонной; продолжительность бурения и крепления интервала продуктивного горизонта.

В результате фиксации соответствия каждому контролируемому критерию дается оценка соответствия, значение которой зависит от величины выявленного отклонения по данному контролируемому критерию (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Контролируемые критерии для оценки /
Controlled criteria for evaluation**

Контролируемые параметры / Controlled parameters	Оценка / Criteria
Если выявленное отклонение от требований проектной документации не превышает нижней границы соответствия / If the identified deviation from the requirements of the design documentation does not exceed the lower limit	1
Если отклонение от требований проектной документации превышает нижнюю границу соответствия, но не превышает верхней границы соответствия / If the deviation from the requirements of the design documentation exceeds the lower limit of compliance, but does not exceed the upper limit of compliance	0,5
Если отклонение от требований проектной документации превышает верхнюю границу соответствия / If the deviation from the requirements of the design documentation exceeds the upper limit of compliance	0

Верхний и нижний пределы соответствия по отклонениям контролируемых критериев устанавливаются ПСД строительства скважины. По установленным значениям показателей соответствия определяется комплексный показатель соответствия строительства скважины по формуле [Балаба, 2008; Гасумов, 2014]:

$$K = \frac{\sum_{m=1}^m K^m + K^c}{m+1}, \quad (10)$$

где m – количество интервалов, перекрываемых отдельной обсадной колонной (начиная от кондуктора и заканчивая эксплуатационной). На основании значения комплексного показателя (10) соответствия определяется оценка соответствия стро-

ительства скважины: отлично ($0,94 \leq K \leq 1,0$); хорошо ($0,84 \leq K < 0,94$); удовлетворительно ($0,70 \leq K < 0,84$); неудовлетворительно ($0 \leq K < 0,70$) и производится оценка соответствия строительства скважины.

Выводы

Определённый перечень критериев, соответствие которым фиксируется при строительстве скважины, где каждому контролируемому критерию даётся оценка соответствия, значение которой зависит от величины выявленного отклонения по данному контролируемому критерию позволяет оценить гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт», формируемой на этапе завершения ее формирования.

Методика оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт» позволяет не только оценить эффективность строительства и ввода в эксплуатацию скважины, но и сравнить результаты на разных скважинах, выявить причину различий путем проведения более детального анализа, позволяющего принять управленческое решение для реализации технологических решений ПСД.

Литература

1. Аветов Р.В., Рыжов А.Е., Сутырин А.В. К вопросу о повышении эффективности разработки месторождений за счёт строительства высокопроизводительных и надёжных скважин. // Вопросы строительства, эксплуатации и капитального ремонта скважин: сборник научных трудов. – М.: ВНИИГАЗ, 2008. – С. 3–12.
2. Ахмедов Н.Г., Коршунова К.С., Винниченко Л.Г. Методика оценки качества скважин, завершённых строительством, и их соответствия рабочему проекту. // Газовая промышленность. – 2009. – №8. – С. 70–72.
3. Ибатуллина Р.Р. Актуальные проблемы геологии и разработки нефтяных месторождений Татарстана. // Actual issues of geology and Tatarstan oilfield development: сб. науч. тр. – М.: Закон и порядок, 2006. – 571 с.
4. Балаба В.И. Управление качеством и оценка качества скважин. // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2006. – №2. – С. 7–15.
5. Балаба В.И. Управление качеством в бурении: учебное пособие. – М.: Недра, 2008. – 447 с.
6. Балаба В.И., Гноевых А.Н., Рябоконт А.А. Совершенствование управления качеством строительства скважин в ОАО «Газпром». // Сервисные работы как направление повышения эффективности и качества строительства скважин. Материалы НТС. – М.: ООО «МРЦ Газпром», 2006. – С. 34–50.
7. Белоусов В.О. Впервые создан стандарт на законченную бурением глубокую нефтяную скважину. // Нефтегазовые технологии. – 1998. – №1. – С. 10–12.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2010. – 608 с.
9. Гасумов Р.А. Геологические факторы, влияющие на качество крепления скважин (на примере конкретной скважины Прибрежной группы месторождений). // Геология, Геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – №12. – С. 48–53.
10. Гасумов Р.А. Повышение надёжности газовых и газоконденсатных скважин. // Газовая промышленность. – 2015. – №10(729). – С. 94–97.
11. Голик В.И., Кожиев Х.Х., Бурдзиева О.Г., Масленников С.А. Геомеханические факторы взаимодействия природных и технических систем в районах освоения недр. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т.9(3). – С. 179–188. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36481.
12. Гуторов Ю.А., Никифоров А.А. Проблемы управления качеством строительства скважин на основе оценки их эффективности как объектов нефтедобычи. // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2012. – №5. С. 141–152.

13. Каюмов Э.Ф. Графические методы сравнения технологических объектов и процессов бурения. // Современная наука: Актуальные проблемы и пути их решения. – 2016. – №1(23). – С. 24–27.
14. Методика оценки качества строительства скважин ОАО «Татнефть». // РД 153-39.0-349-05. – Бугульма: ТатНИПИнефть, 2005. – 37 с.
15. Мордвинов А.А., Воронина Н.В., Каракчиев Э.И. Лабораторно-экспериментальные и практические методы исследования нефтегазопромысловых процессов: Учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2001. – 114 с.
16. Мусаев В.К. Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений (переходной процесс) при воздействии (вертикальное сосредоточенное в виде треугольного импульса) на поверхность полуплоскости (задача Лэмба). – Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т.10(4). С. 164–174. DOI: 10.46698/VNC.2020.32.87.010.
17. Пейсиков Ю.В. Оценка качества строительства скважин на нефть. // Нефтяное хозяйство. – 2004. – №6. – С. 56–58.
18. Повалихин А.С., Борова И.Г. Оценка качества строительства скважин. // Инженер-нефтяник. – 2021. – №3. – С. 12–17.
19. Хвастунов Р.М., Ягелло О.И., Корнеева В.М. Экспертные оценки в квалиметрии машиностроения. – М.: АНО «Технонефтегаз». – 2002. – 130 с.
20. Efendiyev G., Mammadov P., Piriverdiyev I., Mammadov V. Estimation of the lost circulation rate using fuzzy clustering of geological objects by petrophysical properties. // Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology. – 2018. – No.2(81). – pp. 28–33.
21. Kuang L., He L.I.U., Yili R.E.N., et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development. // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – No. 48(1). – pp. 1-14.
22. Mukhametshin V.V. Improving the efficiency of oil production facilities management using the analogy method. // SOCAR Proceedings. – 2020. – No.4. – pp. 42-50.
23. Suleimanov B.A., Ismayilov F.S., Dyshin O.A., Veliyev E.F. Selection methodology for screening evaluation of EOR methods. // Petroleum Science and Technology. – 2016. – No.34(10). – pp. 961-970.
24. Rahmanifard H., Plaksina T. Application of artificial intelligence techniques in the petroleum industry: a review. // Artificial Intelligence Review. – 2019. – No.52(4). – pp. 2295-2318.

References

1. Avetov R.V., Ryzhov A.E., Sutyurin A.V. On the issue of increasing the efficiency of field development through the construction of high-performance and reliable wells. Issues of construction, operation and overhaul of wells: a collection of scientific papers. VNIIGAZ. 2008. pp. 3–12. (In Russ.)
2. Akhmedov N.G., Korshunova K.S., Vinnichenko L.G. Methodology for assessing the quality of wells completed by construction and their compliance with the working design. Gas industry. 2009. No. 8. pp.70–72. (In Russ.)
3. Ibatullina R.R. Actual problems of geology and development of oil fields in Tatarstan. In: Proc. Actual issues of geology and Tatarstan oilfield development. Moscow. Law and order. 2006. 571 p. (In Russ.)
4. Balaba V.I., Gnoevykh A.N., Ryabokon A.A. Improvement of well construction quality management in OAO Gazprom. Service work as a way to increase the efficiency and quality of well construction. NTS materials. 2006. pp.34–50. (In Russ.)
5. Balaba V.I. Quality management in drilling: textbook. Moscow. Nedra. 2008. 447 p. (In Russ.)
6. Balaba V.I. Quality management and well quality assessment. Quality management in the oil and gas complex. 2006. No. 2. pp. 7–15. (In Russ.)

7. Belousov V.O. For the first time, a standard has been created for a deep oil well completed by drilling. *Oil and gas technologies*. 1998. No 1. pp. 10–12. (In Russ.)
8. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. *Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Higher Educational Institutions: Textbook*. Saint Petersburg. LAN. 2010. 608 pp. (In Russ.)
9. Gasumov R.A. Geological factors affecting the quality of well casing (on the example of a specific well of the Coastal group of fields). *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*. 2014. No. 12. pp. 48–53. (In Russ.)
10. Gasumov R.A. Improving the reliability of gas and gas condensate wells. *Gas industry*. 2015. . No. 10. Issue 729. pp. 94–97. (In Russ.)
11. Golik V. I., Kozhiev Kh. Kh., Burdzieva O. G., Maslennikov S. A. Interaction of Natural and Technical Systems in the Subsoil Development Areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 179–188. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36481. (In Russ.)
12. Gutorov Yu.A., Nikiforov A.A. Problems of well construction quality management based on the assessment of their effectiveness as oil production facilities. *Electronic scientific journal Oil and gas business*. 2012. No. 5. (In Russ.)
13. Kayumov E.F. Graphic methods for comparing technological objects and drilling processes. *Modern science: Actual problems and ways to solve them*. 2016. No. 1. Issue 23. pp. 24–27. (In Russ.)
14. Methodology for assessing the quality of construction of wells of OAO TATNEFT. RD 153–39.0-349-05. Bugulma, TatNIPIneft. 2005. 37 p. (In Russ.)
15. Mordvinov A.A., Voronina N.V., Karakchiev E.I. Laboratory-experimental and practical methods for studying oil and gas field processes, Textbook. Ukhta: USTU. 2001. 114 p. (In Russ.)
16. Musayev V. K. Mathematical modeling of non-stationary elastic stress waves (transient process) under load (vertical concentrated as a triangular pulse) applied at the surface of a half-plane (Lamb's problem). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 164–174. DOI: 10.46698/VNC.2020.32.87.010. (In Russ.)
17. Peisikov Yu.V. Evaluation of the quality of construction of oil wells. *Oil industry*. 2004. No 6. pp. 56–58. (In Russ.)
18. Povalikhin A.S., Berova I.G. Evaluation of the quality of well construction. *Petroleum engineer*. 2021. No. 3. pp.12–17. (In Russ.)
19. Khvastunov R.M., Yagello O.I., Korneeva V.M. Expert assessments in mechanical engineering qualimetry. Moscow. ANO Technoneftegaz. 2002. 130 p. (In Russ.)
20. Efendiyev G., Mammadov P., Piriverdiyev I., Mammadov V. Estimation of the lost circulation rate using fuzzy clustering of geological objects by petrophysical properties. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2018. Vol. 2. No. 81. pp. 28–33.
21. Kuang L., He L.I.U., Yili R.E.N., et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development. *Petroleum Exploration and Development*. 2021. Vol. 48. Issue 1. pp. 1–14.
22. Mukhametshin V.V. Improving the efficiency of oil production facilities management using the analogy method. *SOCAR Proceedings*. 2020. No. 4. pp. 42–50.
23. Suleimanov B.A., Ismayilov F.S., Dyshin O.A., Veliyev E. F. Selection methodology for screening evaluation of EOR methods. *Petroleum Science and Technology*. 2016. Vol. 34. No. 10. pp. 961–970.
24. Rahmanifard H., Plaksina T. Application of artificial intelligence techniques in the petroleum industry: a review. *Artificial Intelligence Review*. 2019. Vol. 52. No. 4. pp. 2295–2318.

УДК 551.2.01-551.3.053

DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010

Оригинальная статья

Особенности формирования геоэкологических рисков горной территории на основе анализа причинно-следственных связей геодинамических эндогенных и экзогенных процессов

О.Г. Бурдзиева¹, Е.Н. Козырев¹, А.Л., Кортиев², М.О. Ревазов¹

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

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44

Статья поступила: 06.09.2023, доработана: 15.11.2023, принята к публикации: 30.11.2023

Аннотация: Целью работы являлись обзор опасных геологических процессов различной природы в горном регионе Северной Осетии и выбор приоритетного направления исследования. Проблема оценки особенностей протекания опасных геоэкологических процессов на основе взаимосвязи геодинамических эндогенных и экзогенных явлений характеризуется своей **актуальностью**. В этой связи изучалось влияние эндогенных процессов на формирование текущего состояния горного региона. **Методы.** Для решения поставленной задачи проведен анализ ранее проведенных исследований. Уровень воздействия эндогенных и экзогенных геодинамических процессов на геоэкологическую среду характеризуется развитием генетических типов четвертичных образований, формирующих очаги опасных геологических процессов. Геодинамические процессы проявляются в виде аномальных отклонений геофизических, электромагнитных, геохимических полей и других характеристик горной среды, обусловленных фактом и уровнем воздействия на нее. **Результаты.** Установлено, что геологические изменения среды, вызваны неотектоникой трещинного типа в зонах активных глубинных разломов из-за неравномерного подъема отдельных участков территории, обуславливающего напряженно-деформированное состояние среды, концентрацию гравитационной энергии и разрушение коренных пород приледниковых зон. Показано, что физические, механические и геохимические поля, как неотъемлемые признаки-индикаторы опасных геодинамических процессов, оказывают определяющее влияние на состояние горных пород, формируя современную кору выветривания, и обуславливая интенсивное накопление четвертичных отложений.

Ключевые слова: туристско-рекреационный комплекс Мамисон, тектонические движения, геодинамические процессы, эндогенные и экзогенные явления, геофизические методы, инструментальные наблюдения, прогноз геоэкологических событий.

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., Козырев Е.Н., Кортиев А.Л., Ревазов М.О. Особенности формирования геоэкологических рисков горной территории на основе анализа причинно-следственных связей геодинамических эндогенных и экзогенных процессов. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 10(4): 124-134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010

DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010

Original paper

Features of formation of geoecological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes

O.G. Burdzieva¹, E.N. Kozyrev¹, A.L. Kortiev², M.O. Revazov¹

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

²North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation

Received: 06.09.2023, revised: 15.11.2023, accepted: 30.11.2023

Abstract: Relevance. The aim of the paper was to review hazardous geological processes of various nature in the mountainous region of North Ossetia and to select a priority research area. The problem of assessing the peculiarities of hazardous geo-ecological processes on the basis of the relationship between geodynamic endogenous and exogenous phenomena is characterized by its **relevance**. In this connection the influence of endogenous processes on the formation of the current state of the mountain region was studied. **Methods.** To solve the task we analyzed the previously conducted studies. The level of impact of endogenous and exogenous geodynamic processes on the geoecological environment is characterized by the development of genetic types of Quaternary formations forming the centers of hazardous geological processes. Geodynamic processes are manifested in the form of anomalous deviations of geophysical, electromagnetic, geochemical fields and other characteristics of the mountain environment, caused by the fact and level of impact on it. **Results.** It was established that geological changes in the environment are caused by neotectonics of fracture type in the zones of active deep faults due to uneven uplift of some parts of the territory, which causes stress-strain state of the environment, concentration of gravitational energy and destruction of bedrock of glacial zones. It is shown that physical, mechanical and geochemical fields, as integral signs-indicators of hazardous geodynamic processes, have a determining influence on the state of rocks, forming the modern weathering crust, and causing intensive accumulation of Quaternary sediments.

Keywords: Mamison tourist and recreational complex, tectonic movements, geodynamic processes, endogenous and exogenous phenomena, geophysical methods, instrumental observations, forecast of geoecological events.

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., Kozyrev E.N., Kortiev A.L., Revazov M.O. Features of formation of geoecological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 124-134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010

Введение

В связи с интенсивным формированием туристско-рекреационного центра Мамисон в Северной Осетии и освоением новых территорий, представляется необходимым проведение детальных исследований состояния природной среды и разработка методологии путей освоения региона с целью минимально возможного воздействия на природную среду. Разработка соответствующих подходов по прогнозу опасных геозекологических процессов в горном регионе, позволит уменьшить негативное воздействие природно-техногенных процессов и стабилизировать развитие опасных экзогенных процессов.

Обособленное воздействие геодинамических процессов по масштабности их проявления, негативному воздействию на ландшафт и геоморфологические структуры, а также на геологические условия территории повышает уровень геозекологической ситуации до опасной.

Геодинамическая опасность региона формируется целым рядом факторов: активностью литосферы, литологическим составом осадочного чехла, условиями взаимодействия геологической среды с атмосферой, влиянием климата и др.

Собственно геодинамическая опасность определяется активностью эндогенных процессов, таких как тектоника плит и вулканизм, а также экзогенных процессов. Взаимодействие указанных процессов определяет геозекологическое состояние среды. Однако связь между эндогенными и экзогенными процессами остается неясной и требует дальнейших исследований. Понимание этих связей является важным для предотвращения и смягчения геодинамических рисков на территории.

Активность эндогенной геодинамики зависит от проявлений глубинных тектонических нарушений, землетрясений, складчатой дислоцированности и трещиноватости массива, взаимодействия геохимических и геофизических полей и сейсмодислокаций.

Опасность геологических процессов эндогенного и экзогенного характера, оценивается интенсивностью и продолжительностью их проявления. Причиной активизации экзогенных процессов является эндогенная активность, обусловленная приуроченностью к узлам разрывных структур и зонам сейсмической и вулканоплутонической активности [Яроцкий, Чотчаев, 2016; 2019].

Уровень воздействия эндогенных и экзогенных геодинамических процессов на геозекологическую среду определяет развитие генетических типов четвертичных образований, формирующих очаги опасных геологических процессов [Чотчаев и др., 2020; Zaalishvili et al., 2020].

Структурный элемент – рельеф местности отображает результаты тектонической деятельности. Структура геоморфологии характеризует механизм взаимодействия элементов поверхности и тектонических процессов [Bull, 1991; Bull, McFadden, 1977; Keller, Pinter, 2012; Burbank, Anderson, 2001; Peters, Van Balen, 2007]. Изучение геоморфологических характеристик региона позволяет прогнозировать изменение ландшафта в результате тектонической деятельности.

Опасность разлома зависит от силы его воздействия на инженерное сооружение [Несмеянов, 2004] за время с голоцена [Allen, 1975] до настоящего периода в течение 400 тыс. лет [Никонов, 1994] или 100...150 тыс. лет [Трифонов, Караханян, 2008].

Максимальные разрывные дислокации Мамисонского узла приурочены к крупным Тибскому и Нарскому разломам. По размерам развития Нарская зона новейших сейсмотектонических разрывов является самой крупной на Северном Кавказе (рис.1).

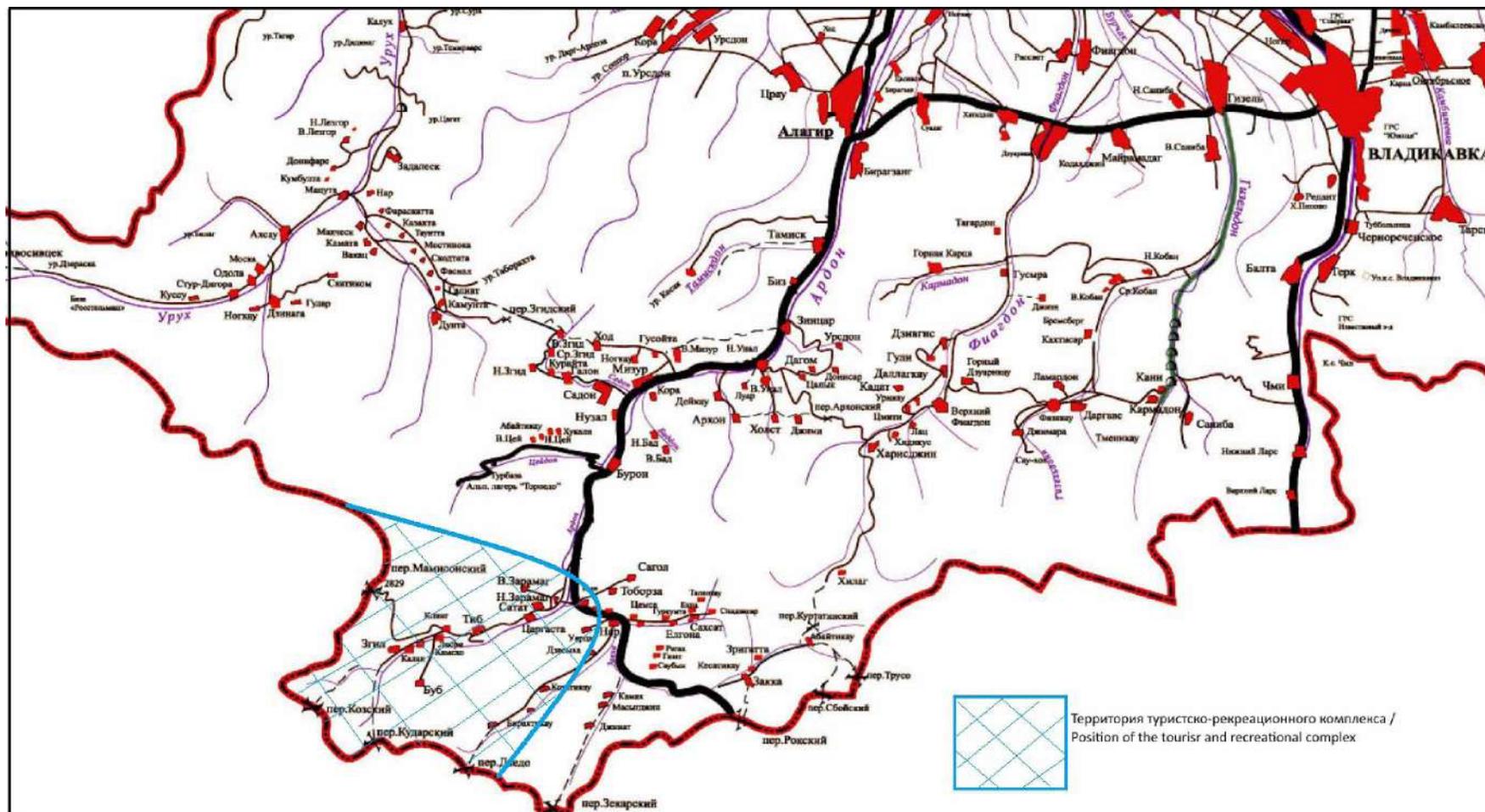


Рис. 1. Положение территории туристско-рекреационного комплекса «Мамисон» Республики Северная Осетия-Алания /

Fig. 1. The position of the tourist and recreational complex "Mamison" of the Republic of North Ossetia-Alania

Методология выявления фактора геодинамического развития

В Центральной части Большого Кавказа зоны разломов субширотного направления увязаны с меридиональными разломами более низкого порядка. Так, Сырхубарзондский разлом, пересекающий долину ледника Колка, ограничивает реликтовый рубец и продолжается на восток. Он связан с потухшим вулканом Казбек, что подтверждает причину схода ледника Колка с многочисленными жертвами, имеющего статус экологической катастрофы [Zaalishvili, Melkov, 2014].

Обвальнo-осыпные и оползневые массивы имеют собственную частоту колебаний. Если частота землетрясения совпадает с частотой колебаний массива, возникает эффект резонирования, который усиливает опасность.

Четвертичные образования определяют состав материнских пород, уровень геодинамической активности и темпы развития опасных экзогенных геологических процессов. Их картографирование в масштабе 1:10000 с выделением очагов развития опасных процессов позволяет прогнозировать масштабы динамики событий и разрабатывать меры минимизации риска. Приведены алгоритмы распознавания опасных процессов (рис. 2) [Чотчаев и др., 2020].

Инструментальные наблюдения позволяют реализовать мониторинг эндогенных и экзогенных процессов горных пород в условиях их естественного залегания.

Динамика опасных экзогенных процессов

Локальные четвертичные образования нуждаются в исследовании их динамических и кинематических изменений для разработки мер предупреждения опасности геозкологических явлений.

При формировании рельефа территории приоритетную роль в неоплейстоцене-голоцене играли процессы ледниковой экзарации и аккумуляции в троговых долинах.

Геозкологические изменения происходят, в том числе, по причине смыва почвы. В результате смыва дерна и растительности склоны нередко обнажаются на высоту 120...150 м. Эрозионные опасные геологические процессы характеризуются латентностью и глубиной (рис. 2.).

Территории экономического развития в зоне активизации Большого Кавказа расположены в сложных инженерно-геологических условиях, обусловленных разнообразием состава пород, их нарушенностью, сейсмичностью и темпами развития геологических процессов. [Бурдзиева и др., 2016; Чотчаев и др., 2017; Чотчаев и др., 2020; Zaalishvili et al., 2018].

На Северном Кавказе экзогенные геологические процессы представлены зонами выветривания, оползнями, обвалами, лавинами и суффозиями.

Выветривание. При физическом выветривании дезинтегрируются горные породы с образованием дресвы и щебня, представляющих собой источник материала для селей и оползней.

Эрозионные процессы наносят ущерб объектам экономики и сооружениям. Активизация процессов эрозии обусловлена тем, что в орогене Большого Кавказа осуществляется тектоническое поднятие со скоростями 2... 14 мм/год.

Селевые потоки. Центральный Кавказ характеризуется показателем пораженности, который составляет около 50% и относится к весьма опасным [Шеко, 1980]. Здесь зафиксировано более 180 селевых очагов с возможностью выброса до 100

тыс. м³ твердой массы. По руслам рек и по водотокам образовалось 45 участков оползневого и селевого перекрытия с водо-накопителями емкостью 10...25 тыс. м³.

Обвальные процессы. Около 80% площади исследования перекрыты продуктами обвально-осыпных процессов, возникающих по причинам: геодинамические процессы на стыках мегаплит; накопленное сейсмическое воздействие, когда обрушение проявляется не от одного краткосрочного сейсмоудара, а от совокупности слабых ударов; мощные сейсмоудары силой 7...9 баллов с разрядкой на вершинных участках рельефа; работа трещин бортового отпора с резкими суточными перепадами температур.

В настоящее время наиболее вероятными считаются геологические проявления на участках развития мощных тектонических нарушений (Цейский надвиг и серия разломов Северный, Нарский, Тибский, Халацинский, Згильский, Саухохский), приуроченных к зонам концентрации тектонических нарушений в сейсмических и электрических полях (рис. 1.).

В зоне реликтового рубца и южного склона Бокового хребта участки земной коры перемещаются на 12...15 мм в год.

Оползни. Из числа более чем 200 оползневых массивов, 120 расположено в бассейнах рек Ардон, Заккадон, Мамисондон, Адайкомдон и Цейдон, а так же в песчано-глинистых отложениях юры в бассейнах рек Бубудон, Ручатдон, Лагатком. Оползнями скольжения прорабатываются долины Мамихдона и Зруга.

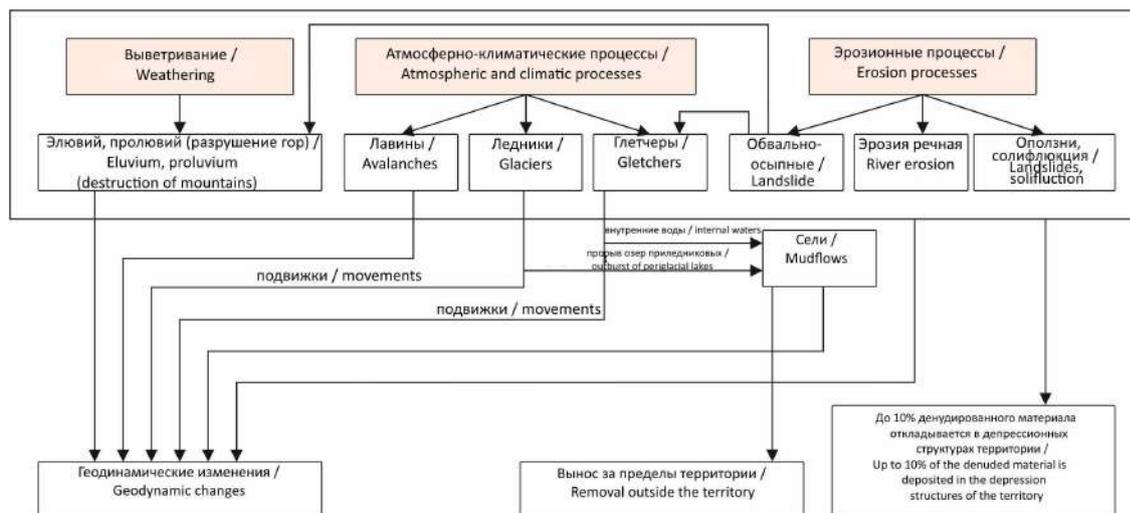


Рис. 2. Экзогенные процессы воздействия на высокогорные территории [Чотчаев и др., 2020] / Fig. 2. Exogenous processes of impact on high mountain areas [Chotchaev et al., 2020]

Лавины. Лавинная опасность провоцируется осадками (рис. 2). Высокогорный ландшафт Главного Кавказского хребта характеризуется эрозионно-денудационным и ледниково-экзарационным рельефом с растительностью на оподзоленных почвах, содержащих 5...7% гумуса.

Наиболее развита линейная эрозия в глинистых сланцах и аргиллитах Северной и Южной депрессий, что проявляется в образовании промоин и оврагов глубиной до 4 м.

Ареал опасных экзогенных геологических процессов включает в себя селитебные участки (Лисри, Зруг, Козыком-Згил и Земегон) на площади около 170 кв. км. До 80% территории перекрыто породами обвально-осыпного типа. По объему селевых разовых выносов участки могут быть дифференцированы на мощные с выбросом

более 100000 м³; средние – 10000 ... 100000 м³; слабые – 1000 ... 10000 м³; весьма слабые – менее 1000 м³. Площадь, занятая ледниками, а также современными и древними глетчерами, составляет 13% от всей территории, включая в себя 36 ледников, 46 современных и 34 древних каменных глетчера, а также 39 ледниковых озер.

Ледники, каменные глетчеры и приледниковые озера. В условиях глобального потепления и отступления ледников на обнаженных площадях развивается трещинная тектоника. Сход ледника или активного глетчера опасен вспахиванием долин, перемещением глыбового материала и негативным преобразованием ландшафта, сопоставимыми с последствиями схода ледника Колка в Геналдонском ущелье 20 сентября 2002 г.

Результаты исследований и их обсуждение

Состояние четвертичных образований на участках их локализации исследовано методами сейсмического профилирования и электротомографии и нанесено на схемы районирования геологических процессов по степени опасности участков территории.

Ниже приводятся схемы районирования участков Земегон и Зарамаг, где проведены геофизические исследования с вынесением на схемы региональных нарушений.

Участок Земегон (рис. 3.) характеризуется развитием на его южной половине оползневых процессов, а на северной половине – плоскостным смывом, угрожающим запрудой водотока. К югу от Саухохского разлома аккумулируются глетчеры.

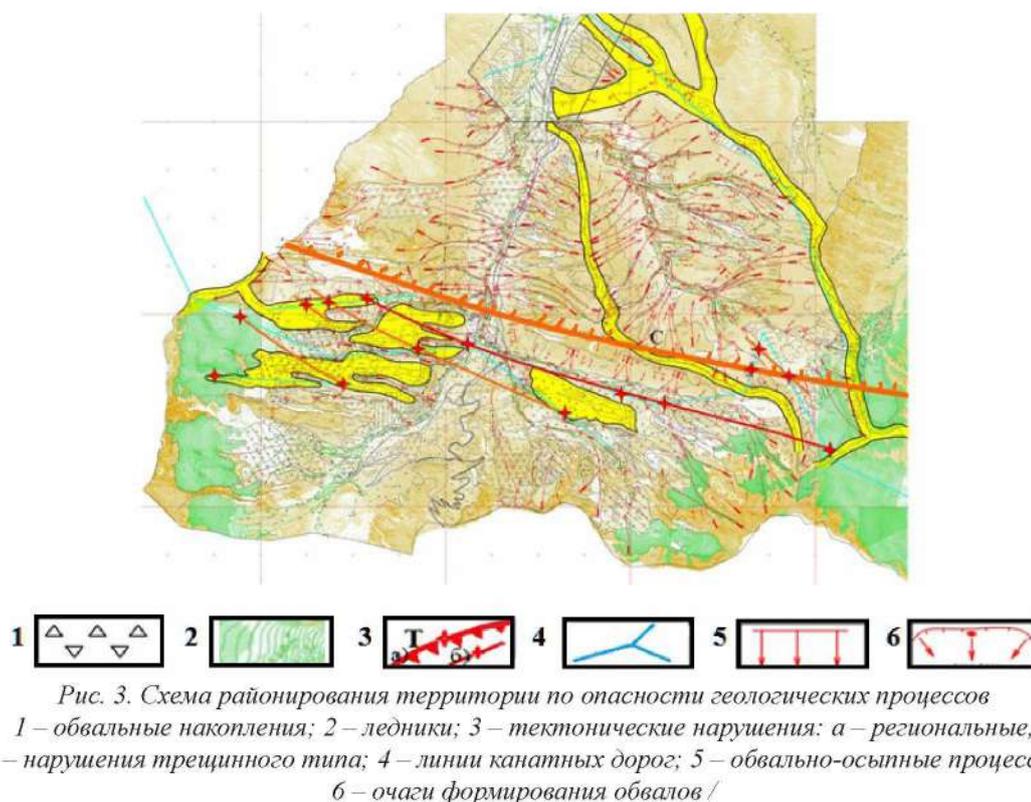


Рис. 3. Схема районирования территории по опасности геологических процессов
1 – обвальные накопления; 2 – ледники; 3 – тектонические нарушения: а – региональные, б – нарушения трещинного типа; 4 – линии канатных дорог; 5 – обвально-осыпные процессы; 6 – очаги формирования обвалов /

Fig. 3. Zoning scheme of the territory by the hazards of geological processes
1 – landslide accumulations; 2 – glaciers; 3 – tectonic faults: a – regional, b – fracture-type faults identified by geophysical methods; 4 – cable car lines; 5 – landslide processes; 6 – foci of permanent formation of landslides.

В пределах изученной геофизическими методами площади тектоника кулисообразно сочетается с региональным разломом Саухохский.

Участок Зарамаг в северо-западной части занят ледником, включающим в себя крупноглыбовые (15...20 м) продукты обрушения скальных склонов. Четвертичные отложения, представляющие обвальные отложения, накапливаются в результате гравитационного перемещения обломочного материала с водоразделов и других склонов. Этот процесс представляет собой медленное сползание рыхлых пород по склону вследствие периодического разнопричинного изменения их объема (рис. 4).

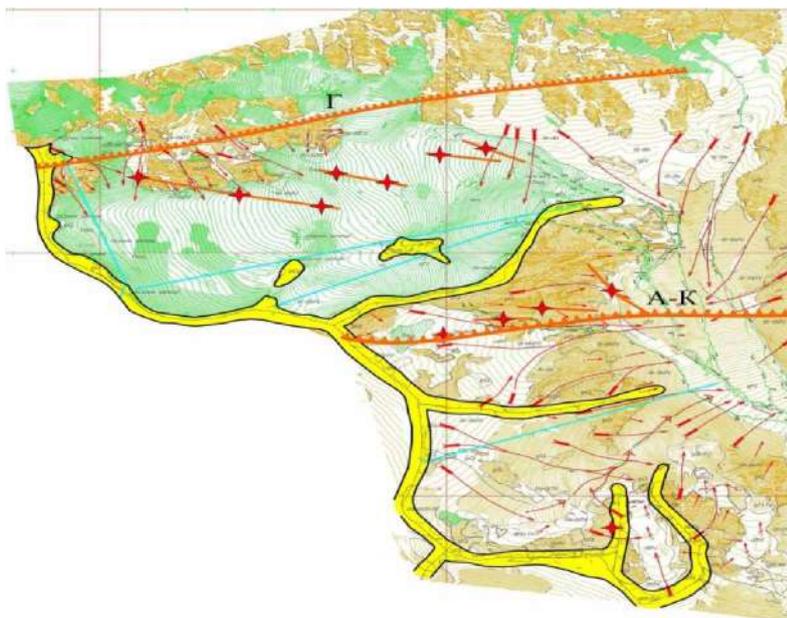


Рис. 4. Схема районирования по степени опасности геологических процессов на участке Зарамаг с элементами тектоники по данным Чотчаева Х.О., 2020 (Гончаренко О.А., 2012) М 1:10000 /

Fig. 4. Zoning scheme according to the degree of hazard of geological processes in the Zaramag area with tectonic elements according to Chotchaev Kh.O., 2020 (Goncharenko O.A., 2012) M 1:10000

Инструментально полученные данные о тектонической активности региона указывают на приуроченность аномальных отклонений геофизических параметров к тектоническим нарушениям [Чотчаев и др., 2020].

На основе связи глубинных тектонических нарушений и неотектонических проявлений трещинной тектоники правомерно говорить о причинно-следственной связи геологических процессов, где приоритетна роль геодинамических, в первую очередь, эндогенных процессов.

Четвертичные образования элювиального ряда, а также генетические типы смешанного генезиса образовались 300...400 тыс. лет назад.

Большой Кавказ имел современный облик уже в раннем неоплейстоцене (2,2...2,3 млн лет назад) [Растворова, 1973] при темпах роста 1,5...5,0 мм в год. За период с позднеплейстоцена горы прирастали 1200...1300 м, при мощности четвертичных накоплений до 100...120 м. Темпы роста накоплений не превышают 0,3–0,4 мм в год.

Потенциальные очаги опасных геологических процессов находятся в состоянии разной степени равновесия, выход из которого возможен при возникновении определенной ситуации.

Мониторинг опасных геологических процессов является надежной основой оценок интегральной эволюции горных пород и позволяет в той или иной мере при определенных условиях обеспечивать прогноз геоэкологических событий.

Выводы

1. Напряженно-деформированное состояние горного массива в условиях естественного залегания является важнейшей характеристикой проявлений геодинамических воздействий. Динамические, геофизические и геохимические поля, наряду с минеральными элементами в водах являются надежными индикаторами геодинамических процессов. Важным фактором развития и последующего накопления четвертичных отложений является разрушительное воздействие эндогенных процессов на коренные породы.

2. Многообразие литологического состава горных пород и активность геологических процессов обуславливают разнообразие генетических типов четвертичных отложений.

3. Потенциальные очаги опасных геологических процессов находятся в состоянии разной степени равновесия, выход из которого возможен при возникновении определенной ситуации. Высокая лавинная опасность территории Северного Кавказа определяется большим числом и непредсказуемостью поведения лавинных очагов.

4. Результаты геолого-геофизических исследований позволяют оценить неотектоническую активность территории и могут быть использованы в практических задачах. Мониторинг опасных геологических процессов является надежной основой оценок интегральной эволюции горных пород и позволяет по мере необходимости обеспечивать при определенных условиях прогноз геоэкологических событий.

Литература

1. Бурдзиева О.Г., Чотчаев Х.О., Маммадли Т.Я. Модель поддерживаемого развития горных территорий Северного Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №4. – С. 348–358. DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-4-348-358.

2. Гончаренко О.А. Инженерно-геологические изыскания по объекту: «Проект создания туристического кластера в Северо-Кавказском федеральном округе, Краснодарском Крае и республике Адыгея» Всесезонный туристско-рекреационный комплекс «Мамисон» // Отчет. Владикавказ. 2012.

3. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. – М.: Наука. 2004. – С. 13–15.

4. Никонов А.А. Признаки молодой тектонической активности в зонах Южно-Азовского и Керченского разломов. // Геотектоника. – 1994. – №5. – С. 16–27.

5. Растворова В.А. Формирование рельефа гор: (На примере Горной Осетии) – М.: Наука. 1973. – С. 144.

6. Трифонов В.Г., Караханян А.С. Динамика Земли и развитие общества. – М.: ОГИ. 2008. – С. 8–9.

7. 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

8. Чотчаев Х.О., Оганесян С.М., Гончаренко О.А. Опасные геологические процессы на территориях экономического освоения в горной части Республики Северная Осетия-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2017. – Т.9. №3. – С.195–210. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210.

9. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра. 1980. – 296 с.

10. Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Тектоническая предопределенность Хаилинского землетрясения на Юго-Западе Корякского нагорья. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №4. – С. 129–140.
11. Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Вулканогены окраинных орогенных поясов Северо-Западного сектора Северо-Восточной Азии. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 18–35.
12. Allen C.R. Geological criteria for evaluating seismicity. // *Bul. Geol. Soc. Amer.* – 1975. – Vol. 86. No. 8. – pp.1041–1057.
13. Bull W.B. *Geomorphic responses to climatic change.* – New York: Oxford University Press. – 1991. – p. 326.
14. Bull W.B., McFadden L. Tectonic geomorphology North and South of the Garlock fault, California. In: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions.* // *Publ. in Geomorphology, State University of New York, Binghamton.* – 1977. – pp. 115–138.
15. Burbank D.W., Anderson R.S. *Tectonic Geomorphology.* // Blackwell Science. – 2001. – Vol. 43. – pp. 105–129.
16. Peters G., Van Balen R.T. Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany. // *Glob. Planet. Chang.* – 2007. – Vol. 58. – pp. 310–334.
17. Keller E.A. Pinter N. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape.* – New York: Prentice Hall. – 2012. – pp. 432.
18. Zaalishvili V., Chotchaev Kh., Melkov D., Burdzieva O., Dzeranov B., Kanukov A., Archireeva I., Gabaraev A., Dzobelova L. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar casestudy. // *Web of Conferences.* – 2020. – Vol. 164. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401014.
19. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Melkov D.A., Makiev V.D., Dzobelova L.V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. // *International Journal of GEOMATE.* – 2018. – Vol. 15. No. 51. – pp. 160–166.
20. Zaalishvili V., Melkov D. Account of seismic impact in Geomechanical design and stability of Underground mining. *Journal Wulfenia, Klagenfurt, Austria.* –2014. – Vol. 21. No. 5. pp.259–266.

References

1. Burdzieva O.G., Chotchaev Kh.O., Mammadli T.Ya. A model for the supported development of mountainous areas in the North Caucasus. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2016. Vol. 8 No.4. pp. 348–358. DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-4-348-358. (In Russ.)
2. Goncharenko O.A. Engineering and geological surveys on the object: The project of creating a tourist cluster in the North Caucasus Federal District, Krasnodar Territory and the Republic of Adygea. All-season tourist and recreational complex Mamison. Report. Vladikavkaz. 2012.
3. Nesmeyanov S.A. *Engineering geotectonics.* Moscow. Nauka. 2004. pp. 13–15. (In Russ.)
4. Nikonov A.A. Signs of young tectonic activity in the zones of the South Azov and Kerch faults. *Geotektonika.* 1994. No. 5. pp.16–27. (In Russ.)
5. Rastvorova V.A. *Formation of the relief of mountains: (On the example of Mountainous Ossetia).* Moscow. Nauka. 1973. 144 p. (In Russ.)
6. Trifonov V.G., Karakhanyan A.S. *Dynamics of the Earth and the development of society.* Moscow. OGI. 2008. pp. 8–9. (In Russ.)
7. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. The influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and geophysics of Russian South.* 2020 Vol. 10. No 4. pp. 70–100 (In Russ.)
8. Chotchaev Kh.O., Oganessian S.M., Goncharenko O.A. Dangerous geological processes in the territories of economic development in the mountainous part of the Republic of North Ossetia-Alania. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2017. Vol. 9. No. 3. pp. 159–210. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210. (In Russ.)

9. Sheko A.I. Regularities of formation and forecast of mudflows. Moscow. Nedra. 1980. 296 p. (In Russ.)
10. Yarotskiy G.P., Chotchaev Kh.O. Tectonic predetermination of the Khailin earthquake in the Southwest of the Koryak Upland. *Geology and geophysics of Russian South*. 2016. No. 4. pp. 129–140. (In Russ.)
11. Yarotskiy G.P., Chotchaev Kh.O. Volcanogens of the marginal orogenic belts of the Northwestern sector of Northeast Asia. *Geology and geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 18–35. (In Russ.)
12. Allen C.R. Geological criteria for evaluating seismicity. *Bul. Geol. Soc. Amer.* 1975. Vol. 86. No. 8. pp.1041–1057.
13. Bull W.B. *Geomorphic responses to climatic change*. New York. Oxford University Press. 1991. p. 326.
14. Bull W.B., McFadden L. Tectonic geomorphology North and South of the Garlock fault, California. In: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions*. Publ. in Geomorphology, State University of New York, Binghamton. 1977. pp. 115–138.
15. Burbank D.W., Anderson R.S. *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science. 2001. Vol. 43. 4pp. 105–129.
16. Peters G., Van Balen R.T. Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany. *Glob. Planet. Chang.* 2007. Vol. 58. pp. 310–334.
17. Keller E.A. Pinter N. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. New York. Prentice Hall. 2012. pp. 432.
18. Zaalishvili V., Chotchaev Kh., Melkov D., Burdzieva O., Dzeranov B., Kanukov A., Archireeva I., Gabaraev A., Dzobelova L. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar case study. *Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401014.
19. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Melkov D.A., Makiev V.D., Dzobelova L.V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15. No. 51. pp. 160–166.
20. Zaalishvili V., Melkov D. Account of seismic impact in Geomechanical design and stability of Underground mining. *Journal Wulfenia, Klagenfurt, Austria*. 2014. Vol. 21. No. 5. pp.259–266.

УДК 911.5.6

DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011

Оригинальная статья

Динамика соотношения фракций фитомассы и мортмассы на ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике

А.Н. Гуня^{1,3}, У.Т. Гайрабеков^{2,3}, Л.Ш. Махмудова³, З.Ш. Гагаева^{2,3}

¹ Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29, e-mail: a.n.gunya@igras.ru;

² Академия наук Чеченской Республики, Россия, 364024, г. Грозный, ул. В. Алиева, 19а;

³ Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364024, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100.

Статья поступила: 25.08.2023, доработана: 27.11.2023, принята к публикации: 06.12.2023

Резюме: Актуальность работы. Баланс и динамика углерода требуют детального анализа соотношения фракций фитомассы и мортмассы в биогеоциклах. Особенно важным является переход зеленой фитомассы в мортмассу с дальнейшим ее разложением и депонированием либо в почву, либо в летучие соединения. Вследствие чего необходимо уделять особое внимание измерениям различных составляющих мортмассы: опада, отпада, ветоши, подстилки, промежуточных гумусовых соединений и климатически активных газов. При этом особенно важно понять влияние климатических условий на скорость разложения составляющих мортмассы, так как основное влияние на эти процессы оказывают не только температура и осадки, но и суточные, сезонные и годовые колебания метеоклиматических параметров. Для изучения деталей этой динамики были использованы данные микроклиматических наблюдений на ключевых участках и регулярные измерения динамики фитомассы. **Цель статьи** – выявление основных факторов и условий, лежащих в основе динамики соотношения зеленой фитомассы и мортмассы на двух ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике, расположенных в различных почвенно-климатических условиях. **Методы работы.** Крупномасштабное ландшафтное картографирование на ключевых участках, детальные микроклиматические исследования с помощью установленных логгеров – датчиков температуры и влажности, а также наблюдения за состоянием растительного покрова. Особое внимание уделялось замерам отдельных фракций мортмассы на различных участках и в разных условиях микрорельефа, биогеоценоза. Учет надземной фитомассы проводился методом обмера деревьев, последующего расчёта объема и массы. Надземная травянистая фитомасса и мортмасса определялись на основе укосов с площадок размером 50×50 см в трехкратной повторности в различные периоды развития растительности. Для оценки биологической продуктивности использовались данные по запасам надземной массы на единицу площади (г/м², т/га). Отбирались также образцы почв для определения гумуса и основных питательных веществ. **Результаты работы.** Находящиеся в различных ландшафтных условиях ключевые участки на Чеченской равнине и в низкогорье обнаруживают различные условия динамики углерода. Наблюдения, проведенные на ключевых участках, и расчет разных фракций фитомассы позволили охарактеризовать условия по эмиссионному потенциалу природных комплексов двух ключевых участков карбонового полигона в Чеченской Республике, расположенных в разных ландшафтных условиях. Количество фитомассы в низкогорных ландшафтах (Рошни-Чу) почти в два раза превышает количество фитомассы на равнине (Черноречье). Это объясняется различными почвенно-климатическими условиями и антропогенной деятельностью. Смена сезонных состояний природных комплексов участков карбоно-

вого полигона от холодного к теплому периодам и связанная с этим интенсивность тепловлагообмена лежат в основе динамики перехода зеленой фитомассы в мортмассу, которая далее разлагается на газы, частично минерализуется и откладывается в почву. Заповедование на участке Черноречья ведет к более интенсивному накоплению наземной мортмассы, восстановлению подлеска, более сложно устроенной вертикальной структуры. Однако это не гарантирует депонирования углерода в почвах, большая его часть уходит в атмосферу. По всей видимости, нужны меры для утилизации надземной мортмассы, направленные на депонирование углерода.

Ключевые слова: динамика углерода, биогеоциклы, ландшафтные условия, фитоценозы, опад, опад, ветошь, подстилка.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2023-0001 «Оценка эмиссионного потенциала парниковых газов промышленных предприятий и разработка комплекса секвестрационных мер (на примере предприятий ТЭК и ЖКХ Чеченской Республики).

Для цитирования: Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш., Гагаева З.Ш. Динамика соотношения фракций фитомассы и мортмассы на ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 135-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011

Original paper

Dynamics of the ratio of phytomass and mortmass fractions in key areas of the carbon landfill in the Chechen Republic

A.N. Gunya ^{1,3}, U.T. Gayrabekov ^{2,3}, L.Sh. Makhmudova ³, Z.Sh. Gagaeva ^{2,3}

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: a.n.gunya@igras.ru;

² Academy of Sciences of the Chechen Republic, 19a V. Aliyev Str.,
Grozny 364024, Russian Federation;

³ Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, 100
Ave. H.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation

Received: 25.08.2023, revised: 27.11.2023, accepted: 06.12.2023

Resume: Relevance. The balance and dynamics of carbon require a detailed analysis of the ratio of phytomass and mortmass fractions in biogeocycles. Of particular importance is the transition of green phytomass to mortmass with its further decomposition and deposition either into the soil or into volatile compounds. As a result, it is necessary to pay special attention to the measurements of various components of the mortmass: litter, waste, rags, intermediate humus compounds and climatically active gases. At the same time, it is especially important to understand the influence of climatic conditions on the rate of decomposition of mortmass components, since these processes are mainly influenced not only by temperature and precipitation, but also by daily, seasonal and annual fluctuations in meteorological parameters. To study the details of this dynamics, we used data from microclimatic observations in key areas and regular measurements of phytomass dynamics. **The purpose** of the article is to identify the main factors and conditions underlying the dynamics of the ratio of green phytomass and mortmass in two key areas of the carboniferous polygon in the Chechen Republic, located in different soil and climatic conditions. **Methods.** Large-scale landscape mapping in key areas, detailed microclimatic studies using installed loggers – temperature and humidity sensors, as well as observations of the state of vegetation. Particular attention was paid to the measurements of individual fractions of mortmass in different areas and under different conditions

of microrelief, biogeocenosis. Accounting for aboveground phytomass was carried out by measuring trees, followed by calculation of volume and weight. Aboveground herbaceous phytomass and mortmass were determined on the basis of cuts from sites 50×50 cm in size in triplicate at different periods of vegetation development. To assess biological productivity, data on stocks of aboveground mass per unit area (g/m^2 , t/ha) were used. Soil samples were also taken to determine humus and key nutrients. **Results.** The key areas on the Chechen Plain and in the low mountains, located in different landscape conditions, exhibit different conditions of carbon dynamics. Observations carried out in key areas and calculation of different phytomass fractions made it possible to characterize the conditions for the emission potential of natural complexes of two key areas of the carboniferous range in the Chechen Republic, located in different landscape conditions. The amount of phytomass in low-mountain landscapes is almost twice the amount of phytomass in the plains. This is due to various soil and climatic conditions, anthropogenic activities. The change in the seasonal states of the natural complexes of the areas of the carboniferous polygon from cold to warm periods and the intensity of heat and moisture exchange associated with this underlie the dynamics of the transition of green phytomass to mortmass, which further decomposes into gases, partially mineralizes and is deposited in the soil. The conservation in the area of Chernorechye leads to a more intensive accumulation of ground mortmass, restoration of undergrowth, a more complex vertical structure. However, this does not guarantee the deposition of carbon in soils; most of it goes into the atmosphere. Apparently, measures are needed for the disposal of aboveground mortmass, aimed at carbon sequestration.

Keywords: carbon dynamics, biogeocycles, landscape conditions, phytocenoses, decay, rags, litter.

Acknowledgements: *The work was carried out within the framework of the state task of the GGNTU named after Academician M.D. Millionshchikov FZNU-2023-0001 "Assessment of the emission potential of greenhouse gases of industrial enterprises and the development of a set of sequestration measures (on the example of fuel and energy and housing enterprises of the Chechen Republic).*

For citation: Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.S., Gagaeva Z.Sh. Dynamics of the ratio of phytomass and mortmass fractions in key areas of the carbon landfill in the Chechen Republic. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South. (in Russ.).* 2023. 13(4): 135-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011

Введение

Баланс и динамика углерода требуют детального анализа составляющих биогеоцикла. Особенно важным является переход зеленой фитомассы в мортмассу с дальнейшим ее разложением и депонированием либо в почву, либо в летучие соединения. Вследствие этого особое значение должно уделяться измерениям различных составляющих мортмассы: опада, отпада (в лесных сообществах), ветоши, подстилки, промежуточных гумусовых соединений и климатически активных газов.

В горах запасы мортмассы могут значительно колебаться в зависимости от конкретного природного комплекса и сезона [Malysheva et al., 2017; Abalori et al., 2022; Amanuel et al., 2018; Hilton, West, 2020; Jakšić et al., 2021]. Различия соотношения отмерших органов растений с зелеными фракциями могут достигать нескольких раз [Гуня, 2010]. В пик вегетационной активности субальпийских лугов мортмасса по отношению к зеленой фитомассе может достигать более 30% [Гулов и др., 2022] и даже более 40% веса фитомассы [Самбыла, 2014]. Образование мортмассы в результате отмирания зеленой массы происходит в разных ландшафтах с разной скоростью и в разное время. Так, в степных сообществах наиболее интенсивный период с апреля по сентябрь [Дубынина, 2018]. Запасы мортмассы во многом зависят от характера предшествующего года.

Особенно важно понять влияние климатических условий на скорость разложения составляющих мортмассы. Большое влияние на это оказывают не только суммы температур и осадков, но и суточные, сезонные и межгодовые колебания метеоклиматических параметров, которые выражаются в формировании и динамике состояний природных комплексов [Братков, Атаев, 2009; Атаев, Братков, 2009].

В данной работе целью является выявление основных факторов и условий, ле-

жащих в основе динамики соотношения зеленой фитомассы и мортмассы на ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике: Чернореченском (в природоохранной зоне г. Грозный) и Рошни-Чу (Чернолесье).

Методы исследований

Основными методами исследования стало крупномасштабное ландшафтное картографирование на ключевых участках [Гуния и др., 2022], детальные микроклиматические исследования с помощью установленных логгеров – датчиков температуры и влажности, а также наблюдения за состоянием растительного покрова по методике Н.Л. Беручашвили (1986) [Беручашвили, 1986]. Особое внимание уделялось замерам отдельных фракций мортмассы на различных участках и в разных условиях микрорельефа, биогеоценоза. Учет надземной фитомассы проводился методом обмера деревьев, последующего расчета объема и массы (отдельно стволов, веток, листьев, корней). Надземная травянистая фитомасса и мортмасса определялись на основе укосов с площадок размером 50×50 см в трехкратной повторности в различные периоды развития растительности. Зеленую растительную массу срезали на уровне почвы (P_i), ветошь (M_m), подстилку (M_l) и опад (M_d) отбирали отдельно. Для оценки биологической продуктивности использовались данные по запасам надземной массы на единицу площади (г/м², т/га). Ветошь, подстилка и опад образуют мортмассу (M_m + M_l + M_d – по Беручашвили, 1986) [Беручашвили, 1986]. Образцы фитомассы высушивались, затем взвешивались (ошибка подсчета среднего не превышает ±15 %). Отбирались также образцы почв для определения гумуса и основных питательных веществ.

Результаты работы и их обсуждение

Участок Черноречья

Участок карбонового полигона в Черноречье расположен в водоохранной зоне г. Грозный на высоте 169 м над уровнем моря на выровненной поверхности Чеченской равнины, прилегающей к террасовым комплексам р. Сунжа, сложенным верхнечетвертичными отложениями из суглинков, песков и глин. Здесь сформировались широколиственно-лесные ландшафты, находящиеся в настоящее время под природоохранным режимом. Мониторинговая площадка представляет выровненную



ную субгоризонтальную поверхность с дубовым с участием клена, ясеня, боярышника рыхлопокрытым, местами черемшovým и овсяницевым, лесом с большим количеством отпада деревьев (рис. 1).

Рис. 1. Дубовый разновозрастный лес на участке Черноречья /

Fig. 1. Oak forest of different ages on the site of Chernorechye

Первый древесный ярус высотой 20 м образован дубом черешчатым (*Quercus robur*), встречается клен полевой (*Acer campestre*), ясень (*Fraxinus excelsior*), боярышник (*Crataegus monogyna*), свидина (*Cornus sp.*). Лес находится в стадии восстановления, группы деревьев расположены нерегулярно, имеются поляны с повалившимися деревьями. На открытых участках больше ясеня. Диаметр стволов самых крупных экземпляров не превышает 50 см. Подлесок образует боярышник (высотой до 10 м), клен (до 10 м) и свидина высотой до 4 м.

Под дубовыми лесами часто встречаются почти сплошные куртины черемши (*Allium ursinum*) с проективным покрытием около 90%. Ближе к полянам в травянистом покрове преобладает разнотравье из овсяницы (*Festuca sp.*), подмаренника (*Galium sp.*), окопника (*Symphytum sp.*), морковника (*Silaum sp.*), вероники (*Veronica chamaedrys*), яснотки (*Lamium album*). Травянистый и почвенный покров часто нарушается рытвинами диких кабанов. Проективное покрытие травостоя вблизи полян составляет около 60%.

Под лесной растительностью сформировались черноземы с признаками выщелачивания; видимая мощность до 70 см. Опад постепенно переходит в темно-серую подстилку, рыхлую, с обилием корней, слаборазложившуюся с включением суглинистых фракций мощностью до 12 см (A0-A1). Это горизонт подстилается гумусово-иллювиальным горизонтом A(B) до 30 см, коричневато-серым, легкосуглинистым, комковато-ореховатым, с корнями, уплотненным. Ниже расположен иллювиальный горизонт B (30-52 см), светло-коричневый, среднесуглинистый, плотный, комковато-ореховатый. Нижняя часть профиля представлена горизонтом BC (52-70 см), каштановым, ореховатым, плотным, среднесуглинистым.

В верхних горизонтах почвы наблюдаются слабощелочные условия, но к нижним повышается щелочная среда (рН от 7,8 до 8,5), наблюдаются вкрапления известковистых образований (табл. 1). Содержание гумуса понижается от 6,8% в верхних горизонтах до 1,8% – в нижних. Черноземные почвы имеют гуматный (в горизонте А) и фульватно-гуматный (в горизонте В) состав гумуса, вследствие чего средневзвешенное содержание углерода в гумусе изменяется в пределах 51,1–50,5% [Королев, Громовик, 2018]. Учитывая эти расчеты, можно условно считать, что содержание углерода примерно в два раза меньше массы гумуса в почвах.

Таблица 1 / Table 1

Некоторые показатели плодородия почв участка Черноречье /
Some indicators of soil fertility of the Chernorechye site

Горизонт / Horizon	Мощность, см / thickness, cm	рН/pH	Содержание гумуса (%) / Humus content (%)	Содержание азота (мг/100 г) / Nitrogen content (%)	Соотношение C/N / C/N ratio	Содержание фосфора (мг/100 г) / Phosphorus content (mg/100 g)	Содержание калия (мг/100 г) / Potassium content (mg/100 g)
A0-A1	0-12	7,8	6,9	1,2	2,8	0,8	33
AB	12-30	7,9	5,6	1,4	2,0	0,6	20
B	30-52	8,3	2,9	1,4	1,0	0,6	20
B-BC	52-70	8,5	1,8	1,7	0,5	0,6	17

Содержание питательных веществ фосфора и калия низкое, оно падает от верхних к нижним горизонтам. При этом растет незначительно количество азота. Соотношения углерода к азоту почвы также показывают низкие показатели активности.

Определение фитомассы древостоя по методике, используемой при экспедиционных исследованиях [Беручашвили, Жучкова, 1997], выявило, что в сухом виде она составляет 203,6 т/га, из них на надземную часть приходится 162,8 т/га, на корни – 40,85 т/га (табл. 2). Такие значения фитомассы древостоя связаны с относительно молодым возрастом лесных насаждений, наличием большого количества полян. Значительное количество составляет отпад деревьев – около 10 т/га, в основном это клены. Собственно, экземпляры дуба еще достаточно молоды на нынешней стадии сукцессии. Воздушно-сухая травянистая фитомасса сильно различается в зависимости от местоположения, в пик вегетационного периода она составляет в среднем около 10 ц/га.

Таблица 2 / Table 2

**Фитомасса фракционных частей лесного сообщества участка Черноречья, т/га /
Phytomass of fractional parts of the forest community of the Chernorechye area, t/ha**

Деревья / Trees	Вес стволов / Weight of trunks	Вес листьев / Weight of leaves	Вес веток / Branch weight	Вес корней / Root weight
Дуб / Oak	119	3	28,5	38
Клен / Maple	0,46	0,01	0,07	0,13
Боярышник / Hawthorn	9,7	0,23	1,56	2,65
Ясень / Ash	0,02	0,0004	0,003	0,005
Свидина / Svidina	0,23	0,006	0,037	0,064
Всего / Total	129,41	3,25	30,17	40,85
Общий вес / Total weight	162,8 т/га			40,85 т/га

Участок Рошни-Чу (Чернолесье)

Участок карбонового полигона в Рошни-Чу расположен на северном макросклоне Чёрных гор на высотах от 418 до 542 м. Склон сложен палеоген-неогеновыми осадочными породами, представленными мергелями с прослоями аргиллитов, песчаников, алевролитов. Здесь сформировались низкогорные широколиственно-лесные ландшафты, в разной степени измененные человеком в результате многовекового использования под рубки, в меньшей степени под выпас скота. Мониторинговая



площадка находится в нижней части отрога хребта и представляет склон северо-восточной экспозиции крутизной 12–15°, местами осложненный микробуграми, с грабовым с участием ясеня, груши и вишни лещиновым рыхлопокровным лесом (рис. 2).

Рис. 2. Грабовый лещиновый рыхлопокровный лес на участке Рошни-чу /
Fig. 2. Hornbeam hazel loosely-covered forest on the Roshni-chu site

Первый древесный ярус высотой 15-16 м образован грабом (*Carpinus betulus*), единично в нем встречается ясень (*Fraxinus excelsior*) и плодовые деревья – груша (*Pyrus caucasica*) и черешня (*Cerasus avium*). Для граба характерна дву-, местами трехствольность, невысокий коэффициент стройности (0,4-0,5). Диаметр стволов составляет 24-58 см. Хорошо выраженный подлесок образует лещина (*Corylus avellana*), высота которой достигает 9-10 м. Для нее типична многоствольность, в том числе наличие сухих стволов. Диаметр стволов составляет 8-15 см. На поверхности почвы также наблюдаются поваленные стволы деревьев, сухие ветви. Немногочисленный подрост более разнообразен – встречается граб (высотой до 0,5 м), дуб (0,1 м), бук (0,2 м), ясень (0,02 м), клен (0,3 м), вяз (0,2 м).

В травяном покрове преобладает разнотравье – живучка (*Aiuga reptans*), купена (*Polygonatum orientale*), подлесник (*Sanicula europaea*), фиалка (*Viola canina*), примула (*Primula* sp.), земляника (*Fragaria vesca*), дремлик (*Epipactis helleborine*), есть осока (*Carex* sp.), встречается папоротник-щитовник (*Dryopteris filix-mas*). Проектное покрытие травостоя составляет 7%. Из внеярусных растений отмечен тамус (*Dioscorea communis*).

Под лесной растительностью сформировались буроземы мощностью до 51 см. Опад мощностью 1 см подстилается горизонтом 0А до 4 см с обилием корней и А – до 13 см, серо-коричневый, среднесуглинистый, непрочно комковатый, с корнями и включениями мергеля. Ниже расположены иллювиальный горизонт Вt (13-29 см), буро-коричневый, среднесуглинистый, плотный с пятнами ожелезнения, мелко-комковато-ореховатый и менее плотный ВС. Почвы не вскипают от 10% соляной кислоты в отличие от включений мергеля разного размера, число которых увеличивается в нижних горизонтах почв.

Определение фитомассы древостоя выявило, что в сухом виде она составляет 417,68 т/га, из них на надземную часть приходится 340,77 т/га, на корни – 76,91 т/га (табл. 3). Такие большие значения фитомассы древостоя связаны с произрастанием в лесу старых экземпляров граба большого диаметра – 59 и 50 см и груши (60,5 см). Значительна фитомасса и подлеска – надземная фитомасса достигает 29,6 т/га, подземная – 4,99 т/га. Воздушно-сухая травянистая фитомасса небольшая и составляет всего 0,1 т/га в июле.

Таблица 3 / Table 3

Фитомасса фракционных частей лесного сообщества, т/га /
Phytomass of fractional parts of the forest community, t/ha

Деревья / Trees	Вес стволов / Trunk weight	Вес листьев / Leaf weight	Вес веток / Branch weight	Вес корней / Root weight
Граб / Hornbeam	184,82	4,80	48,05	53,6
Груша / Pear	74,97	1,87	12,74	20,24
Вишня / Cherry	10,154	0,25	1,72	2,74
Ясень / Ash	1,17747	0,028	0,188	0,33
Всего / Total	271,12	6,95	62,7	76,91
	340,77 т/га			76,91
Кустарники / Shrubs	Вес стволов / Trunk weight	Вес листьев / Leaf weight	Вес веток / Branch weight	Вес корней / Root weight
Лещина / Hazel	16,63	1,33	11,64	4,99
Общий вес / Total weight	29,6			4,99

Сравнение и дискуссия

Таким образом, находящиеся в различных ландшафтных условиях фитоценозы участков Черноречья и Рошни-Чу обнаруживают различные условия для динамики углерода (рис. 3). Полученные данные сравнимы с оценками других исследователей. По данным Н.Л. Беручашвили (1995) [Беручашвили, 1995], суммарная фитомасса в грабовых лесах низкогорных ландшафтов составляет 192 т/га, при этом на наземную древесную фитомассу приходится 191 т/га, из на наземную 155 т/га при нулевой фитомассе кустарников. По другим данным, запас наземной фитомассы в грабовых лесах достигает 309,48 т/га, а подземной части – 67,30 т/га [Базилевич, 1993].

В случае Черноречья древесные фитоценозы являются относительно молодыми, здесь отмечаются следы долговременной человеческой деятельности, хотя в настоящее время введён природоохранный режим со строгим запретом на всякое использование. Здесь довольно большое количество мортмассы, которая находится в разных фракциях: отпад, опад, ветошь, подстилка. На участке Рошни-Чу наблюдается хозяйственная деятельность в виде выпаса, а до недавнего времени – заготовка дров и хвороста. Леса в отличие от чернореченских в основном зрелые, мертвопокровные. Запасы фитомассы превышают таковые в Черноречье почти в два раза. Очевидно, что разные биогеоциклы лежат в основе различной динамики углерода. Для изучения деталей этой динамики были использованы данные микроклиматических наблюдений на ключевых участках и регулярное наблюдение за динамикой фитомассы.



Рис. 3. Фитоценозы предгорно-лесных заповедуемых (Черноречье, слева) и низкогорно-лесных в состоянии использования (Рошни-Чу, справа) ландшафтов /

Fig. 3. Phytocenoses of foothill-forest protected (Chernorechye, left) and low-mountain-forest in a state of use (Roshni-Chu, right) landscapes

Весьма важны для определения интенсивности биогеоцикла температурные и влажностные условия. В Черноречье сумма осадков весьма неустойчива из года в год и не превышает 300 мм осадков преимущественно в жидком виде. В наблюдаемые годы сумма осадков составила с июня 2022 по июнь 2023 года 194 мм, что лежит ниже порога влажности для лесных ландшафтов. При этом основная доля осадков приходится на весенне-раннелетний период (рис. 4). Определенную долю влаги растения получают за счет внутрипочвенного стока и грунтовых вод. Они залегают относительно неглубоко в Черноречье и обеспечивают влагой корневые системы лесных сообществ.

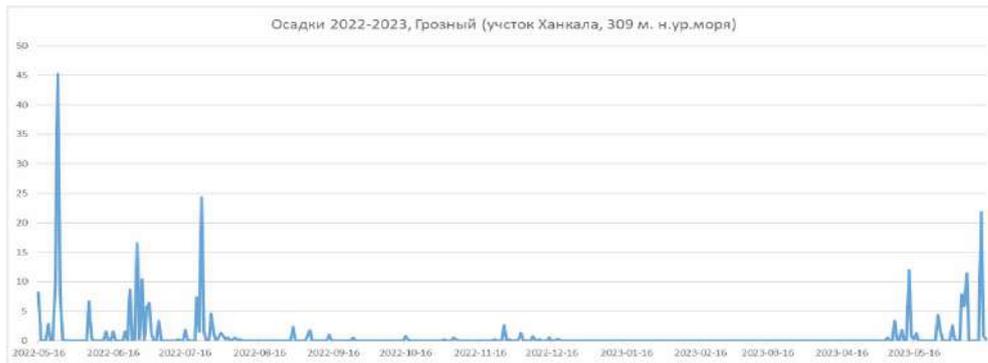


Рис. 4. Количество осадков в 2022-2023 году по данным метеостанции Ханкала (Кампус), 290 м н. у. м. /

Fig. 4. Precipitation in 2022-2023 according to the Khankala weather station (Campus), 290 m above sea level

Как показывают графики суточного хода температур в активный вегетационный период на ключевых участках (рис. 5), температурный режим на равнинном участке отличается большими амплитудами. Здесь максимальные температуры превышают 30° жары, а минимальные опускались до 10° тепла. В Рошни-Чу температурный ход более выровненный, что, по-видимому, обусловлено присклоновым положением участка, сформированным пологом леса, приглушающим температурные колебания.

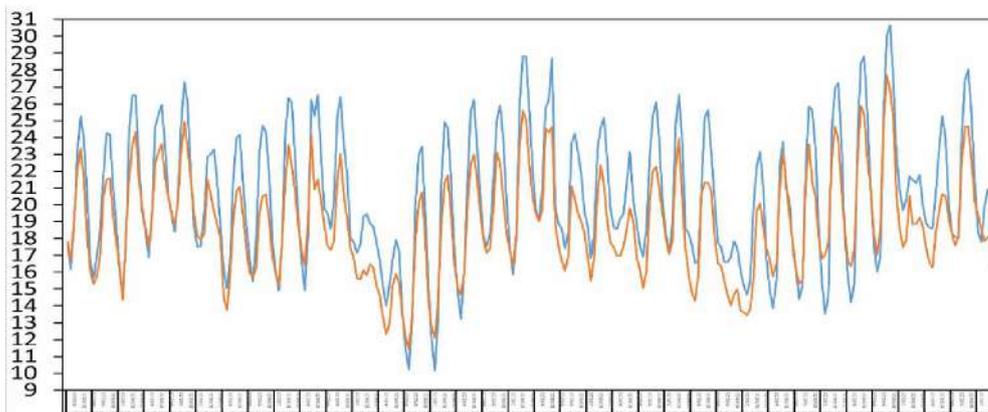


Рис. 5. Графики суточного хода температур с 26 мая по 30 июня на участках в Черноречье (синяя линия) и Рошни-Чу (красная линия) /

Fig. 5. Graphs of the daily course of temperatures from May 26 to June 30 at sites in Chernorechye (blue line) and Roshni-Chu (red line)

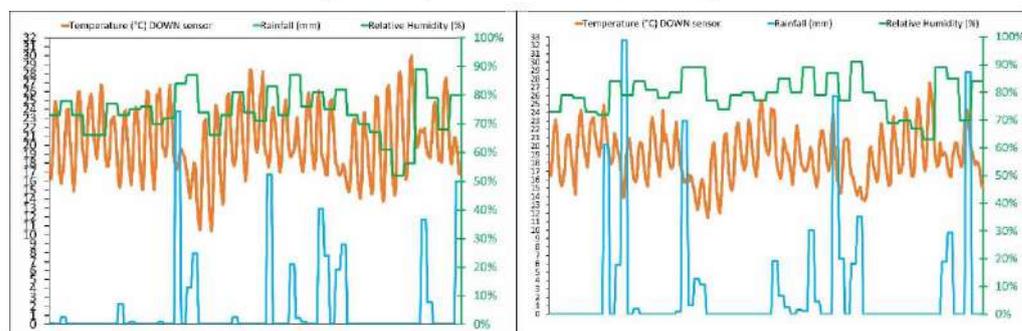


Рис. 6. Сравнение суточного хода температуры, осадков и влажности на участках в Черноречье (слева) и Рошни-Чу (справа) по данным логгеров /

Fig. 6. Comparison of the daily course of temperature, precipitation and humidity at sites in Chernorechye (left) and Roshni-Chu (right) according to loggers

Сравнение суточного хода температуры, осадков и влажности на ключевых участках (рис. 6) показывает, что в Рошни-Чу почти вдвое больше выпадает осадков, влажность здесь выше того количества тепла, которое могло бы быть затрачено на испарение. Под пологом леса наблюдается недостаток света для формирования травянистой растительности. Интенсивность биогеоцикла показывает мортмасса, а именно – опад из листьев и отпад (ветки и стволы деревьев). Они формируют подстилку, которая является звеном в депонировании углерода в почву. В ранневесеннем состоянии соотношение подстилки, опада и отпада демонстрирует рисунок 7. В абсолютных величинах количество мортмассы в это время достигает 8,96 т/га (сухой вес), что соответствует почти 4% всего запаса фитомассы в данном ландшафте.

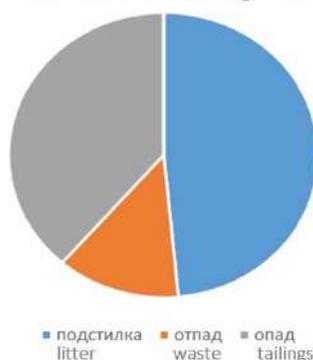


Рис. 7. Соотношение составляющих мортмассы в Рошни-Чу в конце апреля /

Fig. 7. The ratio of components of mortmass in Roshni-Chu at the end of April

В Черноречье, где фитоценозы находятся в стадии сукцессионного восстановления после долговременной антропогенной деятельности, соотношение разных фракций мортмасс, как и зеленой фракции, несколько иное (рис. 8). На открытых участках почти на порядок меньше отпада. В среднем же запасы мортмассы на конец апреля вдвое превышают таковые запасы в Рошни-Чу и составляют почти 10% от общих запасов фитомассы (включая древесную).

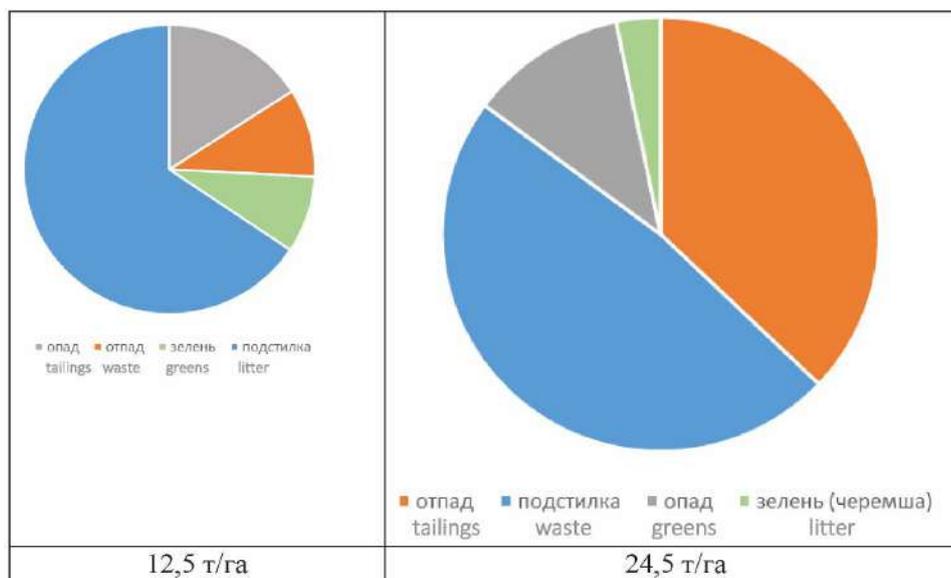


Рис. 8. Соотношение составляющих мортмассы в Черноречье в конце апреля на различных участках: более открытой (слева) и более сомкнутой (лес с черемшой) /

Fig. 8. The ratio of the components of the mortmass in Chernorechie at the end of April in various areas: more open (left) and more closed (forest with wild cherry)

Относительно большая доля фитомассы, которая переходит в мортмассу и далее депонируется в почву, объясняет и значительную мощность подстилки с относительно высоким содержанием гумуса. Последующие замеры мортмассы в начале июня и затем в начале июля показали, что значительная часть оставшегося с зимы опада из листьев перешло в подстилку, которая в свою очередь подверглась процессам гумификации и пополнила верхний горизонт А0-А1. К середине лета мортмасса на участках с незначительным количеством опада уменьшилась почти на половину. В этом случае, соотношение количества мортмассы составило около 3% от зеленой фитомассы. Такие большие скорости поднимают вопросы о том, как происходит разложение мортмасс, а главное – куда поступает углерод. Известно, что в наземной мортмассе углерод быстро уменьшается при переходе из опада в подстилку и далее в почву. Значительная часть углерода выделяется в форме CO_2 [Маркарова и др., 2022]. Уже в подстилке углерода содержится 25-40% [Родин, Базилевич, 1965]. Основная часть мортмассы (93-98%), разлагаясь, минерализуется до CO_2 и возвращается в атмосферу [Ведрова и др., 2018]. Другое важное наблюдение для понимания депонирования углерода заключается в установлении связи показателя соотношения углерода и азота к запасу наземной мортмассы. В случае Черноречья наблюдается относительно низкое соотношение углерода к азоту и довольно высокое количество наземной мортмассы. Пониженная активность почв не способствует росту деревьев (см., например, [Marshall et al., 2019]), депонированию углерода в почву, подавляющее большинство мортмассы разлагается на летучие соединения и газы. Следует предположить, что, повышая активность почв (за счет повышения соотношения углерода к азоту), можно добиться минерализации мортмассы и соответственно – увеличения ее депонирования в почву. Для более детального анализа роли C/N необходимы дополнительные эксперименты.

Выводы

Наблюдения на ключевых участках и расчет разных фракций фитомассы позволили охарактеризовать условия по эмиссионному потенциалу природных комплексов участков карбонового полигона. Количество фитомассы в низкогорных ландшафтах (Рошни-Чу) почти в два раза превышает количество фитомассы на равнине (Черноречье). Это объясняется различными почвенно-климатическими условиями и антропогенной деятельностью. Смена состояний природных комплексов участков карбонового полигона от холодного к теплым периодам и связанная с этим интенсивность тепловлагообмена лежат в основе динамики перехода зеленой фитомассы в мортмассу, а также почву и газы. Переход в мортмассу различается. Заповедование на участке Черноречья ведет к более интенсивному накоплению наземной мортмассы, восстановлению подлеска, более сложно устроенной вертикальной структуры. Однако это не гарантирует депонирования углерода в почвах, большая его часть уходит в атмосферу. По всей видимости, нужны меры для утилизации наземной мортмассы, направленные на депонирование углерода.

Литература

1. Атаев З.В., Братков В.В. Геомассы высокогорных луговых ландшафтов Северо-Западного и Северо-Восточного Кавказа. // Проблемы региональной экологии. – 2009. – № 4. – С. 76-83.
2. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: На-

ука, 1993. – 293 с.

3. Беручашвили Н.Л. Четыре измерения ландшафта. М.: Мысль, 1986. – 182 с.
4. Беручашвили Н.Л. Кавказ: ландшафты, модели, эксперименты. Тбилиси, 1995. – 314 с.
5. Беручашвили Н.Л., Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. – 320 с.
6. Братков В.В., Атаев З.В. Высокогорные луговые ландшафты Северо-Западного и Северо-Восточного Кавказа. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. // Естественные и точные науки. – 2009. – № 2 (7). – С. 93-103.
7. Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В., Метелева М.К. Трансформация органического вещества подстилки в лесных культурах. Лесоведение. – 2018. – № 1. – С. 24-36.
8. Гулов Д.М., Онипченко В.Г., Мартыненко В.Б., Федоров Н.И., Логвиненко О.А., Узденев У.Б., Хубиева О.П. Состав надземной фитомассы субальпийского высокоотравья в Тебердинском национальном парке. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2022. – Т. 127. № 5. – С. 46-53.
9. Гуня А.Н. Ландшафтные основы анализа природных и природно-антропогенных изменений высокогорных территорий. Нальчик, Издательство КБНЦ РАН. – 2010. – 198 с.
10. Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т.12 (3). – С. 170-181.
11. Дубынина С.С. Пространственно-временная динамика мортмассы в фациях полигон-трансекта территории койбальской степи. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 8. – С. 113-117.
12. Королев В.А., Громовик А.И. К вопросу о расчете содержания гумуса в почвах разного типа. // Вестник ВГУ, серия: химия, биология, фармация. – 2018. – № 2. – С. 152-155.
13. Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Керимов И.А., Эльжаев А.С., Мамадиев Н.А. Анализ парниковых газов на нефтезагрязненных территориях и разработка методов их биорекультивации (на примере г. Грозный). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т.12 (4). – С. 153-168. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.77.012
14. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологического круговорота в основных типах растительности. М. Наука, 1965. – 252 с.
15. Самбыла Ч.Н. Влияние проективного покрытия и высоты травостоя на фитомассу луговых сообществ субальпийского пояса Западного Саяна. // Мир науки, культуры, образования. – 2014. – № 6 (49). – С. 549-552.
16. Abalori T.A., Cao W., Weobong C. A.-A., Wang S., Anning D.K., Sam F.E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. – *Chilean Journal of Agricultural Research*. – 2022 – 82(1). – pp. 52–64. DOI:10.4067/s0718-58392022000100052.
17. Amanuel W., Yimer F. and Karlun E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. // *Journal of Ecology and Environment*. – 2018 – 42(1). – pp. 1-11.
18. Hilton R.G., West A.J. Mountains, erosion and the carbon cycle. // *Nature Reviews Earth and Environment*. – 2020 – 1 – pp. 284–299. DOI:10.1038/s43017-020-0058-6.
19. Jakšić, S., Ninkov, J., Milić, S., Vasin, J., Živanov, M., Jakšić, D., Komlen, V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. // *Sustainability*. – 2021. – 13(15). 8332. DOI:10.3390/su13158332.
20. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. // *InterCarto. InterGIS*. – 2017. – Vol. 23. – pp. 373–382. DOI:10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382.
21. Marshall L.A., Falk Donald A., Mcdowell Nate G. Nitrogen can limit overstory tree growth following extreme stand density increase in a Ponderosa pine forest. // *Tree-Ring Research*. – 2019 – Vol. 75, Issue 1, pp. 49-60.

References

1. Ataev Z.V., Bratkov V.V. Geomasses of high-altitude meadow landscapes of the North-Western and North-Eastern Caucasus. *Problems of regional ecology*. 2009. No. 4. pp. 76–83. (In Russ.)
2. Bazilevich N.I. *Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia*. M.: Nauka. 1993. 293 p. (In Russ.)
3. Beruchashvili N.L. *Four dimensions of the landscape*. Moscow. Mysl. 1986. 182 p. (In Russ.)
4. Beruchashvili N.L. *Caucasus: landscapes, models, experiments*. Tbilisi. 1995. 314 p. (In Russ.)
5. Beruchashvili N.L., Zhuchkova V.K. *Methods of complex physical and geographical research*. Moscow. MSU. 1997. 320 p. (In Russ.)
6. Bratkov V.V., Ataev Z.V. High-altitude meadow landscapes of the North-Western and North-Eastern Caucasus. *News of Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2009. No. 2 (7). pp. 93–103. (In Russ.)
7. Vedrova E.F., Mukhortova L.V., Meteleva M.K. Transformation of organic matter of litter in forest crops. *Forestry*, 2018. No. 1. pp. 24–36. (In Russ.)
8. Gulov D.M., Onipchenko V.G., Martynenko V.B., Fedorov N.I., Logvinenko O.A., Uzdеноv U.B., Khubieva O.P. Composition of aboveground phytomass of subalpine tallgrass in Teberdinsky National Park. *Bulletin of the Moscow Society of Nature Testers. Department of Biology*. 2022. Vol. 127. No. 5. pp. 46–53. (In Russ.)
9. Gunya A.N. *Landscape fundamentals of the analysis of natural and natural-anthropogenic changes in high-altitude territories*. Kabardin-Balkar scientific center of RAS. Nalchik. 2010. 198 p. (In Russ.)
10. Gunya A.N., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.S. Study of landscape structure for assessment of carbon balance of mountain ecosystems. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 170–181. (In Russ.)
11. Dubynina S.S. Spatial-temporal dynamics of mortmass in facies of the polygon-transect of the territory of the Koibal steppe. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018. No. 8. pp. 113–117. (In Russ.)
12. Korolev V.A., Gromovik A.I. On the issue of calculating the humus content in soils of different types. *Bulletin of VSU, series: chemistry, biology, pharmacy*. 2018. No. 2. pp. 152–155. (In Russ.)
13. Markarova M.Yu., Makhmudova L.Sh., Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Mamadiev N.A. Analysis of greenhouse gases in oil-contaminated territories and development of methods of their biorecultivation (on the example of Grozny). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No 4. pp. 153–168. DOI: 10.46698/VNC.2022.19.77.012. (In Russ.)
14. Rodin L.E., Bazilevich N.I. *Dynamics of organic matter and biological cycle in the main types of vegetation*. Moscow. Nauka. 1965. 252 p. (In Russ.)
15. Sambyla Ch.N. The influence of the projective cover and the height of the herbage on the phytomass of meadow communities of the subalpine belt of the Western Sayan. *The world of science, culture, education*. 2014. No. 6. Issue 49. pp. 549–552. (In Russ.)
16. Abalori T.A., Cao U., Weobong K. A.-A., Wang S., Anning D. K., Sam F.E., Liu U., Wang U. Spatial variability of organic carbon fractions in soil and stability of aggregates along the elevation gradient in alpine meadows in the Qilian Mountains, China. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2022. Vol. 82. No. 1. 52–64. DOI:10.4067/s0718-58392022000100052.
17. Amanuel W., Yimer F. and Karlton E. Changes in the content of organic carbon in soil due to changes in land use: an example of the Birr watershed, the upper reaches of the Blue Nile River basin, Ethiopia. *Journal of Ecology and Environmental Protection*. 2018. Vol. 42. P. 16.
18. Hilton R.G., West A.J. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2020. Vol. 1. pp. 284–299. DOI: 10.1038/s43017-020-0058-6.

19. Yakshich S., Ninkov J., Milich S., Vasin J., Zhivanov M., Yakshich D., Komlen V. The influence of the slope and type of terrain on the organic carbon content in the soil in the Nis region, Serbia. *Stability*. 2021. Vol. 13. No. 15. 8332. DOI: 10.3390/su13158332.

20. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Assessment of carbon uptake by Russian forests: a geospatial issue. *InterCarto, InterGIS*. 2017. Vol. 23. pp. 373–382. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382 .

21. Marshall L.A., Falk Donald A., McDowell Nate G. Nitrogen can limit the growth of trees in the upper tier after an extreme increase in stand density in the Ponderosa pine forest. *Tree Ring Research*. Vol. 75. Issue 1. pp. 49–60.

УДК 551.510.42

DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

Оригинальная статья

Модельный подход для восстановления приземных вертикальных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью

Ю.В. Мухартова^{1,2}, Р.Р. Гибадуллин^{1,2}, А.В. Ольчев^{1,2}, И.А. Керимов^{2,3}

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, ГСП-1;

² ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100;

³ ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10 стр. 1, muhartova@yandex.ru

Статья поступила: 26.09.2023, доработана: 05.12.2023, принята к публикации: 07.12.2023

Резюме: Актуальность работы. Основные используемые на данный момент методы измерения потоков парниковых газов в полевых условиях, такие как метод экспозиционных камер и метод турбулентных пульсаций, имеют ряд методических ограничений. Это затрудняет их широкое использование на местности с неоднородной подстилающей поверхностью, особенно в горных регионах. Поэтому весьма актуальной является задача разработки новой рабочей методики для оценки потоков парниковых газов, применимой над поверхностями со сложным рельефом и неоднородной растительностью, основанной на методах дистанционного зондирования и математическом моделировании. **Цель работы** заключается в формулировке методики оценки потоков парниковых газов на основе данных измерений концентрации парниковых газов на двух уровнях над поверхностью и применения трехмерной гидродинамической модели турбулентного переноса парниковых газов. Также цель работы включает исследование репрезентативности предложенной методики. **Методы исследования.** С помощью разработанной ранее гидродинамической модели, модифицированной для учета влияния рельефа, оценивается коэффициент турбулентного обмена для парниковых газов и поле скорости ветра. При наличии измеренных полей концентрации парникового газа на двух уровнях над поверхностью (например, с помощью БПЛА) и модельных данных для коэффициента турбулентности и скорости ветра поток парникового газа оценивается по предложенной в работе приближенной формуле, включающей в себя аппроксимацию вертикального турбулентного и адвективного потоков. Приближенная формула может также использоваться как начальное приближение при решении обратной задачи оценки потока парникового газа, также сформулированной в работе. **Результаты работы.** На основе ряда численных экспериментов, проведенных для лесного участка карбонового полигона в Рошни-Чу (Чеченская республика) и предложенной в работе аналитической оценки получено распределение потоков CO₂ над кронами деревьев, проведено их сравнение с теоретически ожидаемым распределением, а также найдены оптимальные уровни над поверхностью для проведения измерений концентрации парниковых газов.

Ключевые слова: парниковые газы, обратная задача, неоднородная поверхность, карбоновый полигон, дистанционное зондирование, трехмерная гидродинамическая модель.

Благодарности: Исследования на карбоновом полигоне в Чеченской республике и численные эксперименты выполнены в рамках реализации темы госзадания ГГНТУ имени академика М. Д. Миллионщикова.

ва, FZNU-2021-0012. Разработка математической модели выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-55.

Для цитирования: Мухартова Ю.В., Гибадуллин Р.Р., Ольчев А.В., Керимов И.А. Модельный подход для восстановления приземных вертикальных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 149-161 DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

Original paper

Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas

I.V. Mukhartova ^{1,2}, R.R. Gibadullin ^{1,2}, A.V. Olchev ^{1,2}, I.A. Kerimov ^{2,3}

¹ Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1 Leninskie Gory,
Moscow 119991, Russian Federation;

² Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, 100
Ave. H.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation;

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10, build.1, B.
Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation, muhartova@yandex.ru

Received: 26.09.2023, revised: 05.12.2023, accepted: 07.12.2023

Abstract: Relevance of the work. The main methods currently used to measure greenhouse gas fluxes in the field, such as the chamber method and the eddy covariance method, have a number of methodological limitations. This makes it difficult to apply these methods widely in terrain with inhomogeneous underlying surface, especially in mountainous regions. Therefore, the task of developing a new working methodology for estimating greenhouse gas fluxes applicable over surfaces with complex topography and inhomogeneous vegetation based on remote sensing methods and mathematical modeling is very urgent. **The aim of the paper** is to formulate a methodology for retrieving greenhouse gas fluxes based on the data of greenhouse gas concentration measurements at two levels above the surface and the application of a three-dimensional hydrodynamic model of turbulent greenhouse gas transport. Aim of the paper also includes the study of the representativeness of the proposed methodology. **Research Methods.** Using a previously developed hydrodynamic model modified to account for the effect of topography, the turbulent exchange coefficient for greenhouse gases (GHG) and the wind speed field are estimated. With measured GHG concentration fields at two levels above the surface (e.g., using a UAV) and model data for the turbulence coefficient and wind speed, the GHG flux is estimated using the rough formula proposed in the paper, which includes an approximation of the vertical turbulent and advective fluxes. The proposed formula can also be used as a first approximation for solving inverse problem of GHG flux retrieval, which is also given in the paper. **Results.** Based on a series of numerical experiments that were carried out for the forest area of the Carbon Experimental Site in Roshni-Chu (Chechen Republic) and the analytical evaluation proposed in the paper, the distribution of CO₂ fluxes over the tree canopy was obtained. They compared with the theoretically expected distribution, and the optimal levels above the surface for measuring greenhouse gas concentrations were found.

Keywords: greenhouse gases, inverse problem, heterogeneous surface, carbon polygon, remote sensing, 3D hydrodynamic model.

Acknowledgements: Field measurements at the Roshny-Chu forest site in the Chechen Republic and modeling experiments were supported by the State Assignment of the Grozny State Oil Technical University (Project Reg. No. FZNU-2021-0012). The development of the model was supported by the MSU Development Program, Project No. 23-SCH07-55.

For citation: Mukhartova I.V., Gibadullin R.R., Olchev A.V., Kerimov I.A. Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 149-161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

Введение

В настоящее время в связи с растущей антропогенной нагрузкой на атмосферу задача исследования и оценки потоков парниковых газов (ПГ) между подстилающей поверхностью и атмосферой является весьма актуальной [Pörtner et al., 2022; Dong et al., 2021; Yue et al., 2018]. Внимание также уделяется исследованию уровня загрязнения атмосферного воздуха в городских условиях [Заалишвили и др., 2023]. Основными современными методами для измерения потоков парниковых газов в полевых условиях являются метод экспозиционных камер и метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) [Aubinet, et al., 2012; Pumpanen et al., 2004]. Однако в силу имеющихся методических ограничений широкое использование этих методов сильно затруднено. Для корректного использования метода турбулентных пульсаций необходима горизонтальная однородность подстилающей поверхности и пренебрежимо малые дивергенция и конвергенция воздушного потока [Foken, 2008]. Метод экспозиционных камер может использоваться для измерения потоков у поверхности почвы с невысокой растительностью, в том числе на местности с сильно расчлененным рельефом, однако для получения пространственного распределения потоков на исследуемом участке требуется проведение большого числа одновременных измерений в различных точках исследуемого участка [Molchanov et al., 2017]. Особую сложность представляет измерение потоков данными методами в горных регионах как в связи со значительной неоднородностью поверхности, так и зачастую из-за их труднодоступности. В связи с этим исследованиям потоков парниковых газов в горных регионах, в частности, на Кавказе, до недавнего времени уделялось мало внимания. Таким образом, весьма актуальной является задача разработки новой рабочей методики для оценки потоков парниковых газов, применимой над поверхностями со сложным рельефом и неоднородной растительностью. Значительную роль при этом могут играть методы дистанционного зондирования [Pirk et al., 2022; Basu et al., 2013; Yang et al., 2017; Sharma et al., 2022; Reuter et al., 2021; Kunz et al., 2020] и математическое моделирование.

Предложенная в данной работе методика оценки потоков ПГ основана на использовании измеренных полей концентрации ПГ на двух уровнях над поверхностью (например, с помощью БПЛА), и трехмерной гидродинамической модели, позволяющей вычислять установившееся распределение поля скорости ветра, коэффициента турбулентности и концентрации ПГ. В работе предложено приближенное выражение для определения потоков, проведено исследование вычисляемого с его помощью потока в зависимости от высоты измерительных уровней над поверхностью и погрешности измерения концентраций. Сформулирована и проанализирована постановка обратной задачи оценки вертикальных потоков, для которой указанное приближенное выражение может использоваться как начальное приближение.

1. Гидродинамическая модель

Для вычисления распределения скорости ветра в атмосферном пограничном слое с учетом структуры рельефа и растительного покрова была использована трехмерная гидродинамическая модель, основанная на усредненном уравнении Навье-

Стокса, разложении Рейнольдса и применении гипотезы Буссинеска. Первоначальная конфигурация модели [Mukhartova et al., 2023] была модифицирована с учетом рельефа.

Предположим, что Π – участок местности прямоугольной формы $\{(x, y) \in \Pi : x \in (0, L_x), y \in (0, L_y)\}$, в пределах которого рельеф описывается функцией $h(x, y)$. Выберем систему координат так, чтобы минимальное значение $h(x, y)$ соответствовало $z=0$, и рассмотрим задачу в прямоугольном параллелепипеде $\{(x, y) \in \Pi, z \in (0, H)\}$, где верхняя граница области H соответствует высоте атмосферного пограничного слоя. Скорость воздушного потока $\vec{V} = \{u, v, w\}$ представим в виде суммы $\vec{V} = \bar{\vec{V}} + \vec{V}'$, где $\bar{\vec{V}}$ – средняя скорость, \vec{V}' – отклонения скорости потока от среднего. В предположении о несжимаемости воздуха ($\rho = const$) для $\bar{\vec{V}}$ получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial \bar{\vec{V}}}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \bar{\vec{V}} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - (\nabla, \bar{\vec{V}}') \bar{\vec{V}}' + \vec{F}_{cor} + \vec{F}_d + \vec{F}_r + \vec{g}, \quad \text{div } \bar{\vec{V}} = 0,$$

где ρ – средняя плотность воздуха, $P = \bar{P} + \delta P$ – давление, \bar{P} – среднее давление, δP – компонента давления, обусловленная взаимодействием с препятствиями, \vec{g} – ускорение свободного падения, $\vec{F}_{cor} = \{f\bar{v}, -f\bar{u}, 0\}$ – сила Кориолиса, $\vec{F}_d = -c_d PLAD |\bar{\vec{V}}| \bar{\vec{V}}$ – сопротивление растительности, $PLAD$ –

проективная плотность элементов растительности. Рельеф в модели рассмотрен как слабопроницаемое препятствие с большим коэффициентом сопротивления и учитывается с помощью выражения $\vec{F}_r = -TOPO |\bar{\vec{V}}| \bar{\vec{V}}$, где функция $TOPO(x, y, z)$ равна коэффициенту сопротивления G_0 , если $z \in [0, h(x, y)]$, и нулю, если $z > h(x, y)$. Компоненты турбулентного потока момента импульса имеют вид:

$$\begin{aligned} \overline{(u')^2} &= \frac{2}{3} E - 2K \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, & \overline{(v')^2} &= \frac{2}{3} E - 2K \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, & \overline{(w')^2} &= \frac{2}{3} E - 2K \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}, \\ \overline{u'v'} &= -K \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), & \overline{u'w'} &= -K \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right), & \overline{v'w'} &= -K \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

где E – турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ), $K = C_\mu E^2 / \varepsilon$ – коэффициент турбулентности, ε – скорость диссипации ТКЭ, C_μ – функция устойчивости.

При использовании замыкания полуторного порядка функции E и $\omega = \varepsilon / E$ находятся из уравнений типа диффузия-адвекция [Mukhartova et al., 2023; Sogachev, Panferov, 2006; Sogachev et al., 2002]. Граничные условия задачи подробно описаны в работе [Mukhartova et al., 2023]. Начальные условия выбираются согласованными с логарифмическим профилем распределения скорости ветра в приземном слое атмосферы и соответствующими выражениями для E и ω , которые были бы справедливы над однородной подстилающей поверхностью:

$$|\bar{\vec{V}}_0(x, y, z)| = \frac{u_*(x, y)}{\kappa} \ln \frac{z - h(x, y)}{z_0}, \quad E_0(x, y, z) = u_*^2(x, y) \cdot C_\mu^{-1/2}, \quad \omega_0(x, y, z) = \frac{u_*(x, y) \cdot C_\mu^{1/2}}{\kappa(z - h(x, y))},$$

где κ - постоянная фон Кармана, z_0 - параметр шероховатости поверхности (для низкой растительности), $u_*(x, y)$ - динамическая скорость, описываемая как:

$$u_*(x, y) = \kappa V_{\max} \cdot \left(\ln \frac{H - h(x, y)}{z_0} \right)^{-1}.$$

Задача для компонент скорости ветра и коэффициента K решается как задача на установление и позволяет получить распределение \bar{V} и K с учетом структуры подстилающей поверхности.

Прямая задача для вычисления распределения концентрации искомого ПГ над поверхностью заключается в решении уравнения диффузии-реакции-адвекции с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{V}, \nabla)C = \text{div}(K_C \nabla C) + F_b - F_{ph}, & t > 0, (x, y) \in \Pi, z \in (h(x, y), H), \\ C|_{t=0} = C_0, \quad C|_{z=H} = C_0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0, x=L_x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=0, y=L_y} = 0, \quad -K_C \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{z=h(x, y)} = q_n(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

где нижняя граница области описывается функцией $h(x, y)$, \bar{n} - единичная нормаль к границе $z = h(x, y)$, направленная вверх. В уравнении (1) \bar{V} - известное установившееся распределение средней скорости воздушного потока, $K_C = K/Sc$ - коэффициент турбулентной диффузии для рассматриваемого ПГ, Sc - число Шмидта, значение C_0 соответствует средней концентрации ПГ в приземном слое атмосферы, $\vec{q}(x, y)$ - поток соответствующего ПГ у поверхности почвы, $q_n = (\vec{q}, \bar{n})$ - проекция потока на нормаль \bar{n} , слагаемое F_b описывает источники ПГ внутри растительного покрова, слагаемое F_{ph} описывает его стоки внутри растительного покрова. Условия Неймана для концентрации на боковых границах области не являются условиями непроницаемой стенки. Скорость ветра на этих границах не равна 0, и условия Неймана для C являются так называемыми условиями сноса [Елизарова 2005]. В данном случае их можно также интерпретировать как предположение о пренебрежимо малом горизонтальном градиенте концентрации вблизи границ в направлении нормали к границе, если границы расположены достаточно далеко от центральной части расчетной области, представляющей наибольший интерес при исследовании. Начально-краевая задача (1) также решается как задача на установление. Когда установившееся пространственное распределение концентрации найдено, турбулентные потоки ПГ могут быть оценены по формуле $\vec{q}^{turb} = \overline{C'V'} = -K_C \nabla C$, а для адвективных потоков можно использовать выражения [Blanken et al., 2009; Feigenwinter et al., 2008; Leuning et al., 2008]:

$$q_u^{adv} = \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \text{sgn}(\bar{u}) \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} dz, \quad q_v^{adv} = \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \text{sgn}(\bar{v}) \bar{v} \frac{\partial C}{\partial y} dz, \quad q_w^{adv} = \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \text{sgn}(\bar{w}) \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} dz.$$

Предположим теперь, что из измерений известны распределения концентрации ПГ на двух уровнях над поверхностью: $C_{\text{exp}}^{(1)}(x, y)$ на уровне $h(x, y) + h_1$ и $C_{\text{exp}}^{(2)}(x, y)$ на уровне $h(x, y) + h_2$, где $h_2 > h_1 > h_{\text{forest}}$, h_{forest} -

максимальная высота деревьев в древостое. Используя гидродинамическую модель, можно найти $K_C^{(1)}(x, y) = K_C(x, y, h(x, y) + h_1)$ и $K_C^{(2)}(x, y) = K_C(x, y, h(x, y) + h_2)$, а также $w^{(1)}(x, y) = w(x, y, h(x, y) + h_1)$ и $w^{(2)}(x, y) = w(x, y, h(x, y) + h_2)$. Вертикальную составляющую потока можно в первом приближении оценить по формуле

$$\tilde{q}_w = -K_C^{(m)} \frac{C_{\text{exp}}^{(2)} - C_{\text{exp}}^{(1)}}{h_2 - h_1} + \text{sgn}(\bar{w}^{(m)}) \bar{w}^{(m)} \frac{C_{\text{exp}}^{(2)} - C_{\text{exp}}^{(1)}}{h_2 - h_1} \Delta z, \quad (2)$$

$$\text{где } K_C^{(m)} = \frac{K_C^{(1)} + K_C^{(2)}}{2}, \quad \bar{w}^{(m)} = \frac{\bar{w}^{(1)} + \bar{w}^{(2)}}{2}.$$

Формула (2) дает достаточно грубое приближение потока, и в случае, когда его точности для целей задачи недостаточно, оно может быть использовано как начальное приближение для решения обратной задачи по оценке потока. Обратная задача основана на многократном решении упрощенной задачи (3) для распределения концентрации выше некоторого уровня $h(x, y) + h_{\text{flux}}$, $h_{\text{flux}} > h_{\text{forest}}$:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{V}, \nabla)C = \text{div}(K_C \nabla C), \quad t > 0, (x, y) \in \Pi, z \in (h(x, y) + h_{\text{flux}}, H), \\ C|_{t=0} = C_0, C|_{z=H} = C_0, \frac{\partial C}{\partial x}\Big|_{x=0, x=L_x} = 0, \frac{\partial C}{\partial y}\Big|_{y=0, y=L_y} = 0, (\bar{V}, \bar{n})C - K_C \frac{\partial C}{\partial n}\Big|_{z=h(x, y)+h_{\text{flux}}} = q_n(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

при различных значениях $q_n(x, y) = (\bar{q}, \bar{n})\Big|_{z=h(x, y)+h_{\text{flux}}}$. При этом $q_n(x, y)$ изменяется направленно, так чтобы минимизировать функционал

$$\|C^{\text{exp}} - C^{\text{mod}}\|^2 = \frac{\int_{\Pi} \left\{ \left(C_{\text{exp}}^{(1)}(x, y) - C(x, y, h(x, y) + h_1) \right)^2 + \left(C_{\text{exp}}^{(2)}(x, y) - C(x, y, h(x, y) + h_2) \right)^2 \right\} dx dy}{\int_{\Pi} dx dy} \quad (4)$$

2. Численные эксперименты

В качестве объекта изучения для проверки и исследования разработанной модели была выбрана экспериментальная площадка лесного участка карбонового полигона в Рошни-Чу в Чеченской республике, расположенного в предгорных районах Большого Кавказского хребта (43°03'47.0"с.ш., 45°23'13.3"в.д.) [Керимов и др., 2023]. Участок Рошни-Чу представляет собой переходный тип от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-лугово-кустарниковому подтипу. Площадь исследуемой территории около 243 га. Рельеф участка сильно расчлененный с перепадом высот от 400 до 600 метров. Растительность представлена смешанными буково-грабовыми лесами, с участием дуба кавказского, ильма полевого, ольхи черной и бородавчатой, и клена полевого. Отличительной особенностью растительного покрова является присутствие диких плодовых видов древесной и кустарниковой растительности [Керимов и др., 2021]. Рельеф рассматриваемого участка и его границы на спутниковом снимке представлены на рисунке 1.

В ходе полевых работ летом 2022 года были проведены измерения почвенных потоков CO₂ и дыхания стволов деревьев на рассматриваемой территории. Почвенные потоки измерялись с помощью портативной почвенной камеры, соединенной с мобильным газоанализатором G4301 (Picarro, США).

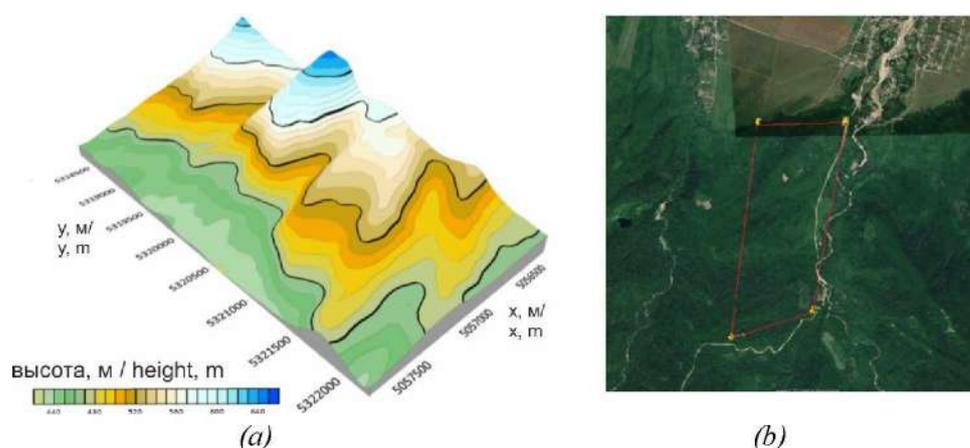


Рис. 1. Рельеф (а) и спутниковый снимок (б) экспериментального участка Рошни-Чу. Красная линия обозначает границы экспериментального участка /

Fig. 1. Topography (a) and satellite image (b) of the Roshni-Chu experimental site. The red line indicates the boundaries of the experimental site

Для оценки $LAI(x,y)$ были использованы данные Landsat 8 по NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Данные по структуре растительности и рельефа, пространственному распределению источников и стоков CO_2 у поверхности почвы и внутри растительности использовались в качестве входных параметров гидродинамической модели. Для численных экспериментов был выбран ясный солнечный день (погодные условия для 26 августа 2022 года) с преобладающим юго-восточным направлением ветра.

Из-за отсутствия экспериментально измеренных концентраций $C_{exp}^{(1)}(x,y)$ и $C_{exp}^{(2)}(x,y)$ на двух уровнях над поверхностью, для исследования разработанного алгоритма оценки потоков значения $C_{exp}^{(1)}(x,y)$ и $C_{exp}^{(2)}(x,y)$ были смоделированы путем внесения инструментальной погрешности в результаты решения задачи (2). Задача (2) решалась численно на достаточно детальной сетке с шагом 40 м по направлениям x и y (37 узлов сетки по направлению x и 100 по направлению y) и квазиравномерной сетке по высоте. По вертикали было выделено 524 слоя с минимальным шагом 0.5 м и максимальным шагом 19 м вблизи верхней границы области. Вычисленные значения концентрации C на уровнях $h(x,y)+h_1$ и $h(x,y)+h_2$ интерполировались на грубую сетку, содержащую 10 точек по направлению x и 20 точек по направлению y , и к полученным значениям добавлялась погрешность $dC = \delta C \cdot r_n$, если $|r_n| \leq 1$, и $dC = \delta C \cdot \text{sgn}(r_n)$, если $|r_n| > 1$, где δC - максимально возможная погрешность, r_n - случайная величина, имеющая нормальное распределение. В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты имитации экспериментальных данных по концентрации CO_2 на уровнях 45 м и 60 м над поверхностью земли.

С помощью смоделированных “экспериментальных” данных по формуле (2) были проведены оценки вертикальных потоков CO_2 (рис. 3).

Из рисунка 3 видно, что грубая оценка потока по формуле (2) дает довольно сильное завышение эмиссии CO_2 в отдельных точках модельной области и слабо воспроизводит пространственную структуру теоретического

распределения потока. Из этого можно сделать вывод, что для корректного использования оценки (2) необходима предварительная обработка измеренных полей концентраций CO_2 . Для этого была проведена фильтрация значений $C_{\text{exp}}^{(1)}(x, y)$ и $C_{\text{exp}}^{(2)}(x, y)$ с помощью фильтра Гаусса. Использование фильтрованных данных $C_{\text{filt}}^{(1)}(x, y)$ и $C_{\text{filt}}^{(2)}(x, y)$ в оценке потока (2) существенно улучшает точность оценки. Значения потока, полученные в узлах грубой сетки, далее интерполировались на исходную подробную сетку с помощью кубической интерполяции (рис. 4).

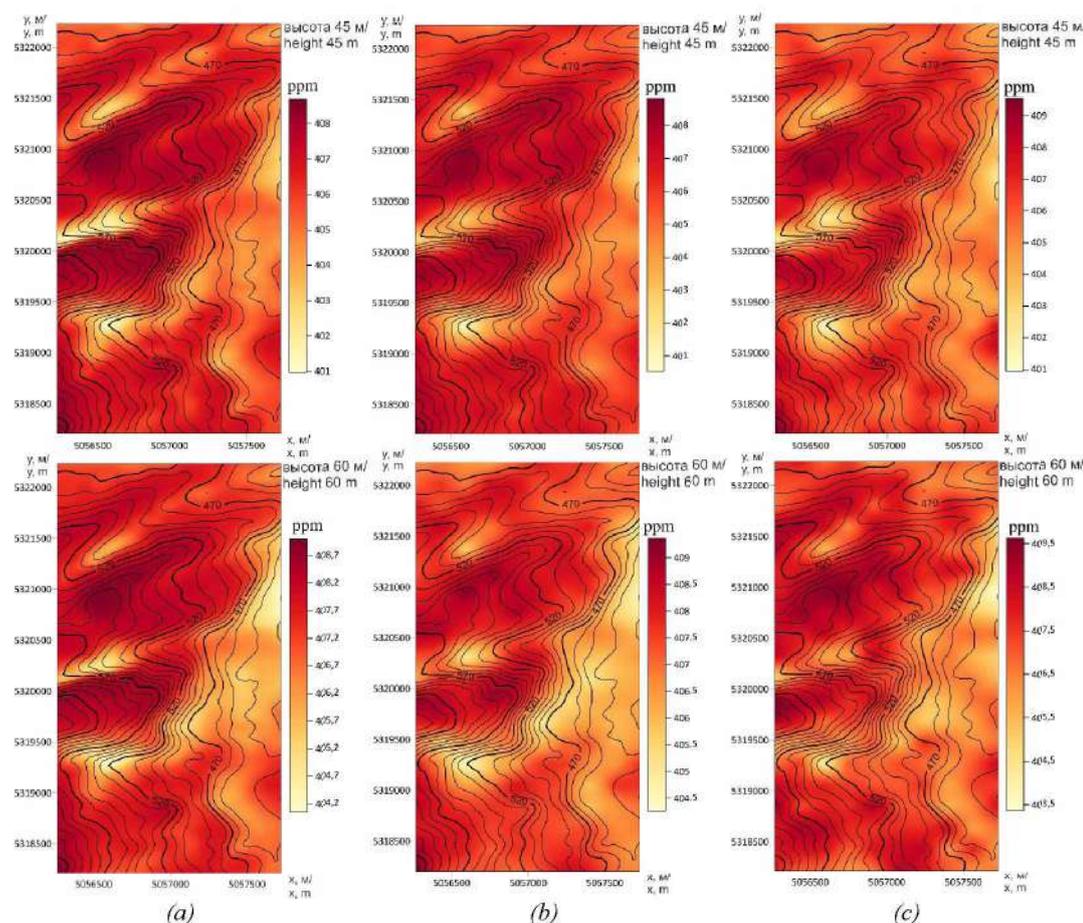


Рис. 2. “Теоретические” распределения концентрации CO_2 на двух уровнях над поверхностью (a), имитация экспериментальных данных с погрешностью $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$ (b) и $\delta C = 1 \text{ ppm}$ (c). Верхний ряд графиков соответствует высоте 45 м над поверхностью, нижний – высоте 60 м /
 Fig. 2. “Theoretical” CO_2 concentration distributions at two levels above the surface (a), simulated experimental data with the error $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$ (b) and $\delta C = 1 \text{ ppm}$ (c). The upper row of plots corresponds to 45 m above the surface, while the lower row corresponds to 60 m above the surface

Из рисунка 4 можно видеть, что даже первое приближение потока по формуле (2) отражает как пространственную структуру потока CO_2 в значительной части модельной области, так и порядок скорости поглощения. Значения эмиссии CO_2 на отдельных участках при этом остаются завышенными. Возможно, это объясняется достаточно грубым учетом вертикальной адвекции в выражении (2). При необходимости получить большую точность потока CO_2 найденное распределение может быть использовано как первое приближение в обратной задаче.

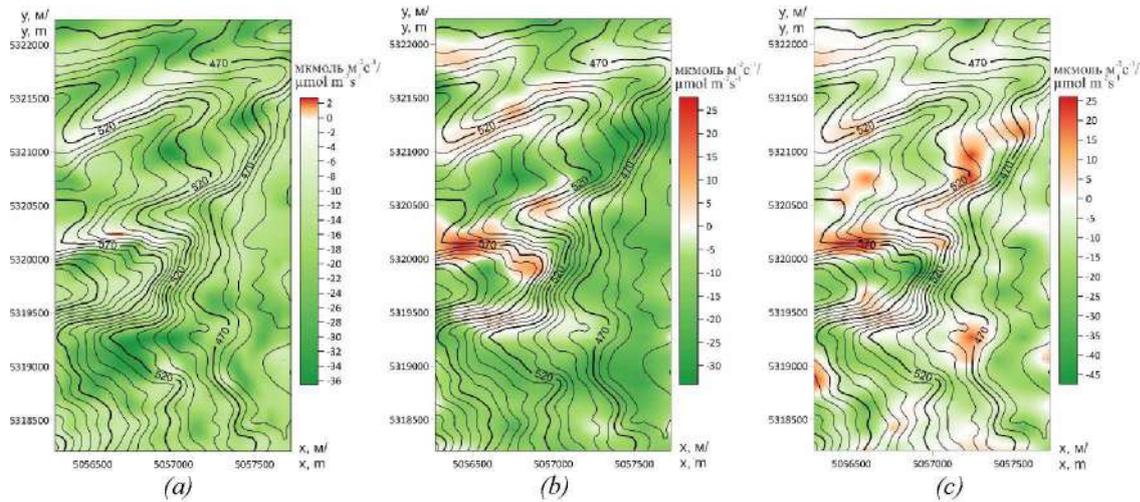


Рис. 3 Теоретический (a) и оцененный по формуле (2) вертикальный поток CO_2 на высоте 30 м над поверхностью: (b) $\delta C = 0.5$ ppm, (c) $\delta C = 1$ ppm /

Fig. 3 Theoretical (a) and estimated by formula (2) vertical CO_2 flux at 30 m above the surface: (b) $\delta C = 0.5$ ppm, (c) $\delta C = 1$ ppm.

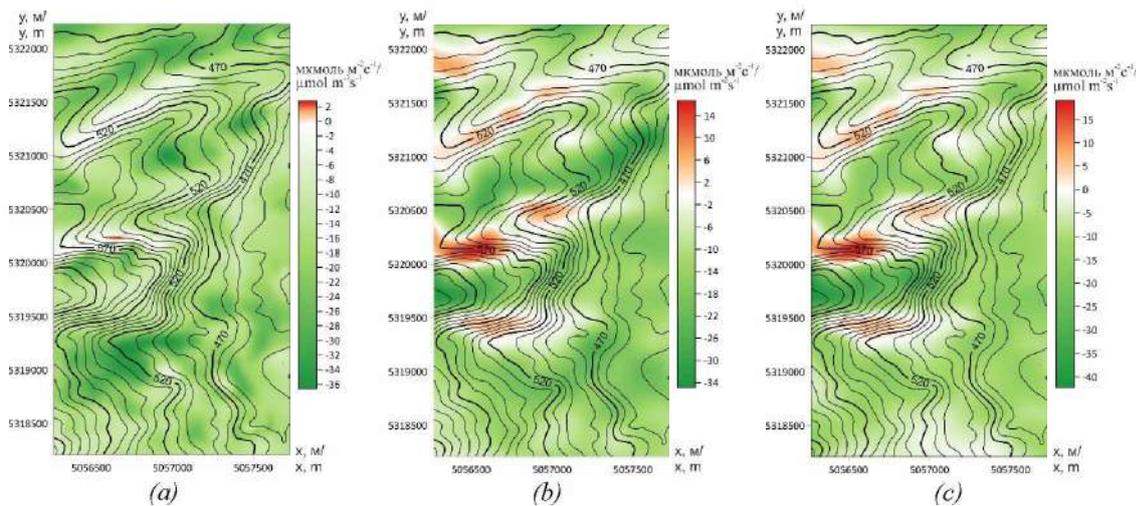


Рис. 4. Теоретический (a) и интерполированный на подробную сетку поток CO_2 , оцененный по формуле (2) с помощью фильтрованных данных: (b) $\delta C = 0.5$ ppm, (c) $\delta C = 1$ ppm /

Fig. 4. Theoretical (a) and grid-interpolated CO_2 flux estimated from filtered data (formula 2): (b) $\delta C = 0.5$ ppm, (c) $\delta C = 1$ ppm.

Следующим шагом исследования было решение задачи (3) при теоретическом значении потока $q_n(x, y)$ в качестве входных данных. Так как на основе задачи (3) будет построена обратная задача, необходимо провести предварительную оценку выражения (4) для различных высот h_1 и h_2 над поверхностью в тестовом случае. Результаты численных экспериментов в случае $\delta C = 1$ ppm приведены в таблице 1.

Приведенные в таблице 1 данные показывают, что выбирать уровень h_1 над поверхностью выше 45 м для рассматриваемой территории нецелесообразно, так как при этом норма разности модельных и измеренных значений концентрации CO_2 начинает расти. Выбирать его слишком низко над кронами деревьев также не следует,

так как в этой области сильна неоднородность концентрации CO_2 , обусловленная неоднородностью растительности. При выбранном уровне h_1 высота уровня h_2 в пределах приземного слоя не сильно влияет на норму разности модельных и экспериментальных данных. Для рассматриваемой модельной области и используемой при численном решении сетки наиболее удачным оказывается выбор высот $h_1=45$ м и $h_2=60$ м.

Таблица 1 / Table 1

Норма разности (4) модельных и “экспериментальных” значений концентрации CO_2 (ppm) / Norm of difference (4) between model and “experimental” CO_2 concentration values (ppm)

$h_1, \text{ м}$ \ $h_2, \text{ м}$	35	40	45	50	55	60
40	2.0257	-	-	-	-	-
45	1.9191	1.6718	-	-	-	-
50	1.9311	1.6972	1.6082	-	-	-
55	1.9227	1.7793	1.6112	1.6088	-	-
60	1.9129	1.6740	1.5936	1.6452	1.6316	-
65	1.9133	1.6959	1.5984	1.6458	1.6671	1.6738

Заключение

Предложен подход к оценке потоков парниковых газов над поверхностью со сложным рельефом и неоднородной растительностью, основанный на использовании измерений концентрации парниковых газов на двух уровнях над поверхностью и трехмерной гидродинамической модели. На основе данных полевых измерений на участке карбонового полигона Рошни-Чу с помощью гидродинамической модели проведены расчеты потоков CO_2 на высоте 30 м над поверхностью. Полученное пространственное распределение вертикального потока рассматривалось как “теоретическое” при исследовании предложенного метода. Показано, что даже грубая оценка потока воспроизводит порядки величин поглощения (хотя и переоценивает эмиссию) и структурные особенности неоднородности потока. Полученная приближенная оценка потока может выступать в качестве начального приближения при решении сформулированной обратной задачи по оценке потоков парниковых газов. Найдены оптимальные высоты для проведения измерений на исследуемой территории.

Литература

1. Елизарова Т.Г. Лекции: Математические модели и численные методы в динамике жидкости и газа. Подходы, основанные на системах квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений. – М.: Физический факультет МГУ. – 2005. – 224 с.
2. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В., Майсурадзе М.В. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом. // Геология и Геофизика Юга России. – 2023. – 13(2). – С. 133-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.

3. 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.
4. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской республики. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – 13(3). – С. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004.
5. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. – Springer: Dordrecht. The Netherlands. – 2012. – pp. 438.
6. Basu S., Guerlet S., Butz A., Houweling S., Hasekamp O., Aben I., Krummel P., Steele P., Langenfelds R., Torn M., et al. Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂. // Atmos. Chem. Phys. – 2013. – 13. – pp. 8695–8717. DOI:10.5194/acp-13-8695-2013.
7. Blanken P.D., Williams M.W., Burns S.P., Monson R.K., Knowles J., Chowanski K., Ackerman T. A comparison of water and carbon dioxide exchange at a windy alpine tundra and subalpine forest site near Niwot Ridge. // Colorado Biogeochemistry. – 2009. – 95. – p. 61–76.
8. Dong F., Qin C., Zhang X., Zhao X., Pan Y., Gao Y., Zhu J., Li Y. Towards Carbon Neutrality: The Impact of Renewable Energy Development on Carbon Emission Efficiency Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2021. – 18. 13284. DOI:10.3390/ijerph182413284.
9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D., Kolle O., Lagergren F., Lindroth A., Minerbi S., et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites. // Agric. For. Meteorol. – 2008. – 148. – p. 12–24.
10. Foken T. The energy balance closure problem: an overview. // Ecol. Appl. – 2008. – 18. – p. 1351–1367.
11. Kunz M., Lavric J.V., Gasche R., Gerbig C., Grant R.H., Koch F.T., Schumacher M., Wolf B. and Zeeman M. Surface flux estimates derived from UAS-based mole fraction measurements by means of a nocturnal boundary layer budget approach. // Atmos. Meas. Tech. – 2020. – 13. – p. 1671–1692. DOI:10.5194/amt-13-1671-2020.
12. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy. // Agric. For. Meteorol. – 2008. – 148. – p. 1777–1797.
13. Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of Clear-Cutting on Soil CO₂ Emission. // Biology Bulletin. – 2017. – 44 (2). – p. 218–223.
14. Mukhartov I., Kurbatova J., Tarasov D., Gibadullin R., Sogachev A., Olchev A. Modeling Tool for Estimating Carbon Dioxide Fluxes over a Non-Uniform Boreal Peatland. // Atmosphere. – 2023. – 14(4). – p. 625, DOI: 10.3390/atmos14040625.
15. Pirk N., Aalstad K., Westermann S., Vatne A., van Hove A., Tallaksen L.M., Cassiani M. and Katul G. Inferring surface energy fluxes using drone data assimilation in large eddy simulations. // Atmos. Meas. Tech. – 2022. – 15. – p. 7293–7314. DOI:10.5194/amt-15-7293-2022.
16. Pörtner H.O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegria A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., et al. (Eds.) IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, –2022. – p 3056. DOI:10.1017/9781009325844.
17. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T., Niinisto S., Lohila A., Larmola T., Morero M., Pihlatie M., et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. // Agric. For. Meteorol. – 2004. – 123. – p. 159–176.
18. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K., Lindauer M., Kubistin D. and Burrows J.P. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources. // Atmos. Meas. Tech. – 2021. – 14. – p. 153–172. DOI:10.5194/amt-14-153-2021.
19. Sharma S., Dhal S., Rout T., et al. Drones and machine learning for estimating forest

carbon storage. // *Carbon res.* – 2022. – 1. – pp. 21. DOI:10.1007/s44246-022-00021-5.

20. Sogachev A., Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag. // *Bound. Layer Meteorol.* – 2006. – 121. – pp. 229-266.

21. Sogachev A., Menzhulin G.V., Heimann M., Lloyd J. A simple three-dimensional canopy-planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. // *Tellus.* – 2002. – 54B. – pp. 784-819.

22. Yang D.X., Zhang H.F., Liu Y., Chen B.Z., Cai Z.N. and Lu D.R. Monitoring carbon dioxide from space: Retrieval algorithm and flux inversion based on GOSAT data and using Carbon Tracker-China // *Adv. Atmos. Sci.* – 2017. – 34. – p. 965–976. DOI: 10.1007/s00376-017-6221-4.

23. Yue X.L., Gao Q.X. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. // *Adv. Clim. Chang. Res.* – 2018. – 9. – p. 243–252. DOI:10.1016/j.accre.2018.12.003.

References

1. Elizarova T.G. Lectures: Mathematical models and numerical methods in fluid and gas dynamics. Approaches based on systems of quasi-gas-dynamic and quasi-hydrodynamic equations. –M.: Faculty of Physics, MSU. 2005. 224 p. (in Russ.)

2. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V., Maisuradze M.V. Determination of air pollution levels caused by road transport in urbanized areas. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 133–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011. (in Russ.)

3. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Groznenskiy Estestvennonauchniy Bulletin.* 2021. Vol. 6. No. 3. Issue 25. pp. 35–47. (in Russ.)

4. 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. 13(3). pp. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004. (in Russ.)

5. Aubinet M., Vesala T., Papale D. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis.* Springer: Dordrecht, The Netherlands. 2012. p. 438.

6. Basu S., Guerlet S., Butz A., Houweling S., Hasekamp O., Aben I., Krummel P., Steele P., Langenfelds R., Torn M., et al. Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. 13. pp. 8695–8717. DOI:10.5194/acp-13-8695-2013.

7. Blanken P.D., Williams M.W., Burns S.P., Monson R.K., Knowles J., Chowanski K., Ackerman T. A comparison of water and carbon dioxide exchange at a windy alpine tundra and subalpine forest site near Niwot Ridge. *Colorado Biogeochemistry.* 2009. 95. pp. 61–76.

8. Dong F., Qin C., Zhang X., Zhao X., Pan Y., Gao Y., Zhu J., Li Y. Towards Carbon Neutrality: The Impact of Renewable Energy Development on Carbon Emission Efficiency *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2021. . Vol. 18. No. 24. 13284. DOI:10.3390/ijerph182413284.

9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D., Kolle O., Lagergren F., Lindroth A., Minerbi S., et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites. *Agric. For. Meteorol.* 2008. 148. pp. 12–24.

10. Foken T. The energy balance closure problem: an overview. *Ecol. Appl.* 2008. Vol. 18. Issue 6. pp. 1351–1367.

11. Kunz M., Lavric J.V., Gasche R., Gerbig C., Grant R.H., Koch F.T., Schumacher M., Wolf B., Zeeman M. Surface flux estimates derived from UAS-based mole fraction measurements by means of a nocturnal boundary layer budget approach. *Atmos. Meas. Tech.* 2020. Vol. 13, Issue 4. pp. 1671–1692. DOI:10.5194/amt-13-1671-2020.

12. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy. *Agric. For. Meteorol.* 2008. Vol. 148. Issue 11. pp. 1777–1797.

13. Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of Clear-Cutting on Soil CO₂ Emission. *Biology Bulletin.* 2017. 44 (2). pp. 218–223.

14. Mukhartova I., Kurbatova J., Tarasov D., Gibadullin R., Sogachev A., Olchev A. Modeling Tool for Estimating Carbon Dioxide Fluxes over a Non-Uniform Boreal Peatland. *Atmosphere*. 2023. 14(4). pp. 625. DOI: 10.3390/atmos14040625.
15. Pirk N., Aalstad K., Westermann S., Vatne A., van Hove A., Tallaksen L.M., Cassiani M. and Katul G. Inferring surface energy fluxes using drone data assimilation in large eddy simulations. *Atmos. Meas. Tech.* 2022. Vol. 15. Issue 24. pp. 7293–7314. DOI:10.5194/amt-15-7293-2022.
16. Pörtner H.O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegria A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., et al. (Eds.) IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2022. pp. 3056. DOI:10.1017/9781009325844.
17. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkinen K., Vesala T., Niinisto S., Lohila A., Larmola T., Morero M., Pihlatie M., et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agric. For. Meteorol.* 2004. Vol. 123. pp. 159–176.
18. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K., Lindauer M., Kubistin D. and Burrows J.P. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources. *Atmos. Meas. Tech.* 2021. Vol. 14. pp. 153–172. DOI:10.5194/amt-14-153-2021.
19. Sharma S., Dhal S., Rout T., et al. Drones and machine learning for estimating forest carbon storage. *Carbon res.* 2022. Vol. 1. pp. 21. DOI:10.1007/s44246-022-00021-5.
20. Sogachev A., Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag. *Bound. Layer Meteorol.* 2006. Vol. 2. Issue 121. pp. 229–266.
21. Sogachev A., Menzhulin G.V., Heimann M., Lloyd J. A simple three-dimensional canopy-planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. *Tellus*. 2002. 54B. pp. 784-819.
22. Yang D.X., Zhang H.F., Liu Y., Chen B.Z., Cai Z.N. and Lu D.R. Monitoring carbon dioxide from space: Retrieval algorithm and flux inversion based on GOSAT data and using Carbon Tracker-China. *Adv. Atmos. Sci.* 2017. Vol. 34. pp. 965–976. DOI: 10.1007/s00376-017-6221-4.
23. Yue X.L., Gao Q.X. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Adv. Clim. Chang. Res.* 2018. Vol. 9. Issue 4. pp. 243–252. DOI:10.1016/j.accre.2018.12.003.

УДК 504.54:551.438.5

DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013

Оригинальная статья

Геологические и геоморфометрические факторы формирования ареалов земледельческих террас среднегорной Чечни

Л.А. Петров 

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,
e-mail: leonid_petrov_1997@mail.ru

Статья поступила: 14.09.2023, доработана: 30.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Резюме: Актуальность работы. Ареалы террасирования среднегорной Чечни, относящиеся к одному из древних мировых центров террасного земледелия, сформированы на базе разнообразной геолого-геоморфологической основы, что обусловлено сложным геологическим строением территории и сильно расчлененным характером рельефа горного ландшафта, функционирующего в условиях альпийского орогенеза. **Целью исследования** является выявление геоморфометрических характеристик рельефа ареалов террасирования и слагающих их типов дочетвертичных образований для последующего выделения наиболее предпочтительных местоположений формирования древней практики террасного земледелия. В качестве объекта исследования рассмотрен культурно-исторический ландшафт в границах охранной зоны Аргунского музея-заповедника. **Методы исследования.** Основными методами послужили визуальное дешифрирование космических снимков электронных сервисов Google Earth и Bing с целью выявления ареалов террасирования и кластерный анализ геоморфометрических переменных поверхности выделенных ареалов, полученных на основе цифровой модели рельефа FABDEM с пространственным разрешением 30 м. Были использованы также результаты оцифровки карты типов дочетвертичных образований Государственной геологической карты масштаба 1:200 000 (ГГК-200/1), которые использовались для определения роли литологического фактора в формировании ареалов земледельческих террас. **Результаты исследования** показали, что условия формирования ареалов земледельческих террас среднегорного пояса Чечни в первую очередь зависят от характера коренных пород, формирующих рельеф территории, что, в свою очередь, также определяет геоморфометрические характеристики поверхности ареалов террасирования: для районов, сложенных карбонатными породами палеогенового и мелового периодов, типичны крупные и протяженные склоны широкополосных террас, в то время как на более неустойчивых склонах, образованных формациями юрских песчаников и глинистых сланцев, распространены ареалы мелкоконтурных террас с высоким (ок. 80 м) вертикальным простиранием между уровнями самой нижней и самой верхней террасы и с наиболее дефицитными в регионе условиями увлажнения. Указанные различия были обозначены в выделенных на основе кластерного анализа пяти групп ареалов террасирования в соответствии с их геоморфометрическими характеристиками.

Ключевые слова: ареалы террасирования, кластерный анализ, Северо-Восточный Кавказ, геоморфометрические переменные, горный рельеф.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания кафедры физической географии мира и геоэкологии Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: № 1.9 121040100322-8 «Анализ региональных геоэкологических проблем в условиях глобальных изменений окружающей среды».

Для цитирования: Петров Л.А. Геологические и геоморфометрические факторы формирования ареалов земледельческих террас среднегорной Чечни. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 162-176. DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013

DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013

Original paper

Geological and geomorphometric factors in the formation of agricultural terraced areas in mid-mountain Chechnya

L.A. Petrov 

Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation, e-mail: leonid_petrov_1997@mail.ru

Received: 14.09.2023, revised: 30.11.2023, accepted: 04.12.2023

Abstract: Relevance. The terraced areas of mid-mountain Chechnya belong to one of the ancient world centers of terrace farming. They are formed on the diverse geological and geomorphological basis. This is caused by the complex geological structure of the territory and the highly dissected nature of the mountain relief under alpine orogenesis. **The research aim** is to identify the most preferable sites for the formation of the ancient practice of terrace farming based on an analysis of the geomorphometric characteristics of the relief of terraced areas and the types of pre-Quaternary formations composing them. **Methods.** The main methods were visual interpretation of satellite images from the Google Earth and Bing electronic services in order to identify terracing areas and cluster analysis of geomorphometric variables of the surface of the identified areas, obtained on the basis of the FABDEM digital elevation model with a spatial resolution of 30 m. The results of the pre-Quaternary formations State Geological map digitization at a scale of 1: 200,000 (GGK-200/1) were also used to determine the role of the lithological factor in the shaping of agricultural terraced areas. **The results** revealed that the conditions for the formation of agricultural terraced areas in the mid-mountain belt of Chechnya primarily depend on the nature of the bedrock that forms the relief of the territory. That, in turn, also determines the geomorphometric characteristics of the terraced areas surface: for areas composed from the Paleogene and Cretaceous carbonate rocks, large and extended slopes of broadband terraces are typical. At the same time on more unstable slopes formed by formations of Jurassic sandstones and shales, areas of shallow-contour terraces with a high (ca. 80 m) vertical strike between the levels of the lowest and highest terraces and with the most deficient moisture conditions in the region are prevalent. These differences were identified in five groups of terraced areas identified on the basis of cluster analysis in accordance with their geomorphometric characteristics.

Keywords: terraced areas, cluster analysis, North-Eastern Caucasus, geomorphometric variables, mountainous terrain.

Acknowledgement: *The study was carried out within the framework of the state task of the Department of World Physical Geography and Geoecology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University: No. 1.9121040100322-8 "Analysis of regional geoecological problems under global environmental change".*

For citation: Petrov L.A. Geological and geomorphometric factors in the formation of agricultural terraced areas in mid-mountain Chechnya. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South. (in Russ.)*. 2023. 13(4): 162-176. DOI: 10.46698/VNC.2023.72.33.013

Введение

Среднегорная Чечня располагается в южной, наиболее возвышенной части Чеченской Республики, в области альпийского тектоногенеза, и вместе с нивально-гляциальным поясом, относящимся согласно принятой в физической географии структурно-генетической классификации ландшафтов к высокогорному подклассу [Гуня и др., 2022; Николаев, 1978], занимает четверть площади региона. Данная территория активно осваивалась с середины XIII века, и именно с этого времени начинается

зарождение масштабной практики террасирования склонов и формирования напашных террас для обеспечения жизнедеятельности местных сообществ. К сожалению, феномен террасного земледелия в Горной Чечне практически не рассматривается в современных научных исследованиях, в то время как в соседнем Дагестане это явление активно изучается [Османов, 2008; Борисов и др., 2021; Petherbridge et al., 2021]. Для оценки вклада геолого-геоморфологических факторов в формирование ареалов горных напашных террас необходимы сведения о морфометрических свойствах поверхности склонов и характере дочетвертичных образований.

В начале исследования необходимо определиться с геоморфометрическими переменными, которые вкуче с характером коренных пород будут отражать геолого-геоморфологическую дифференциацию ареалов террасирования. Для наиболее изученного в отношении земледельческих террас региона мира – Средиземноморья, существует типология террас в соответствии с их формой, конфигурацией и положением в рельефе [Grove, Rackham, 2001]. Согласно ей выделяются пять основных типов исторических террас Средиземноморья: ступенчатые террасы, параллельные контуру склона холма; плетеные террасы, которые зигзагом поднимаются вверх по склону, соединяясь серпантинами; карманные террасы со стенками в форме полумесяца, защищающими почву для отдельных деревьев; квадратные террасные поля; запорные дамбы, построенные на водотоках. Однако исходя из этой типологии стоит вопрос – какие параметры рельефа необходимо рассматривать для выделения обособленных групп ареалов террасирования?

Классификация террас Адриатической Хорватии [Andlar et al., 2017] базируется на характере дочетвертичных образований и на выделении форм мезорельефа террасированных склонов в соответствии с их крутизной, шириной и длиной искусственно выровненных площадок, направлением межевых откосов. При непосредственно морфометрическом анализе наиболее распространенными параметрами являются средние значения крутизны и экспозиции [Latocha, 2009]. В исследовании пространственной структуры древнего сельского поселения внутренних районов Помпеи [Vogel et al., 2016] использовались переменные высоты, уклона, экспозиции, кривизны, вертикального расстояния до сети водотоков, *LS*-фактор, топографический индекс влажности (*TWI*), классификация рельефа на основе индекса топографического положения (*TPI*).

В отечественной науке подобные исследования в основном приурочены к региону Северо-Восточного Кавказа, который является одним из древнейших районов террасного земледелия [Гаджиев, 1991; Spencer, Hale, 1961]. В работе по земледельческим террасам Дагестана [Идрисов, Борисов, 2022] акцент обращен на диапазон абсолютных высот и на амплитуду распространения ареалов террас. В статье [Колбовский и др., 2019] для выделения типов террас Итум-Калинской котловины были использованы значения длины, периметра и площади поверхности каждой террасы, плановой и профильной кривизны склонов, а также топографическое положение террасы на склоне в соответствии с индексом гребне-килевой специализации *TPI* и относительная высота над местным базисом эрозии. Также можно выделить труды по выделению ландшафтных урочищ парков Южного берега Крыма [Головнев, 2019; Головнев и др., 2021], располагающихся на искусственно террасированных склонах, в которых также дополнительно были рассмотрены их профильная кривизна и топографический индекс влажности.

Помимо ландшафтов горных областей, подвергаются геоморфометрическому изучению террасы равнинных областей. К примеру, для идентификации напаш-

ных террас Парижского бассейна были использованы минимальные, средние, максимальные значения и стандартные отклонения переменных крутизны, плановой, профильной и общей кривизны [Chartin et al., 2011]. В исследовании широкополосных равнинных сельскохозяйственных террас на территории штата Оклахома наиболее эффективными морфометрическими переменными оказались отрицательная открытость местности, общая и профильная кривизна поверхности и топографический индекс влажности [Winzeler et al., 2023].

Совокупность геологического фактора, представленного в данной работе характером дочетвертичных образований, и геоморфометрического, выраженного в различных вариациях топографической поверхности [Da Silva et al., 2019], формирует георазнообразие рассматриваемой территории [Thomas, 2012]. **Цель** текущего исследования заключается в выявлении комбинаций этих факторов, обуславливающих наиболее пригодные участки сельскохозяйственного освоения среднегорной Чечни, которые обозначают пространство жизнедеятельности местных сообществ.

Материалы и методы исследования

В основу работы положена методика выделения разнородных типов поверхности рельефа ареалов террасирования охранной зоны Аргунского музея-заповедника в зависимости от геоморфометрических переменных для изучения роли геолого-геоморфологического фактора в формировании «вмещающего ландшафта» чеченцев на протяжении нескольких столетий. Ареалы террасирования были определены на основе локализации их пространственных атрибутов путем визуального дешифрирования снимков сервиса Google Планета Земля и верификации в процессе полевых экспедиционных исследований. По снимкам Bing 19-го уровня масштабирования (1:1000) в программной среде ArcMap отрисовывались контура ареалов (рис. 1).

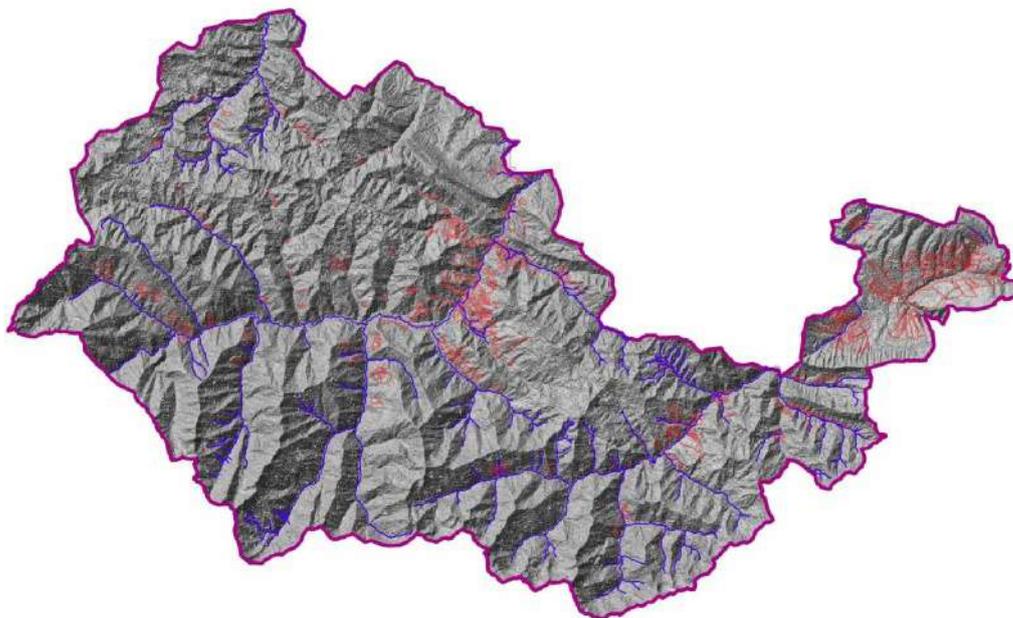


Рис. 1. Светотеневая отмывка рельефа территории охранной зоны Аргунского музея-заповедника (светлыми тонами показаны склоны северных румбов, темными – южных) с ареалами бывшего террасного земледелия (красные контура) и гидрографической сетью /

Fig. 1. Shaded relief of the Argun Museum-Reserve buffer zone (light colors show the slopes of the northern exposures, dark – the southern ones) with areas of historical terraced agriculture (red contours) and a hydrographic network

В программном обеспечении SAGA GIS был произведен кластерный анализ морфометрических параметров рельефа на основе цифровой модели рельефа FABDEM с пространственным разрешением 30 м. С учётом проведённого литературного обзора по проблематике геоморфометрического изучения террасированных склонов и анализа главных компонент, который позволяет выявить параметры с высокой корреляцией, для кластеризации ареалов террасирования были отобраны следующие показатели: крутизна склонов; экспозиция; площадь; максимальная абсолютная высота; стандартное отклонение общей кривизны (*GenCurv std*); плановая кривизна; профильная кривизна; минимальное расстояние по вертикали до локального уреза воды (*VDCN min*) [Stubert et al., 2020]; максимальное относительное положение на склоне (*RSP*) [Hui Deng et al., 2022]; вертикальное простирание ареала; топографический индекс влажности (*TWI*); стандартное отклонение *TWI* (*TWI std*).

Стандартное отклонение общей кривизны *GenCurv std* – величина, которая по физическому смыслу аналогична профильной кривизне [Blaga, 2012] и характеризует степень расчлененности рельефа внутри ареала террасирования [Brožová et al., 2021]. Стандартное отклонение топографического индекса влажности *TWI std* демонстрирует контрастность условий увлажнения в пределах единого ареала террасирования, что в свою очередь может проявляться в разнообразии видового состава фитоценозов [Carra et al., 2022].

Для выявления роли геологического фактора была составлена картосхема дочетвертичных образований на основе листов Государственной геологической карты масштаба 1 : 200 000 (ГГК-200/1) (рис. 2). Следует отметить, что при составлении листов данного атласа были использованы разные подходы к выделению однородных ареалов дочетвертичных отложений: в основном определяются геологические яруса, однако на листах XI и XVII были выделены свиты отложений, которые охватывают более широкие временные интервалы из нескольких ярусов, что усложнило легенду к карте дочетвертичных образований (табл. 1). Устойчивость ареалов, рельеф которых сложен определенным типом дочетвертичных образований, определяется на основе базы данных экзогенных геодинамических процессов на территории горной части Чеченской Республики [Мамаев и др., 2018; Gunya, Gakaev, 2022].

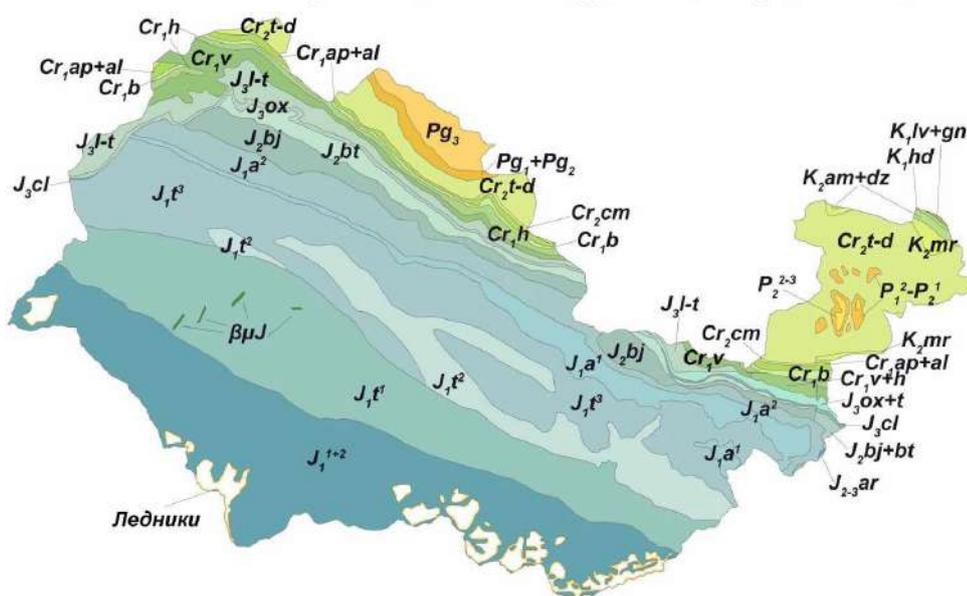


Рис. 2. Дочетвертичные образования среднегорной Чечни (легенда в табл. 1) /
Fig. 2. Pre-Quaternary formations of mid-mountain Chechnya (see the legend in Table 1)

Таблица 1 / Table 1

Условные обозначения к карте дочетвертичных образований среднегорной Чечни /
 Symbols for the map of pre-Quaternary formations of mid-mountain Chechnya

Индекс / Index	Геологическое время / Geologic time	Образования / Formations
Pg_3	Олигоцен / Oligocene	Мергели и глины / Marls and clays
P_2^{2-3}	Средний-верхний эоцен / Middle-Upper Eocene	
$P_1^2-P_2^1$	Средний палеоцен-нижний эоцен / Middle Paleocene-Lower Eocene	
Pg_1+Pg_2	Палеоцен-нижний эоцен / Paleocene-Lower Eocene	
Cr_2t-d	Туронский-датский ярусы / Turonian-Danish stages	Известняки и мергели / Limestones and marls
K_2mr	Сантонский-кампанский ярусы / Santonian-Campanian stages	
K_2am+dz	Аймакинская и дженгутайская свиты. Сенomanский, туронский, коньякский, сантонский ярусы / Aimakin and Dzhengutai suites. Cenomanian, Turonian, Coniacian, Santonian stages	
Cr_2cm	Сеноманский ярус / Cenomanian stage	
K_1hd	Хаджалмахинская свита. Альбский ярус / Khadzhalmakha suite. Albian stage	Глинистые песчаники / Clay sandstones
Cr_1ap+al	Аптский и альбский ярусы / Aptian and Albian stages	
K_1lv+gn	Левашинская и гундаринская свиты. Барремский и аптский ярусы / Levashinsky and Gundarinskaya suites. Barremian and Aptian stages	
Cr_1b	Барремский ярус / Barremian stage	
Cr_1h	Готеривский ярус / Hauterivian stage	Известковистые песчаники / Calcareous sandstones
Cr_1v+h	Валанжинский и Готеривский ярус / Valanginian and Gotherivian stages	
Cr_1v	Валанжинский ярус / Valanginian stage	
J_3l-t	Лузитанский, киммериджский и титонский ярусы / Lusitanian, Kimmeridgian and Tithonian stages	Известняки и доломиты / Limestones and dolomites
J_3ox+t	Оксфордский-титонский ярусы / Oxford-Tithonian stages	
J_3ox	Оксфордский ярус / Oxford stage	
J_{2-3ar}	Армхинская свита: келловейский, оксфордский и киммериджский ярусы / Armkha suite: Callovian, Oxfordian and Kimmeridgian stages	
J_3cl	Келловейский ярус / Callovian stage	Песчаники / Sandstones

J_2bj+bt	Байосский и батский ярусы / Bayosian and Bathonian stages	Глинистые сланцы и песчаники / Shales and sandstones
J_2bt	Батский ярус / Bathonian stage	
J_2bj	Байосский ярус / Bayosian stage	
J_1a^2	Верхний подъярус ааленского яруса / Upper substage of the Aalenian stage	
J_1a^1	Нижний подъярус ааленского яруса / Lower substage of the Aalenian stage	
J_1t^3	Верхний подъярус тоарского яруса / Upper substage of the Toarcian stage	
J_1t^2	Средний подъярус тоарского яруса / Middle substage of the Toarcian stage	
J_1t^1	Нижний подъярус тоарского яруса / Lower substage of the Toarcian stage	
J_1^{1+2}	Нижний и средний лейас / Lower and middle layas	
$\beta\mu J$	Дайки диабазов и порфиринов / Diabase and porphyrite dikes	

Результаты работы и их обсуждение

Территория среднегорной Чечни характеризуется преобладанием ниже- и среднеюрских глинистых сланцев (75%, или 1760 кв. км) в строении рельефа рассматриваемого региона, исключение составляет Макажойская котловина в северо-восточной части, рельеф которой сложен верхнемеловыми известняками и мергелями. Точной инвентаризации общей площади террас в среднегорной Чечне не существует, но, по приблизительным оценкам на основе визуального дешифрирования, она составляет около 10287,7 гектаров, или 4,4% от всей площади охранной зоны Аргунского музея-заповедника. При этом следует отметить, что в абсолютном выражении террасированные участки на глинистых сланцах и на верхнемеловых карбонатных породах сопоставимы (4749 га и 4454 га соответственно; рис. 3).

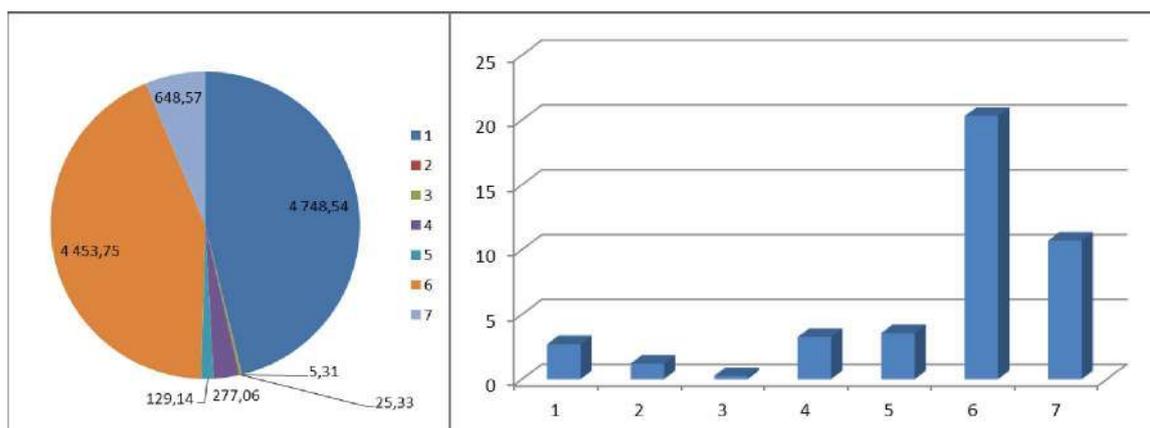


Рис. 3 (слева). Площадь, занятая ареалами террасирования для каждого типа дочетвертичных образований, выраженная в гектарах.

Рис. 4 (справа). Индекс террасированности для каждого типа дочетвертичных образований, выраженный в гектарах террасированных участков на кв. км площади.

Типы дочетвертичных образований: 1 – ниже- и среднеюрские глинистые сланцы и песчаники; 2 – верхнеюрские песчаники келловейского яруса; 3 – верхнеюрские известняки и доломиты; 4 – нижнемеловые известковистые песчаники; 5 – нижнемеловые глинистые песчаники; 6 – верхнемеловые известняки и мергели; 7 – палеогеновые мергели и глины /

Fig. 3 (left). Square occupied by terracing areas for each type of pre-Quaternary formations, expressed in hectares.

Fig. 4 (right). The terracedness index for each type of pre-Quaternary formation, expressed in hectares of terraced areas per sq. km.

Types of pre-Quaternary formations: 1 – Lower and Middle Jurassic shales and sandstones; 2 – Upper Jurassic sandstones of the Callovian stage; 3 – Upper Jurassic limestones and dolomites; 4 – Lower Cretaceous calcareous sandstones; 5 – argillaceous sandstones of the Lower Cretaceous; 6 – Upper Cretaceous limestones and marls; 7 – Paleogene marls and clays.

Для изучения вклада литологического фактора в подверженность формирования ареалов сельскохозяйственных террас в данной работе был введен показатель индекса террасированности TI , который представляет собой отношение суммарной площади ареалов террасирования, расположенных на определенном типе дочетвертичных образований S_{TAi} (в га), к площади ареала данного типа S_i (в кв. км).

$$TI = \frac{\sum S_{TAi}}{\sum S_i}, \quad (1)$$

Согласно данному параметру, участки на известняках и мергелях верхнего мела являются наиболее привлекательными для формирования практики террасирования склонов ($TI = 20$) ввиду их максимальной устойчивости к экзогенным процессам в сравнении с участками на глинистых сланцах и песчаниках, степень террасированности которых в 10 раз ниже ($TI = 2$). Также оптимальными для формирования ареалов террасирования являются территории, рельеф которых сложен мергелями и глинами палеогена ($TI = 10$).

Данные по интенсивности экзогенных геодинамических процессов подтверждают вышеприведенную закономерность (рис. 5,6): наиболее нестабильными являются районы, внутреннее строение которых сложено песчаниками (типы №2 и 5), в то время как районы распространения карбонатных пород (3, 6 и частично 7 типы) демонстрируют практически трехкратное сокращение частоты проявлений в рельефе опасных геоморфологических процессов.

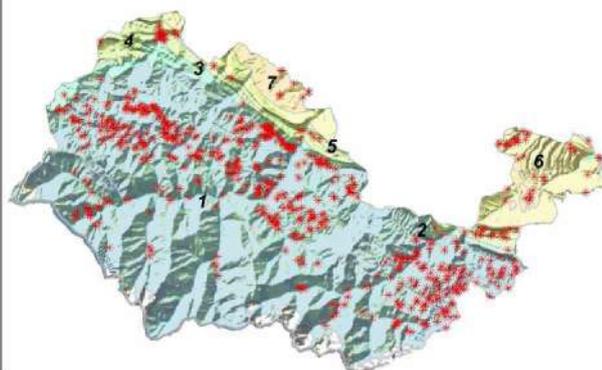
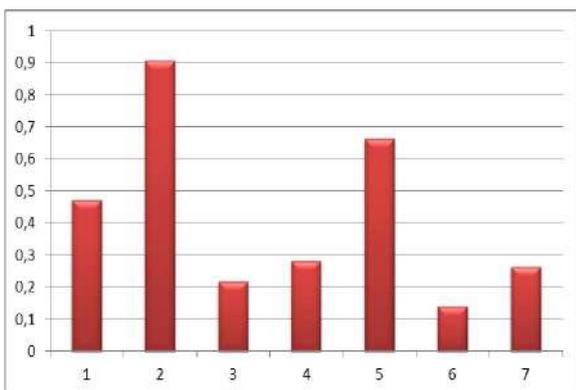


Рис. 5 (слева). Распространенность неблагоприятных процессов экзогенной геодинамики для каждого типа дочетвертичных образований (ед. на кв. км).

Рис. 6 (справа). Локализованные очаги неблагоприятных процессов экзогенной геодинамики на территории охранной зоны Аргунского музея-заповедника.

Типы дочетвертичных образований: см. рис. 4.

Fig. 5 (left). The prevalence of unfavorable processes of exogenous geodynamics for each type of pre-Quaternary formations (units per sq. km).

Fig. 6 (right). Localized foci of unfavorable processes of exogenous geodynamics on the territory of the buffer zone of the Argun Museum-Reserve. Types of pre-Quaternary formations: see fig. 4.

Кластерный анализ ареалов террасирования позволяет разбить исследуемые объекты на 5 классов (рис. 7) в зависимости от совокупности входных геоморфометрических параметров, описанных в разделе методики.

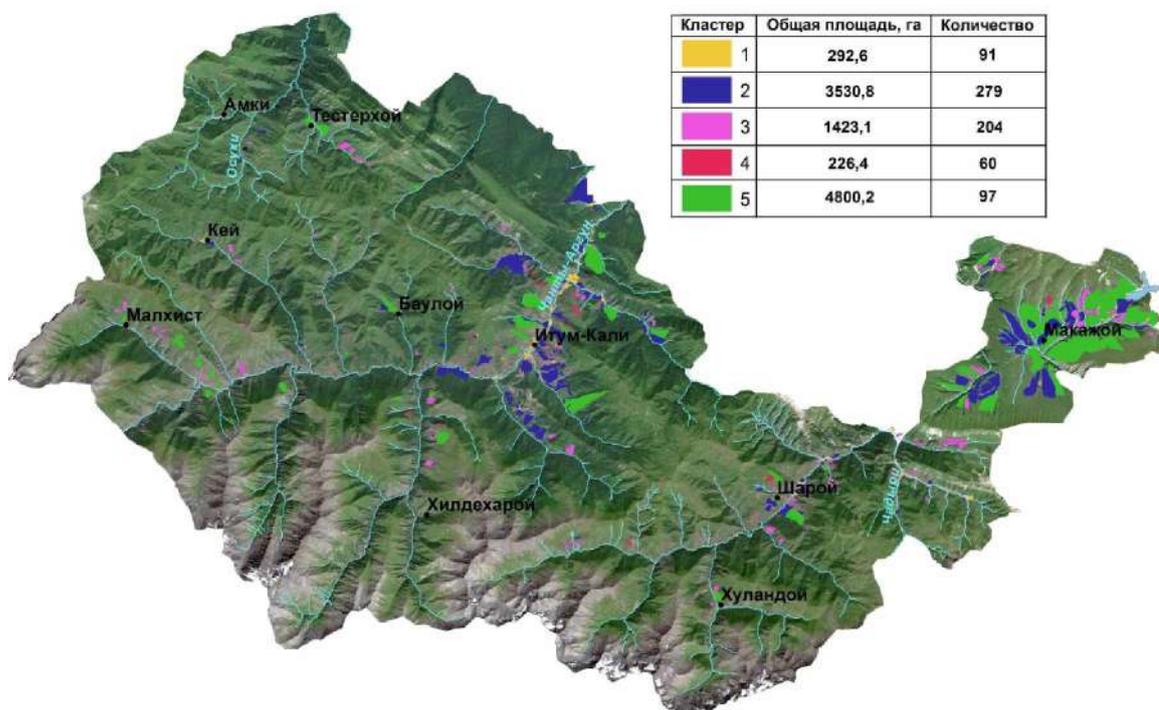


Рис. 7. Кластеры ареалов террасирования среднегорной Чечни в границах охранной зоны Аргунского музея-заповедника.

Fig. 7. Clusters of terraced areas of mid-mountain Chechnya within the boundaries of the buffer zone of the Argun Museum-Reserve.

1. Малые (до 5 га) и средние (5-10 га в Аргунском ущелье), с незначительным вертикальным простираем (до 25 м), расположенные в горных долинах на выпуклых концентрирующих сильно покатых (8-12°) поверхностях различной экспозиции, начинающиеся практически от уреза воды ($VDCN_{min}$ менее 5 м), приуроченные к долине Кенхи, Аргунскому ущелью и его ответвлениям, наименее расчлененные ($GenCurv_{std} = 0,05$), наиболее влагообеспеченные ($TWI=9$) в регионе, но с наибольшей контрастностью увлажнения внутри ареала ($TWI_{std}=3,8$), преимущественно на нижне- и среднеюрских глинистых сланцах и песчаниках (80% ареалов), а также на верхнемеловых известняках и мергелях (7%) и на нижнемеловых известковистых песчаниках (5%). Ареалы террасирования данного кластера приурочены к долине Чанты-Аргуна, также сильно распространены в бассейне реки Чадыри.

2. Крупные по площади (более 10 га) вытянутые по вертикали в среднем на 50 м, расположенные на нижних частях умеренно крутых (12-16°) вогнутых рассеивающих склонов преимущественно южных экспозиционных румбов и северных в бассейне Чанты-Аргуна, начинающиеся практически от уреза воды ($VDCN_{min}$ менее 5 м), приуроченные к горным долинам крупных рек, слабо расчлененные ($GenCurv_{std} = 0,06$), умеренно влагообеспеченные ($TWI=7$), с высокой контрастностью увлажнения внутри ареала ($TWI_{std}=3,5$), преимущественно на нижне- и среднеюр-

ских глинистых сланцах и песчаниках (70% ареалов), а также на верхнемеловых известняках и мергелях (10%) и на палеогеновых мергелях и глинах (7%). Наиболее типичны подобные ареалы в бассейне Чанты-Аргуна, также они характерны для западной части Макажойской котловины и частично встречаются в Шаройской котловине и в бассейне реки Осухи.

3. Средние по площади (5-10 га) вытянутые по вертикали в среднем на 80 м, расположенные на средних частях очень крутых (20-30°) вогнутых концентрирующих склонов преимущественно южных и западных экспозиционных румбов, начинающиеся на высоте 10 м от уреза воды, среднегорные, сильно расчлененные ($GenCurv\ std = 0,10$), наименее влагообеспеченные в регионе ($TWI=6$), с умеренной контрастностью увлажнения внутри ареала ($TWI\ std=2,8$), преимущественно на нижне- и среднеюрских глинистых сланцах и песчаниках (80% ареалов), а также на верхнемеловых известняках и мергелях (10%) и на нижнемеловых глинистых песчаниках (5%). Ареалы террасирования данного кластера встречаются повсеместно в границах охранной зоны Аргунского музея-заповедника.

4. Малые по площади (до 5 га) вытянутые по вертикали в среднем на 80 м, расположенные на верхних частях крутых (16-20°) вогнутых рассеивающих склонов различной экспозиции, начинающиеся на высоте около 150 метров над урезом воды, среднегорные (до 1600 м средняя по кластеру максимальная абсолютная высота распространения) умеренно расчлененные ($GenCurv\ std = 0,08$), наименее влагообеспеченные в регионе ($TWI=6$) и с наименьшей контрастностью увлажнения внутри ареала ($TWI\ std=2,5$), преимущественно на нижне- и среднеюрских глинистых сланцах и песчаниках (90% ареалов). Подобные ареалы террасированных склонов характерны для морфоструктур горных котловин: наиболее распространены в Итум-Калинской котловине, также встречаются в Шаройской. В сложенной верхнемеловыми карбонатными породами Макажойской котловине данный кластер представлен единичным ареалом.

5. Очень крупные террасированные ареалы (ок. 50 га), начинающиеся на высоте 10 м от уреза воды и простирающиеся по вертикали на 180 м, достигая верхних частей вогнутых рассеивающих крутых (16-20°) склонов различной экспозиции, средневысокогорные (максимальное распространение до 2000 м над уровнем моря), сильно расчлененные ($GenCurv\ std = 0,10$), умеренно влагообеспеченные ($TWI=7$), с повышенной контрастностью увлажнения внутри ареала ($TWI\ std=3,2$), на нижне- и среднеюрских глинистых сланцах и песчаниках (55% ареалов) и на верхнемеловых известняках и мергелях (40%). Наиболее характерен данный тип террасированных ареалов для Макажойской котловины; также он широко представлен в бассейне Чанты-Аргуна и в Мелхистинском ущелье. Отдельные ареалы встречаются в Хилдехароевском ущелье, в Шаройской и в Тестерхойской котловинах.

Наиболее распространенными в количественном выражении являются ареалы террасирования второго и третьего кластеров, притом террасированные ареалы последнего формировались на сильно расчлененных и наименее влагообеспеченных частях очень крутых концентрирующих склонов в условиях дефицита других, более благоприятных по характеру рельефа, участков. В площадном выражении выделяются ареалы пятого кластера, характеризующиеся крупными фрагментами террасированных склонов, зачастую сложенных карбонатными породами верхнего мела.

Террасы первого кластера имеют выгодное местоположение ввиду наименьшей крутизны рельефа среди всех представленных типов и максимальной влагообеспеченности ввиду близости водотоков. Они также отличаются выпуклым профилем в сравнении с прочими кластерами. Их распространение лимитировано дефицитом подходящих участков в пределах среднегорной Чечни.

Террасы четвертого кластера, представленные хуже всех остальных, являются пример вынужденного расширения пахотных угодий на верхних частях склонов интенсивно освоенных горных котловин Северо-Юрской депрессии, сложенных рыхлыми породами средней юры и характеризующихся дефицитными условиями увлажнения.

Выводы

Одной из важнейших особенностей формирования ареалов сельскохозяйственных террас является рельеф территории и характер слагающих его горных пород. Различия в распределении ареалов террасирования были проанализированы в рамках охранной зоны Аргунского музея-заповедника. В качестве исходных данных для выделения сельскохозяйственных ареалов были использованы материалы дистанционного зондирования Земли электронных веб-сервисов, цифровая модель рельефа рассматривалась как первоисточник для расчета геоморфометрических переменных, геологическое строение определялось по тематическим картам ВСЕГЕИ. Исходя из кластерного анализа отобранных по основанному на корреляционных связях принципу главных компонент 12 геоморфометрических переменных рельефа было выделено 5 типов ареалов террасирования с последующим рассмотрением их представленности в количественном и площадном соотношениях. Введенные автором в рамках исследования показатели индекса террасированности и распространенности неблагоприятных процессов экзогенной геодинамики для каждого типа дочетвертичных образований, слагающих территорию среднегорной Чечни, позволили выявить вклад геологического фактора для установления наиболее предпочтительных местоположений формирования древней практики террасного земледелия. Полученные результаты в целом согласуются с другими исследованиями, посвященными сельскохозяйственной аграрной исторической специализации горных районов [Борисов и др., 2021; Avni, 2022].

Литература

1. Гаджиев М.Г. Раннеземледельческая культура Северо-Восточного Кавказа (эпоха энеолита и ранней бронзы). М.: Наука, 1991. – 264 с.
2. Головнёв И.И. Особенности формирования растительных сообществ в парке «Монтедор». // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2019. – №. 130. – С. 60-68. DOI: 10.25684/NBG.boolt.130.2019.07.
3. Головнёв И.И., Плугатарь Ю.В., Головнёва Е.Е. Особенности формирования растительных сообществ в парке «Гурзуфский». // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2021. – №. 140. – С. 7-15. DOI: 10.36305/0513-1634-2021-140-7-15.
4. Гуня А. Н., Гайрабеков У. Т., Гагаева З. Ш. Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем. // Геология и Геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №. 3. – С. 170-181. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.65.012.
5. Идрисов И.А., Борисов А.В. Пространственное распределение сельскохозяйственных тер-

рас Дагестана. // Этнокультура освоения гор: Северный Кавказ. / Под общ. ред. М.М. Магомедханова, А.Н. Садового, З.В. Атаева. – Махачкала: Институт истории, археологии и этнографии ДНЦ РАН, 2022. – С. 99-106.

6. Колбовский Е.Ю., Петрушина М.Н., Петров Л.А., Гагаева З.Ш. Культурные ландшафты гор Северного Кавказа: подходы к исследованию, реконструкции и сохранению. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. №. 3. – С. 397-412. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-3-397-412.

7. Мамаев С.А., Ибаев Ж.Г., Гусейнова А.Ш., Курбанисмаилова А.С., Мамаев А.С. Применение электронных баз данных в геологических исследованиях. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – Т. 8. №. 4. – С. 104-116. DOI: 10.23671/VNC.2018.4.20148.

8. Николаев В.А. Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 62 с.

9. Борисов А.В., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Пинской В.Н., Плеханова Л.Н., Идрисов И.А. Почвы древних земледельческих террас Восточного Кавказа. // Почвоведение. – 2021. – № 5. – С. 542-557. DOI: 10.31857/S0032180X2105004X.

10. Османов М.О. Традиционные типы и система земледелия Дагестана в XIX–начале XX века – Махачкала: Институт истории, археологии и этнографии ДНЦ РАН, 2008. – 482 с.

11. Andlar G., Šrajter F., Trojanović A. Classifying the Mediterranean terraced landscape: The case of Adriatic Croatia // Acta geographica Slovenica. – 2017. – Vol. 57. No. 2. – pp. 112-129. DOI: <http://dx.doi.org/10.3986/AGS.4673>.

12. Avni Y. The Emergence of Terrace Farming in the Arid Zone of the Levant – Past Perspectives and Future Implications. // Land. – 2022. – Vol. 11. No. 10. DOI: 10.3390/land11101798.

13. Blaga L. Aspects regarding the significance of the curvature types and values in the studies of geomorphometry assisted by GIS. // Anal. Univ. Oradea Ser. Geogr. – 2012. – No. 2/2012. – pp. 327-337.

14. Brožová N., Baggio T., D'Agostino V., Bühler Y., Bebi P. Multiscale analysis of surface roughness for the improvement of natural hazard modeling. // Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. – 2021. – Vol. 21. – pp. 3539–3562. DOI: 10.5194/nhess-21-3539-2021.

15. Cappa F.M., Campos V.E., Barri F.R., Ramos L., Campos C. M. Environmental and biological factors affecting the abundance of *Prosopis flexuosa* saplings in the central-west Monte of Argentina. // Forest Ecosystems. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100010.

16. Chartin C., Bourennane H., Salvador-Blanes S., Hirschberger F., Macaire J. J. Classification and mapping of anthropogenic landforms on cultivated hillslopes using DEMs and soil thickness data – Example from the SW Parisian Basin, France. // Geomorphology. – 2011. – Vol. 135. No. 1-2. – pp. 8-20. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.07.020.

17. Da Silva J.M.F., Santos L.J.C., Oka-Fiori C. Spatial correlation analysis between topographic parameters for defining the geomorphometric diversity index: application in the environmental protection area of the Serra da Esperança (state of Paraná, Brazil). // Environmental Earth Sciences. – 2019. – Vol. 78. DOI: 10.1007/s12665-019-8357-2.

18. Grove A.T., Rackham O. The nature of Mediterranean Europe: an ecological history. – New Haven, CT: Yale University Press, 2001. – 384 pp.

19. Gunya A., Gakaev R. Landscape analysis of exogenic processes distribution in mountain regions of the Chechen republic. // Reliability: Theory & Applications. – 2022. – Vol. 17. No. 3 (66). – pp. 124-128.

20. Latocha A. The geomorphological map as a tool for assessing human impact on landforms. // Journal of Maps. – 2009. – Vol. 5. No. 1. – pp. 103-107. DOI: 10.4113/jom.2009.1047.

21. Hui Deng, Xiantan Wu, Wenjiang Zhang, Yansong Liu, Weile Li, Xiangyu Li, Ping Zhou, Wenhao Zhuo. Slope-unit scale landslide susceptibility mapping based on the random forest model in deep valley areas. // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. No. 17. DOI: 10.3390/rs14174245.
22. Spencer J.E., Hale G.A. The origin, nature, and distribution of agricultural terracing // *Pacific viewpoint*. – 1961. – Vol. 2. No. 1. – pp. 1-40. DOI: 10.1111/apv.21001.
23. Stubert L., Martín i Oliveras A., Märker M., Scherthanner H., Vogel S. Viticulture in the Laetanian region (Spain) during the Roman period: predictive modelling and geomatic analysis. // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10. No. 6. DOI:10.3390/geosciences10060206.
24. Thomas M. A geomorphological approach to geodiversity – its applications to geoconservation and geotourism. // *Quaestiones geographicae*. – 2012. – Vol. 31. No. 1. – pp. 81-89. DOI: 10.2478/v10117-012-0005-9.
25. Petherbridge G., Ismailov M.M., Ismailov S.M., Rabadanov M.K., Gadzhiev A.A., Teymurov A.A., Rabadanov M.R., Daudova M.G., Abdulaev A.M. Verkhnee Gakvari: The contribution of adat, religious beliefs and public education to collective environmental management in an agro-pastoral community in the Dagestan high Caucasus. // *South of Russia: ecology, development*. – 2021. – Vol. 16. No. 3. – pp. 145-179. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-3-142-179.
26. Vogel S., Märker M., Esposito D., Seiler F. The ancient rural settlement structure in the hinterland of Pompeii inferred from spatial analysis and predictive modeling of Villae rusticate. // *Geoarchaeology*. – 2016. – Vol. 31. No. 2. – pp. 121-139. DOI: 10.1002/gea.21560.
27. Winzeler H.E., Owens P.R., Kharel T., Ashworth A., Libohova Z. Identification and Delineation of Broad-Base Agricultural Terraces in Flat Landscapes in Northeastern Oklahoma, USA. // *Land*. – 2023. – Vol. 12. No. 2. DOI: 10.3390/land12020486.

References

1. Gadzhiev M.G. Early agricultural civilization of the North-Eastern Caucasus (Chalcolithic and Early Bronze Ages). Moscow: Nauka. 1991. 264 p. (In Russ.)
2. Golovnev I.I. Features of plant communities' formation in "Montedor" park. *Bull. of the State Nikitsky Botan. Gard.* 2019. No. 130. pp. 60–68. DOI: 10.25684/NBG.boolt.130.2019.07. (In Russ.)
3. Golovnev I.I., Plugatar Yu.V., Golovneva E.E. Features of the plant community formation in "Gurzufsky" park. *Bull. of the State Nikitsky Botan. Gard.* 2021. No. 140. pp. 7–15. DOI: 10.36305/0513-1634-2021-140-7-15. (In Russ.)
4. Gunya A.N., Gairabekov U.T., Gagaeva Z.Sh. Study of landscape structure to estimate carbon balance of mountain ecosystems. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 170–181. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.65.012. (In Russ.)
5. Idrisov I.A., Borisov A.V. Spatial distribution of agricultural terraces in Dagestan. In: *Ethno-culture of mountain development: the North Caucasus*. Edited by M.M. Magomedkhanov, A.N. Sadovyi, Z.V. Ataev. Makhachkala. Institute of History, Archeology and Ethnography DSC RAS, 2022. pp. 99–106. (In Russ.)
6. Kolbovsky E.Yu., Petrushina M.N., Petrov L.A., Gagaeva Z.Sh. Cultural landscapes of the mountains of the North Caucasus: approaches to research, reconstruction and preservation. *Sustainable development of mountain territories*. 2019. Vol. 11. No. 3. pp. 397–412. DOI 10.21177/1998-4502-2019-11-3-397-412. (In Russ.)
7. Mamaev S.A., Ibaev Zh.G., Guseinova A.Sh., Kurbanismailova A.S., Mamaev A.S. Application of Electronic Databases in Geological Research. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. Vol. 8. No. 4. pp. 104–116. DOI:10.23671/VNC.2018.4.20148. (In Russ.)
8. Nikolaev V.A. Classification and small-scale mapping of landscapes. Moscow. MSU Publ. 1978. 62 p. (In Russ.)

9. Borisov A.V., Kashirskaya N.N., El'tsov M.V., Pinsky V.N., Plekhanova L.N., Idrisov I.A. Soils of ancient agricultural terraces of the Eastern Caucasus. *Pochvovedenie*. 2021. No. 5. pp. 542–557. DOI 10.31857/S0032180X2105004X. (In Russ.)
10. Osmanov M.O. Traditional types and system of agriculture in Dagestan in the 19th–early 20th centuries. Makhachkala. Institute of History, Archeology and Ethnography DSC RAS. 2008. 482 p. (In Russ.)
11. Andlar G., Šrajfer F., Trojanović A. Classifying the Mediterranean terraced landscape: The case of Adriatic Croatia. *Acta geographica Slovenica*. 2017. Vol. 57. No. 2. pp. 112–129. DOI: 10.3986/AGS.4673.
12. Avni Y. The Emergence of Terrace Farming in the Arid Zone of the Levant – Past Perspectives and Future Implications. *Land*. 2022. Vol. 11. No. 10. DOI: 10.3390/land11101798.
13. Blaga L. Aspects regarding the significance of the curvature types and values in the studies of geomorphometry assisted by GIS. *Anal. Univ. Oradea Ser. Geogr.* 2012. No. 2/2012. pp. 327–337.
14. Brožová N., Baggio T., D'Agostino V., Bühler Y., Bebi P. Multiscale analysis of surface roughness for the improvement of natural hazard modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. 2021. Vol. 21. pp. 3539–3562. DOI: 10.5194/nhess-21-3539-2021.
15. Cappa F. M., Campos V. E., Barri F. R., Ramos L., Campos C. M. Environmental and biological factors affecting the abundance of *Prosopis flexuosa* saplings in the central-west Monte of Argentina. *Forest Ecosystems*. 2022. Vol. 9. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100010.
16. Chartin C., Bourennane H., Salvador-Blanes S., Hirschberger F., Macaire J. J. Classification and mapping of anthropogenic landforms on cultivated hillslopes using DEMs and soil thickness data – Example from the SW Parisian Basin, France. *Geomorphology*. 2011. Vol. 135. No. 1-2. pp. 8–20. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.07.020.
17. Da Silva J. M. F., Santos L. J. C., Oka-Fiori C. Spatial correlation analysis between topographic parameters for defining the geomorphometric diversity index: application in the environmental protection area of the Serra da Esperança (state of Paraná, Brazil). *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. DOI: 10.1007/s12665-019-8357-2.
18. Grove A. T., Rackham O. *The nature of Mediterranean Europe: an ecological history*. New Haven, CT: Yale University Press, 2001. 384 pp.
19. Gunya A., Gakaev R. Landscape analysis of exogenic processes distribution in mountain regions of the Chechen republic. *Reliability: Theory & Applications*. 2022. Vol. 17. No. 3 (66). pp. 124–128.
20. Latocha A. The geomorphological map as a tool for assessing human impact on landforms. *Journal of Maps*. 2009. Vol. 5. No. 1. pp. 103–107. DOI: 10.4113/jom.2009.1047.
21. Hui Deng, Xiantan Wu, Wenjiang Zhang, Yansong Liu, Weile Li, Xiangyu Li, Ping Zhou, Wenhao Zhuo. Slope-unit scale landslide susceptibility mapping based on the random forest model in deep valley areas. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 17. DOI: 10.3390/rs14174245.
22. Spencer J.E., Hale G.A. The origin, nature, and distribution of agricultural terracing. Pacific viewpoint. 1961. Vol. 2. No. 1. pp. 1–40. DOI: 10.1111/apv.21001.
23. Stubert L., Martín i Oliveras A., Märker M., Scherthanner H., Vogel S. Viticulture in the Laetanian region (Spain) during the Roman period: predictive modelling and geomatic analysis. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. No. 6. DOI: 10.3390/geosciences10060206.
24. Thomas M. A geomorphological approach to geodiversity – its applications to geoconservation and geotourism. *Quaestiones geographicae*. 2012. Vol. 31. No. 1. pp. 81–89. DOI: 10.2478/v10117-012-0005-9.
25. Petherbridge G., Ismailov M.M., Ismailov S.M., Rabadanov M.K., Gadzhiev A.A., Teymurov A.A., Rabadanov M.R., Daudova M.G., Abdulaev A.M. Verkhnee Gakvari: The contribution of adat, religious beliefs and public education to collective environmental

management in an agro-pastoral community in the Dagestan high Caucasus. South of Russia: ecology, development. 2021. Vol. 16. No. 3. pp. 145–179. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-3-142-179.

26. Vogel S., Märker M., Esposito D., Seiler F. The ancient rural settlement structure in the hinterland of Pompeii inferred from spatial analysis and predictive modeling of Villae rusticate. *Geoarchaeology*. 2016. Vol. 31. No. 2. pp. 121–139. DOI: 10.1002/gea.21560.

27. Winzeler H.E., Owens P.R., Kharel T., Ashworth A., Libohova Z. Identification and Delineation of Broad-Base Agricultural Terraces in Flat Landscapes in Northeastern Oklahoma, USA. *Land*. 2023. Vol. 12. No. 2. DOI: 10.3390/land12020486.

УДК 622.272.2:622.36

DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

Оригинальная статья

Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённно-деформированное состояние массива

Ч.Б. Конгар-Сюрюн , Е.Р. Ковальский 

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, д.2,
e-mail: s225063@stud.spmi.ru

Статья поступила: 20.10.2023, доработана: 30.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Резюме: Актуальность. Анализ опыта отработки калийных месторождений показал, что традиционно применяемые технологии извлечения характеризуются низкой эффективностью. Добыча калийных солей, в основном, осуществляется с применением систем с естественным поддержанием очистного пространства, что предопределяет высокие потери в оставляемых целиках. При этом такие технологии не всегда обеспечивают сохранность водозащитной толщи, нарушение которой ведёт к проникновению над-солевых вод в рудник, вызывает «размывание» целиков ввиду высокой растворимости соляных пород и является причиной полного затопления рудников. **Целью работы** является анализ ранее проведённых исследований, где рассмотрены способы регулирования напряжённого состояния массива и снижения интенсивности деформационных изменений подработанного массива при отработке месторождений калийных солей и разработка вектора развития технологий и материалов для заполнения образующихся пустот, которые позволят регулировать нагрузку от вышележащего массива и препятствовать боковым деформациям оставляемых целиков. **Методология.** Для достижения поставленной цели был проведён анализ практики ведения горных работ на калийных месторождениях в совокупности с обзором ранее выполненных исследований в области извлечения полезных ископаемых подземным способом. **Результаты исследования.** В статье проанализированы составы закладочной смеси, применяемые в горной промышленности. Выделены факторы, влияющие на рецептуру закладочной смеси и приведены перспективные материалы для условий калийных рудников.

Ключевые слова: калийные соли, отходы обогащения, закладочные смеси, система разработки, калийный рудник, напряжённно-деформированное состояние.

Для цитирования: Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённно-деформированное состояние массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 177-187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

Original paper

Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass

Ch.B. Kongar-Syuryun , E.R. Kovalski 

St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, 199106 St. Petersburg,
Russian Federation, e-mail: s225063@stud.spmi.ru

Received: 20.10.2023, revised: 30.11.2023, accepted: 04.12.2023

Abstract: Relevance. Analysis of potash mining experience has shown that traditional technologies are characterized by low efficiency. Method with natural support is mainly used for potash mining, which predetermines high losses in the remaining pillars. At the same time, such technologies do not always ensure the preservation of water protection strata. The violation of water protection strata leads to the penetration of above-salt water into the mine, causes “erosion” of pillars due to the high solubility of salt rocks, and causes complete flooding of mines. **Aim** of the article is analysis of earlier studies on control and reduction of stress-strain behavior of rock mass for potash mines and development vector of technologies and materials for filling mined-out voids to control the overlying mass and prevent lateral deformations of pillars. **Methods.** To achieve this purpose, mining practices at potash deposits were analyzed in conjunction with a review of previous research on underground mineral extraction. **Results.** The paper analyzes the compositions of hardening backfill used in the mining industry. Factors influencing backfill composition are identified and promising components for potash mines conditions are given.

Keywords: potash salt, processing waste, backfill, mining method, potash mine, stress-strain behavior.

For citation: Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 177-187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014

Введение

В настоящее время с ростом населения Земли возрастает спрос на продукты питания. Это предполагает широкое использование неорганических удобрений, основой для производства которых являются калийные соли. Действующие и проектируемые рудники, осуществляющие добычу калийных солей, применяют системы с естественным поддержанием очистного пространства [Барях и др., 2022], что приводит к высоким потерям полезного ископаемого, оставляемого в охранных целиках, а также высокому уровню аварийности по фактору нарушения сплошности водозащитной толщи [Вагях et al., 2001; Блохин и др., 2021; Заалишвили и др., 2022].

Перспективным способом решения представленной проблемы видится применение системы с закладкой выработанного пространства на основе твердеющих смесей [Хайрутдинов и др., 2022]. Данный способ позволит регулировать напряжённое состояние массива и снизить интенсивность его деформационных изменений.

Предлагаемые твердеющие смеси должны обеспечить создание высокопрочного искусственного массива, способного воспринимать нагрузку от подработанного массива и препятствовать боковым деформациям оставляемых целиков [Васильева и др., 2021; Zuev et al., 2019], позволяющего реализовать технологию многостадийной выемки с целью извлечения оставшихся целиков или уменьшения ширины неизвлекаемых целиков [Ковальский и др., 2023]. В данной статье приводится анализ возможных материалов, которые могут быть применены для условий калийных рудников в качестве закладки.

Методы и материалы исследования

При выборе рецептуры закладочной смеси для калийных рудников необходимо выделить факторы, определяющие специфику калийных месторождений:

- наличие нескольких мощных надсолевых водоносных горизонтов;
- водорастворимость вмещающих пород и добываемой руды;
- пластичность/текучесть соляных пород, слагающих целики;
- низкий предел длительной прочности соляных пород;
- относительно невысокая стоимость конечного продукта, затрудняющая внедрение дорогостоящих технологий разработки.

Наличие надсолевых водоносных горизонтов в совокупности с таким фактором как водорастворимость вмещающих пород и добываемой руды предопределяет применение систем разработки с удержанием кровли на целиках. При этом пластичность (текучесть) и низкий предел длительной прочности соляных пород ограничивает срок воспринимаемой целиками нагрузки и не обеспечивает полное сохранение водозащитной толщи. Таким образом, разработка экономически обоснованных составов твердеющих закладочных смесей, необходимых для внедрения многостадийной выемки на калийных рудниках, видится весьма актуальной задачей.

Результаты работы и их обсуждение

При выборе рецептуры закладочной смеси необходимо принять во внимание следующие факторы:

- нормативная прочность создаваемого искусственного массива, определяющая нагрузку подработанного массива;
- время набора прочностных свойств, от чего зависит взаимоувязка во времени очистных и закладочных работ;
- компрессионные характеристики, которые характеризуются деформационными изменениями создаваемого искусственного массива в момент набора прочности и после его полного отверждения, и определяют зависимость усадки закладочного массива от нагрузки на него;
- реологические характеристики закладочной смеси, которые характеризуют её транспортабельность, сохранение свойств на всём протяжении перемещения и удобоукладываемость;
- стоимостные показатели отдельно взятых компонентов и закладочной смеси в целом, что предопределяет стоимость закладочных работ и возводимого искусственного массива.

На расчётные значения прочностных характеристик искусственного массива влияет множество факторов: глубина ведения горных работ; принимаемая система

разработки; порядок отработки камер; очередь закладываемой камеры и другое.

Основным компонентом закладочной смеси, обеспечивающим требуемую прочность искусственного массива, является вяжущее. На большинстве рудных месторождений, обрабатываемых системами с закладкой выработанного пространства, в качестве вяжущего применяется цемент или его производные. На калийных рудниках, где в качестве заполнителя выступают солеотходы, а в качестве затворителя – насыщенный соляной раствор, может быть применен только магнезиальный цемент. Но относительно невысокая стоимость конечного продукта затрудняет применение закладочных смесей на основе цементного вяжущего. Затраты на ведение закладочных работ составляют до 30% от общей себестоимости 1 тонны руды, а из них до 75% приходится на стоимость вяжущего [Benzaazoua et al., 2010; Peygonnard, Benzaazoua, 2012].

В целях оптимизации состава в качестве вяжущего наиболее перспективным вариантом видятся доменные гранулированные шлаки. Применение шлаков позволит существенно снизить расходы на вяжущее, что, безусловно, приведёт к уменьшению стоимости возведения закладочного массива, а также исключит затраты на строительство и содержание отвалов и хвостохранилищ [Golik et al., 2023a; Golik et al., 2023b; Каунг и др., 2023]. Ранее были проведены исследования по изучению химического состава шлаков девяти металлургических предприятий России [Голик и др., 2020]. Химический состав доменных шлаков близок к составу портландцемента, поэтому эти шлаки имеют вяжущие свойства. В зависимости от количества кремнезема и глинозема шлаки классифицируются по степени активности. Шлаки с высокой активностью создают массивы большей прочности. Максимальную активность проявляют шлаки Чусовского и Череповецкого металлургических комбинатов.

Особое внимание следует уделить обработке шлаков. Основными механическими способами улучшения свойств вяжущих компонентов является дробление, измельчение и вибрационное воздействие. Исследованию влияния степени измельчения сырья на активность клинкера посвящено множество работ [Курякова, 2003]. Большинство исследований показывают, что чем больше площадь поверхности частиц, тем выше активность получаемого материала. Активность шлаков возрастает благодаря изменению структуры и внутреннего строения материала за счёт создания новых или вторичных кристаллических структур, что приводит к значительному повышению прочностных характеристик массива после полного затвердевания. Активационная обработка – механическая активация в дезинтеграторе является наиболее дешёвым и простым способом воздействия. Помимо улучшения прочностных характеристик и однородности создаваемого массива, активационная обработка улучшает реологические свойства закладочной смеси, что значительно повышает её транспортабельность смеси.

Устойчивое транспортирование твердеющих закладочных смесей по всей трассе трубопровода, их равномерное распределение в очистном пространстве обуславливаются присущими ими реологическими и техническими характеристиками.

Подвижность закладочной смеси служит характеристикой, определяющей удобоукладываемость (способность растекаться/распределяться в пространстве), и является основным техническим свойством закладочной смеси. Таким образом, удобоукладываемость в заданное пространство (форму) и уплотнение в нём при помощи или действия различных механизмов или приёмов определяет подвижность

закладочной смеси. При этом закладочная смесь на всей технологической цепочке от приготовления до укладки в очистное пространство должна сохранять свою консистенцию и быть стойкой к расслоению. Глубина погружения эталонного конуса в закладочную смесь определяет её подвижность. Погружение эталонного конуса на величину 9–14 см свидетельствует о её пригодности для трубопроводного транспортирования [Монтянова, 2009; Шендрик и др., 1980].

Предельное напряжение сдвига и вязкость относятся к основным реологическим характеристикам, описывающим состояние твердеющих закладочных смесей. Именно данные коэффициенты являются основополагающими при расчёте движения закладочной смеси по трубопроводу и его параметров. Снижение предельного напряжения сдвига и коэффициента внутреннего трения (вязкости), а как следствие рост подвижности закладочной смеси достигается путём увеличения водосодержания. Необходимо отметить, что увеличение водотвёрдого отношения снижает качество закладочного массива после отверждения смеси [Васильева и др., 2023]. По данным [Wang et al., 2022] коэффициент внутреннего трения (вязкость) закладочной смеси, пригодной для транспортирования, не должен превышать 0,46 Па·с. При такой вязкости предельное напряжение сдвига в соответствии с данными [Монтянова, 2009] для самотечной подачи закладочной смеси не должно превышать 200 Па, а при комбинированной подаче (при включении в систему перекачивающих насосов) не должно соответствовать значениям более 150 Па [Шендрик и др., 1980]. Также при расчёте условий транспортирования необходимо принимать во внимание, что временной фактор оказывает влияние на изменения реологических характеристик смеси [Дидманидзе и др., 2020; Дидманидзе и др., 2021].

Одним из способов регулирования и управления реологическими свойствами закладочной смеси является применение различных добавок – пластификаторов. Пластификаторы – поверхностно-активные вещества, образующие на частицах материала водные оболочки, способствующие улучшению транспортабельности данного материала и уменьшающие угол его растекания, что увеличивает полноту заполнения очистной камеры [Плеханова, 2005].

Лигносульфат технический (ЛСТ), мылонафт, сульфитно-спиртовая барда (ССБ), сульфитно-дрожжевая бражка (СДБ) являются наиболее известными и широко применяемыми пластифицирующими добавками, как в горной промышленности, так и в смежной строительной отрасли. Современные пластифицирующие добавки по совокупной эффективности проигрывают лигносульфонату техническому [Монтянова и др., 2019]. Лигносульфат является побочным продуктом (отходом) целлюлозно-бумажной промышленности, что подтверждает его экономическую эффективность. А технологическая эффективность подтверждается тем, что данная добавка выступает как пластификатор, так и активатор. Адсорбционное взаимодействие лигносульфоната происходит как с тонкодисперсными частицами закладочных смесей, что улучшает транспортабельность, так и с продуктами гидратации цемента, что увеличивает прочностные характеристики создаваемого массива после полного отверждения смеси. Предыдущие исследования, где в качестве заполнителя применялись галитовые отходы переработки калийных руд показали, что добавление только 1% лигносульфоната увеличивает прочностные характеристики искусственного массива не менее чем в 1,4 раза [Вотяков, 2009].

В последнее время большую популярность приобретают исследования армирующих добавок (армирующая фибра), которые в основном применяются в строи-

тельстве. Благодаря своим свойствам фибру рассматривают как альтернативную замену традиционному армированию и называют её микроарматурой. Тонкие волокна, выполненные из полипропилена, полимеров, стекла, базальта, стали или других материалов называют фиброй. Выбор вида фибры зависит от назначения материала: повышение прочности, увеличение срока службы конструкции, снижение или полное предотвращение растекания или усадки и другое. Использование фибр в качестве компонента закладочной смеси позволит увеличить прочность материала и уменьшить относительную деформацию усадки закладочного массива, что позволит реализовать предназначение закладки в управлении горным давлением. Следует учитывать, что применение фибры обязывает производить комплексное исследование, так как армирование закладочной смеси сгущает её, что увеличивает вязкость и напряжение сдвига. Применение фибры в закладочной смеси необходимо совмещать с использованием пластифицирующих добавок.

Следует отметить, что закладочные работы снижают интенсивность опасных геомеханических процессов, что подтверждается результатами мониторинга. Постоянный мониторинг состояния целиков и водозащитной толщи на калийных рудниках является важнейшим вопросом контроля безопасности ведения горных работ [Соколов и др., 2023; Казанин и др., 2023; Гендлер и др., 2023а; Гендлер и др., 2023b] и необходимой мерой по защите рудников от затопления. На калийных рудниках производят регистрацию разрушения несущих элементов системы разработки, динамика данных по которым позволяет прогнозировать поведение целиков и подработанного массива, также предусмотрена система сейсмологического мониторинга, описанная в работе [Ганапати и др., 2020]. На калийных рудниках ведется постоянный визуально-маркшейдерский контроль над развитием процессов сдвижения и нарушения [Mikolas et al., 2021], который с развитием технологий стал дополняться спутниковыми интерферометрическими технологиями [Vasova et al., 2021].

Выводы

1. Замена традиционного способа разработки, применяемого при извлечении калийных солей, на технологию с многостадийной выемкой руды представляется перспективной;
2. С целью внедрения многостадийной выемки на калийных рудниках необходимо разработать рецептуру закладочной смеси, позволяющей обеспечить нормативную прочность после отверждения;
3. С целью снижения себестоимости закладочной смеси и уменьшения влияния горных работ на окружающую среду региона безусловным её компонентом должны являться галитовые отходы обогащения, применяемые в качестве инертного заполнителя;
4. Растворимость инертного заполнителя, а также растворимость вмещающих пород, слагающих целики, предопределяет применение насыщенного рассола в качестве затворителя;
5. Одним из наиболее перспективных материалов для использования в качестве вяжущего являются металлургические шлаки;
6. Механическая активационная обработка в дезинтеграторе компонентов закладочной смеси значительно увеличивает прочностные характеристики искусственного массива, создаваемого на её основе;

7. Применение различных добавок позволяет регулировать характеристики закладочной смеси или массива после её отверждения.

8. Армирующее вещество – фибра в составе закладочной смеси видится перспективным материалом для создания высокопрочного закладочного массива.

Литература

1. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования. // Горная промышленность. – 2022. – №1. – С. 41–50. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50.

2. Блохин Д.И., Иванов П.Н., Дудченко О.Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании. // Записки Горного института. – 2021. – Т.247. – С. 1–10. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.1.

3. Васильева М.А., Волчихина А.А., Кускильдин Р.Б. Совершенствование механизма водоотделения при закладочных работах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №4. – С. 125–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_125.

4. Васильева М.А., Волчихина А.А., Морозов М.Д. Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С.133-144. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_133.

5. Вотяков М.В. Повышение полноты извлечения запасов калийных руд на основе закладки выработанного пространства галитовыми отходами: дис... канд техн наук. Москва, 2009. – 140 с.

6. Ганапати П.Г., Заалишвили В.Б., Чандрасекаран С.С., Мельков Д.А. Комплексный мониторинг склоновых процессов в Индии и России. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12 № 4. – С. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

7. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Методические основы выбора приоритетных направлений управления охраной труда при подземной добыче угля на основе анализа динамики интегрального риска травматизма и профессиональной заболеваемости. // Горный журнал. – 2023а. – №9. – С. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06.

8. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Методические основы выбора приоритетных направлений управления охраной труда при подземной добыче угля на основе анализа динамики интегрального риска травматизма и профессиональной заболеваемости. // Горный журнал. – 2023b. – №9. – С. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06.

9. Голик В.И., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Использование вяжущих на основе металлургических шлаков в составе закладочных смесей. // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020. – Вып. 4. – С. 389–400.

10. Дидманидзе О.Н., Афанасьев А.С., Хакимов Р.Т. Математическая модель фазового перехода сжиженного метана в криогенном баке транспортного средства. // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243. – С. 337–347. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.337.

11. Дидманидзе О.Н., Афанасьев А.С., Хакимов Р.Т. Метановое число природного газа и его влияние на эффективность рабочего процесса газового двигателя. // Записки Горного института. – 2021. – Т. 251. – С. 730–737. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.12.

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

13. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А., Лю Цзылу Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 5–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_5.

14. Каунг П.А., Семикин А.А., Хайрутдинов А.М., Дехтяренко А.А. Вовлечение техногенных отходов в переработку – парадигма ресурсного обеспечения устойчивого развития. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 385–397. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397.

15. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Петров Д.Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 349–364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.

16. Курякова Н.Б. Разработка технологии производства строительных материалов на основе комплексного использования металлургических шлаков и других отходов чувовского металлургического завода: дис ... канд.техн.наук. Пермь, 2003. – 158 с.

17. Монтянова А.Н. Формирование закладочных массивов при разработке алмазных месторождений в криолитозоне. М., Горная книга, 2009. – 597.

18. Монтянова А.Н., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Вильчинский В.Б., Наговицин Ю.Н. Опыт и эффективность применения пластифицированных закладочных смесей. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т. 17. № 1. – С. 18–25. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25.

19. Плеханова Т.А. Бесцементная композиция для закладки выработанных пространств на основе техногенных материалов. // Химическая физика и мезоскопия. – 2005. – № 1. – С. 104–112.

20. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. Экогеотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства. // Записки Горного института. – 2023. – Т.260. – С.289–296. DOI: 10.31897/PMI.2023.21.

21. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсовозобновляемых технологий. // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – №5. – С. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.

22. Шендрик В.К., Волощенко В.Л., Комчугов А.А. Типовая технологическая инструкция производства закладочных работ на горнорудных предприятиях Минчермета УССР. 1980. Кривой Рог. НИГРИ. 83 с.

23. Vacova D., Khairutdinov A.M., Gago F. Cosmic Geodesy Contribution to Geodynamics Monitoring. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 906. – 012074. DOI:10.1088/1755-1315/906/1/012074.

24. Baryakh A., Asanov V., Gheghin A., Pankov I. Dynamic failure of salt interchamber pillars. // Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej. – 2001. – Vol. 73. No. 40. – pp. 12–13.

25. Benzaazoua M., Peyronnard O., Belem T., Fried E., Stephant A., Dublet G. Key issues related to behaviour of binders in cemented paste backfilling. // Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. – 2010. – pp. 345–363.

26. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. // Materials. – 2023b. – Vol. 16. – P. 726. DOI: 10.3390/ma16020726.

27. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Y.V., Alenina E.E., Ruban-Lazareva N.V., Kruzhkova G.V., Kondratyeva O.A., Trushina E.V., Skryabin O.O., Khayrutdinov M.M. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechanochemical Activation. // Resources. – 2023a. – Vol. 12. – P. 113. DOI: 10.3390/resources12100113.

28. Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Tyulyaeva Y., Srek J. Activities of a Mine Surveyor and a Geologist at Design Bases in a Limestone Quarry. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2021. – 906(1). – P. 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012073.

29. Peyronnard O., Benzaazoua M. Alternative by-product based binders for cemented mine

backfill: Recipes optimisation using Taguchi method. // Minerals Engineering. – 2012. – Vol. 29. – pp. 28–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.12.010.

30. Wang X., Sun K., Shao J., Ma J. Study on Mechanical and Rheological Properties of Solid Waste-Based ECC. // Buildings. – 2022. – 12. – P. 1690. DOI: 10.3390/buildings12101690.

31. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. // Eurasian Mining. – 2019. – No.1. – pp. 8–12.

References

1. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. Russian Mining Industry. 2022. No. 1. pp. 41–50. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50. (In Russ.)

2. Blokhin D.I., Ivanov P.N., Dudchenko O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation. Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 247. pp. 3–11. DOI:10.31897/PMI.2021.1.1. (In Russ.)

3. Vasilyeva M.A., Volchikhina A.A., Kuskildin R.B. Improvement of water segregation in backfilling. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 4. pp. 125–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_125. (In Russ.)

4. Vasilyeva M.A., Volchikhina A.A., Morozov M.D. Re-backfill technology and equipment. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2021. No. 6. pp. 133–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_133. (In Russ.)

5. Votyakov M.V. Improving the recovery of potash ore reserves by backfilling the mined-out space with halite waste: thesis. Moscow. 2009. 140 p. (In Russ.)

6. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S., Melkov D.A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. Sustainable Development of Mountain Territories. 2020. Vol. 12. No. 4. pp. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581. (In Russ.)

7. Gendler S.G., Prokhorova, E.A. Methodical framework for selecting occupational safety management priorities in underground coal mining on the basis of integrated occupational illness and injury risk dynamics analysis. Gornyi Zhurnal. 2023a. No. 9. pp. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06. (In Russ.)

8. Gendler S.G., Prokhorova, E.A. Methodical framework for selecting occupational safety management priorities in underground coal mining on the basis of integrated occupational illness and injury risk dynamics analysis. Gornyi Zhurnal. 2023b. No. (9). pp. 41–48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06. (In Russ.)

9. Golik V.I., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. The use of binders based on metallurgical slags in the composition of based mixtures. Izvestiya Tula State University. 2020. Vol. 4. pp. 389–400. (In Russ.)

10. Didmanidze O.N., Afanasev A.S., Khakimov R.N. Mathematical model of the liquefied methane phase transition in the cryogenic tank of a vehicle. Journal of Mining institute. 2020. Vol. 243. pp. 337–347. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.337. (In Russ.)

11. Didmanidze O.N., Afanasev A.S., Khakimov R.T. Natural gas methane number and its influence on the gas engine working process efficiency. Journal of Mining institute. 2021. Vol. 251. pp. 730–737. DOI:10.31897/PMI.2021.5.12 (In Russ.)

12. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. Instrumental measure of seismic intensity based on K-Net data. Sustainable Development of Mountain Territories. 2022. Vol. 14. No. 2. pp. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340. (In Russ.)

13. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Evsiukova A.A., Zilu Liu Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 9-1. pp. 5–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_5. (In Russ.)

14. Kaung P.F., Semikin A.A., Khayrutdinov A.M., Dekhtyarenko A.A. Recycling of industrial waste is a paradigm of resource provision for sustainable development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 385–397. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397. (In Russ.)
15. Kovalski E.R., Kongar-Syuryun Ch.B., Petrov D.N. Challenges and prospects for several-stage stoping in potash mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 349–364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364. (In Russ.)
16. Kuryakova N.B. Development of technology for production of construction materials on the basis of integrated use of metallurgical slags and other wastes of Chusovskiy metallurgical plant: thesis. Perm. 2003. 158 p. (In Russ.)
17. Montyanova A.N. Formation of fill mass during the development of diamond deposits in the cryolithozone. Moscow. Gornaja kniga. 2009. 597 p. (In Russ.)
18. Montyanova A.N., Trofimov A.V., Rumyantsev A.E., Vilchinskiy V.B., Nagovitsyn Yu.N. Experience and efficiency of application of plasticized backfilling concrete. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2019. Vol. 17. No. 1. pp. 18–25. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25 (In Russ.)
19. Plekhanova T.A. Cementless composition for filling mined spaces on the basis of technogenic materials. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2005. No. 1. pp. 104–112. (In Russ.)
20. Sokolov I.V., Antipin Y.G., Rozhkov A.A., Solomein Y.M. Environmental geotechnology for low-grade ore mining with the creation of conditions for the concurrent disposal of mining waste. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 260. pp. 289–296. DOI: 10.31897/PMI.2023.21. (In Russ.)
21. Khayrutdinov M.M., Kaung P.A., Chzho Z.Ya., Tyulyaeva Y.S. Ensuring Environmental Safety in the Implementation of the Resource-renewable Technologies. *Occupational Safety in Industry*. 2022. No. 5. pp. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62 (In Russ.)
22. Shendrik V.K., Voloshchenko V.L., Komchugov A.A. Typical technological instruction for the production of stowing operations at mining enterprises of the Ministry of Chernet of the Ukrainian SSR. 1980. Krivoy Rog, NIGRI: 83 p. (In Russ.)
23. Bacova D., Khairutdinov A.M., Gago F. Cosmic Geodesy Contribution to Geodynamics Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 906. P. 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012074.
24. Baryakh A., Asanov V., Gheghin A., Pankov I. Dynamic failure of salt interchamber pillars. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki I Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*. 2001. Vol. 73. No. 40. pp. 12–13.
25. Benzaazoua M., Peyronnard O., Belem T., Fried E., Stephant A., Dublet. G. Key issues related to behaviour of binders in cemented paste backfilling. *Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. 2010. pp. 345–363.
26. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. *Materials*. 2023a. Vol. 16. P. 726. DOI: 10.3390/ma16020726.
27. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Y.V., Alenina E.E., Ruban-Lazareva N.V., Kruzhkova G.V., Kondratyeva O.A., Trushina E.V., Skryabin O.O., Khayrutdinov M.M. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechanochemical Activation. *Resources*. 2023b. Vol. 12. P. 113. DOI: 10.3390/resources12100113.
28. Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Tyulyaeva Y., Srek J. Activities of a Mine Surveyor and a Geologist at Design Bases in a Limestone Quarry. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. Vol. 906. P. 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012073.
29. Peyronnard O., Benzaazoua M. Alternative by-product based binders for cemented mine backfill: Recipes optimisation using Taguchi method. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 29. pp. 28–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.12.010.

30. Wang X., Sun K., Shao J., Ma J. Study on Mechanical and Rheological Properties of Solid Waste-Based ECC. *Buildings*. 2022. Vol. 12. P. 1690. DOI: 10.3390/buildings12101690.

31. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019. No.1. pp. 8-12.

УДК 622.5:543.3

DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015

Оригинальная статья

Минерагенический аспект накопления сульфат- и гидрокарбонат-ионов в шахтных водах (на примере Восточного Донбасса)

А.В. Мохов 

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

Статья поступила: 09.10.2023, доработана: 27.11.2023, принята к публикации: 30.11.2023

Резюме. Статья посвящена выявлению причин накопления в водах угольных шахт западной части Восточного Донбасса сульфат- и гидрокарбонат-ионов. **Актуальность исследований** определяется необходимостью ослабления вредного влияния химического состава шахтных вод на добычу угля и экологическую обстановку. **Цель исследований.** Совершенствование научных основ формирования и прогнозирования химического состава шахтных вод угольных шахт. **Методы исследований.** Исследование данных о химическом составе шахтных вод, минералогический анализ обстановки его формирования известными общенаучными методами, корреляционный анализ материалов по западной части Восточного Донбасса. **Результаты исследований:** Шахтные воды региона резко отличаются от подземных вод повышенным содержанием ряда компонентов химического состава. Высокие содержания сульфат-ионов в воде традиционно связываются с окислением сульфидов горного массива. В ряде районов Восточного Донбасса обнаружены статистические взаимосвязи содержаний отдельных компонентов состава воды, связь их с сернистостью угля. Повышенные содержания кальция и натрия вызваны выщелачиванием пород серной кислотой – продуктом окисления сульфидов. Высокими значениями коэффициента парной корреляции характеризуется связь содержания сульфат-ионов и серы, кальция и сульфат-ионов, кальция и серы общей. Связь содержаний гидрокарбонат- и сульфат-ионов имеет стабильно обратный характер. Эти данные позволяют сделать вывод о наличии причинно-следственной природы указанных связей. Подтверждена связь генерации сульфат-ионов с окислением сульфидов. Взаимодействие серной кислоты с горными породами продуцирует появление углекислого газа и сульфат-ионов, что способствует появлению в воде гидрокарбонат-ионов. Поступление и накопление гидрокарбонат-ионов происходит по реакции Е. Гильгарда. Происходит как поступление в воду отдельных химических компонентов, так и уход их из воды. Различие химического состава шахтных вод в регионе объясняется суммарным действием таких минералогических факторов как повышенное присутствие сульфидов и карбонатов в горном массиве, разное, от низкого до высокого, содержание в нем углекислого газа и углеводородных газов.

Ключевые слова: шахтные воды, химический состав, сульфат-ионы, гидрокарбонат-ионы, Восточный Донбасс, генезис

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

Для цитирования: Мохов А.В. Минерагенический аспект накопления сульфат- и гидрокарбонат-ионов в шахтных водах (на примере Восточного Донбасса). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 188-197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015

DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015

Original paper

Mineragenic aspect of the accumulation of sulfate and hydrocarbonate ions in mine waters (on the example of Eastern Donbass)

A.V. Mokhov 

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

Received: 09.10.2023, revised: 27.11.2023, accepted: 30.11.2023

Abstract: Relevance. The article is devoted to identifying the reasons for the accumulation of sulfate and bicarbonate ions in the waters of coal mines in the western part of Eastern Donbass. **Relevance.** It is determined by the need to mitigate the harmful effects of the chemical composition of mine waters on coal mining and the environmental situation. **Aim.** Improving the scientific basis for the formation and prediction of the chemical composition of mine waters in coal mines. **Methods.** Research of data on the chemical composition of mine waters, mineralogical analysis of the situation of its formation using well-known general scientific methods, correlation analysis of materials from the western part of Eastern Donbass. **Results.** Mine waters in the region differ sharply from groundwater in the increased content of a number of components of their chemical composition. High contents of sulfate ions in water are traditionally associated with the oxidation of sulfides in the rock massif. In a number of areas of Eastern Donbass, statistical relationships were discovered between the content of individual components of the water composition and their connection with the sulfur content of coal. Elevated calcium and sodium contents are caused by leaching of rocks with sulfuric acid, a product of sulfide oxidation. High values of the pair correlation coefficient characterize the relationship between the content of sulfate ions and sulfur, calcium and sulfate ions, calcium and total sulfur. The relationship between the contents of bicarbonate and sulfate ions is consistently inverse. These data allow us to conclude that these relationships have a cause-and-effect nature. The connection between the generation of sulfate ions and the oxidation of sulfides has been confirmed. The interaction of sulfuric acid with rocks produces the appearance of carbon dioxide and sulfate ions, which contributes to the appearance of bicarbonate ions in water. The entry and accumulation of bicarbonate ions occurs according to the E. Hilgard reaction. Both individual chemical components enter the water and leave the water. The difference in the chemical composition of mine waters in the region is explained by the cumulative effect of such mineralogical factors as the increased presence of sulfides and carbonates in the mountain range, and the varied content of carbon dioxide and hydrocarbon gases in it, from low to high.

Keywords: mine waters, chemical composition, sulfate ions, hydrocarbonate ions, Eastern Donbass, genesis

Acknowledgements: The work was carried out as part of the implementation of the state task of the UNC RAS, state registration number of the project 122020100345-8.

For citation: Mokhov A.V. Mineragenic aspect of the accumulation of sulfate and hydrocarbonate ions in mine waters (on the example of Eastern Donbass). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 188-197. DOI: 10.46698/VNC.2023.97.79.015

Введение

Воды угольных шахт имеют значительную минерализацию и высокие содержания многих компонентов, стабильно превосходя в этом отношении материнские природные подземные воды. Выявление процессов формирования шахтных вод создает возможности для прогнозирования и регулирования их состава, использования как попутных полезных ископаемых.

Формирование химического типа шахтных вод связывают с составом водовмещающих пород и естественных флюидов недр [Посохов, 1975]. Состав шахтных вод является во многом результатом скоротечных преобразований материнских вод в ходе геохимических процессов в горных выработках. Помимо минералогических значительное влияние оказывают также техногенные факторы и деятельность различных микроорганизмов.

Механизмы поступления в шахтные воды и причины существенного накопления в них многих макрокомпонентов, как и ход геохимических процессов, остаются неясными и дискуссионными. Прежде всего это относится к гидрокарбонат-ионам. Определенна ситуация с сульфат-ионами.

С химической точки зрения их появление в повышенном количестве легко объяснимо: они являются одним из продуктов окисления сульфидов (преимущественно пирита) массива горных пород под влиянием деятельности тионовых бактерий и контакта частиц этих минералов с кислородом воздуха и водной среды. Результатом этих реакций служит появление в воде серной кислоты и сульфата железа.

По данным специальных исследований [Докукин и др., 1950], предпосылкой повышенных концентраций сульфат-ионов в шахтных водах Донбасса является высокое содержание в угле серы (свыше 2,5 %) и ряд других факторов. Предел накоплению сульфат-ионов ставит выщелоченность сульфидов, а гидрокарбонат-ионов – рост кислотности воды. Последний фактор может подавляться в карбонатсодержащей среде.

Предлагаются различные источники и механизмы поступления гидрокарбонат-ионов, однако этот вопрос остается мало исследованным.

Разработаны представления о генерации этих ионов для других вод в ходе обменных процессов. Этим вопросам посвящены многочисленные публикации [Докукин и др., 1950; Назарова, 1968; Гавришин и др., 2003; Шварцев и др., 2011; Гавришин, 2018, 2019; Войтович, 2015; Закруткин и др., 2022; Парада и др., 2023; Мохов, 2023; Reshetnyak et al., 2014; Zakrutkin V.E. et al., 2015; Rybnikova L.S. et al., 2020]. Предложена серия химических реакций генерации данных ионов в водах природных обстановок [Никольский и др., 1958], однако возможность их привлечения для решения рассматриваемого вопроса остается неясной и не подкрепляется натурными данными. Многие реакции вялотекущи и вполне обратимы.

О потенциальных возможностях массовой генерации гидрокарбонат-ионов под влиянием углекислого и, вероятно, других газов свидетельствует обнаруженная связь состава подземных вод угольных месторождений СССР, включая объекты Донбасса, с газоносностью недр [Кравцов, 1968].

Химический тип воды устойчиво сопряжен в Донбассе с газовой зональностью недр. Выделены пять газовых зон: азотно-углекислых газов (метана нет, шахта негазовая), углекисло-азотных (шахты негазовые или I-ой категории по газу; углекислого газа в первой из обстановок более 80%, а во второй – менее 20%, метана – следы), метаново-азотных газов (шахты II -ой или, иногда, III-ей категории),

азотно-метановых (шахты II-ой категории) и метановых (шахты III категории или сверхкатегорийные). Им соответствуют зоны с водами гидрокарбонатными кальциевыми; гидрокарбонатно-сульфатными кальциево-натриевыми; гидрокарбонатно-сульфатными натриевыми; гидрокарбонатными натриевыми; гидрокарбонатными и хлоридными натриевыми. Данные указывают на недра как источник углекислого и других газов – триггера генерации гидрокарбонат-ионов.

Потенциально, процесс поступления и накопления гидрокарбонат-ионов является многофакторным. По нашему мнению, источником дополнительного поступления углекислого газа является взаимодействие карбонатов массива, в первую очередь, с серной кислотой. Так создаются условия для генерации и накопления гидрокарбонат-ионов в шахтной воде разными механизмами. Вместе с тем, его ограничивает высокая кислотность среды – довольно кислые воды по химическим причинам негидрокарбонатны.

Настоящая публикация посвящена исследованию минералогических вопросов накопления сульфат- и гидрокарбонат-ионов в существенных концентрациях в водах действовавших в начале 1980-х гг. шахт на западной окраине Восточного Донбасса (геолого-промышленные районы Каменско-Гундоровский (КГППР), Гуково-Зверевский (ГЗППР) и Шахтинско-Несветаевский (ШНГППР)). Состав воды действовавших в тот период и в настоящее время шахт других районов открытого Донбасса здесь близок.

Материалы и методы исследования

Использованы результаты изучения химического состава шахтных вод действующих шахт Восточного Донбасса из производственных отчетов, материалов разведочных работ на уголь специализированных организаций и собственные данные. Применен стандартный комплекс методов научного исследования, включая корреляционный анализ связей содержаний компонентов состава вод.

Результаты исследований и их обсуждение

Обобщение материалов по действовавшим в 1981–1986-х гг. шахтам рассматриваемой части региона показало гидрокарбонатно-сульфатный, реже – сульфатно-гидрокарбонатный натриевый облик, кратное превышение величиной минерализации (около 2,5–6 г/дм³) шахтных вод, содержания в них ионов сульфат-, гидрокарбонат- и натрия типичных показателей материнских подземных вод в естественном состоянии.

Согласно [Гидрогеология, 1971; Угольная база, 2000; Гавришин и др., 2003], природные воды каменноугольных отложений региона имеют в диапазоне глубин углеработок минерализацию преимущественно от 1 до 3 г/дм³, гидрокарбонатно-сульфатный натриево-кальциевый состав. Максимум минерализации характерен для нижних горизонтов массива. Подземные воды, имея часто тот же гидрогеохимический тип что и шахтные, содержат мало сульфат- и гидрокарбонат-ионов, а также натрия, кальция (их содержание – первые сотни мг/дм³), железа и других компонентов.

Шахтные воды центральных водосборников в КГППР (5 шахт), ГЗППР (10 шахт) и ШНГППР (12 шахт) имели (1981-1986 гг.) среднегодовые величины минерализации 4040-5840; 2600-5750; 2860-5690, содержания сульфат-ионов – 1177-1635; 1064-3090; 1117-3134, гидрокарбонат-ионов – 909-1532; 264-1440; 256-939 мг/дм³ соот-

ветственно. Трансформация природных вод в шахтные по составу была направлена таким образом в сторону общего резкого непропорционального роста концентраций и доли многих компонентов, особенно, сульфат- и гидрокарбонат-ионов, а также натрия.

Анализы свидетельствуют о варьированности среднего содержания катионов: натрия – от 812 до 1384 (КГГПР), от 412 до 1905 мг/дм³, ГЗГПР – от 412 до 1366; ШНГПР – от 426 до 1905, кальция – от 140 до 323 (КГГПР), от 44 до 514 (ГЗГПР), от 70 до 406 (ШНГПР) мг/дм³ соответственно. Частные значения показателей колеблются в еще более широком диапазоне.

Диапазоны содержаний гидрокарбонат-ионов в ГЗГПР и КГГПР смещены в целом в сторону повышенных концентраций относительно ШНГПР. Для диапазона концентраций сульфат-ионов ГЗГПР и ШНГПР, которые имеют между собой практически совпадающую локализацию, имеется сдвиг в ту же сторону по сравнению с объектами КГГПР.

Большая ширина диапазона указывает на разнообразие, варьирование факторов формирования и механизмов поступления в воду компонентов, отражая, в частности различные последствия выщелачивания.

Так, массовые содержания натрия в шахтных водах ШНГПР характеризуются более широким диапазоном изменчивости, чем в ГЗГПР. Его избыток является следствием поступления в воду из боковых пород и накопления этого редко образующего малорастворимые соединения элемента.

В ГЗГПР значения коэффициента корреляции содержаний с серой общей составляют для сульфат-ионов, гидрокарбонат-ионов, кальция, натрия 0,610; -0,047; 0,215; 0,328. Его значения для содержаний натрия и сульфат-ионов, натрия и гидрокарбонат-ионов, кальция и сульфат-ионов, кальция и гидрокарбонат-ионов, натрия и кальция составили 0,315; 0,808; 0,756; -0,420; -0,089. Расчеты по ШНГПР дают следующие значения коэффициента корреляции с серой общей содержаний сульфат-ионов, гидрокарбонат-ионов, кальция и натрия 0,602; -0,130; 0,587 и 0,128. Коэффициенты корреляции содержаний натрия и сульфат-ионов (0,003), натрия и гидрокарбонат-ионов, кальция и сульфат-ионов, кальция и гидрокарбонат-ионов, натрия и кальция составляли 0,003; 0,222; 0,304; 0,614; -0,211 соответственно.

Величины коэффициента корреляции среднегодовых содержаний гидрокарбонат-ионов и сульфат-ионов имели отрицательное значение для ГЗГПР и ШНГПР, соответственно, -0,369 и -0,556.

Различия корреляции в отдельных районах и в сводной выборке являются основанием для вывода о присутствии в последней данных из разных генеральных совокупностей с различными спектром формирующих состав воды факторов, степенью их влияния и синергизмом.

Сильная корреляция содержаний сульфат-ионов и пластовой серы общей является подтверждением представлений о формировании сульфатности шахтных вод в результате окисления сульфидов. Сильная положительная связь содержаний кальция и сульфат-ионов для ГЗГПР и ШНГПР вместе и порознь служит доводом в пользу обоснованности идентификации источника их поступления – карбонатов и угольной массы.

Поскольку обнаруженные концентрации ионов кальция (в среднем около 200 мг/дм³) находятся намного ниже предела (около 2000 мг/дм³) растворимости сульфата кальция, вероятен уход из воды данного компонента, например, вместе с се-

рой и железом. Низкие для потенциально функциональной связи сульфат-ионов с базовым веществом – серой – показатели указывают на процессы сдерживания накопления сульфат-ионов в воде и (или) возможность удаления их отсюда разными механизмами.

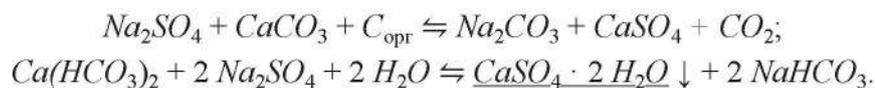
Повсеместно слабая связь гидрокарбонат-ионов с серой указывает на разнесенность во времени формирования состава воды. Большая, чем с серой, связь содержания кальция и сульфат-ионов, служит признаком наличия цепи химических реакций формирования итогового состава.

Слабость связей при явной близости отдельных из них к генетически функциональной зависимости служит признаком трансформации химического состава воды параллельными разнонаправленными процессами, включая, поступление в воду и садку из нее минеральных веществ.

Указанием на вероятный механизм поступления гидрокарбонат-ионов является по нашему мнению обратная связь содержания гидрокарбонат- и сульфат-ионов, сильная положительная связь натрия и гидрокарбонат-ионов. Причинно-следственные закономерности означают наличие связи содержания сульфат- и гидрокарбонат-ионов в ходе метаморфизации воды.

Вырисовывается такая схема формирования состава воды: окисление сульфидов → появление серной кислоты и железа → выщелачивание кислотой из пород натрия, кальция и других компонентов → выделение в воду углекислого газа → частичное замещение сульфат-ионов гидрокарбонат-ионами.

Поступление ряда компонентов в повышенном количестве дает старт их взаимодействию между собой и с породной средой, по доказанной реакции Е. Гильгарда (в разновидностях) [Никольский и др., 1958]:



Первая реакция продуцирует дополнительное поступление в водную среду углекислого газа. Вторая реакция резко сдвигается вправо и поддерживается при наличии его повышенных концентраций [Никольский и др., 1958], чему благоприятствуют протекание первой реакции и шахтные условия. Массовое образование гидрокарбонат-ионов запускается окислением сульфидов.

Сопоставление геологических в широком смысле характеристик районов и обстановки внутри них приближает к пониманию причин сходства и различия состава шахтных вод и содержания рассматриваемых компонентов.

Кусты шахт районов территориально и геоструктурно вполне обособлены. Шахты каждого из них занимают отдельные крупные складчатые структуры: Изваринскую антиклиналь (КГГПР), Сулино-Садкинскую (ГЗГПР) синклиналь, западную часть Шахтинско-Несветаевской (ШНГПР) синклинали. Затруднения с водообменом не создают автономные условия формирования состава подземных вод. Его сходство указывает на слабость влияния здесь данного тектонического фактора.

Близость химического типа, низкая минерализация подземных вод указывает на слабость влияния литологического состава угленосных массивов. Угленосные толщи сложены однотипным комплексом пород (песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, угли) с несколько нарастающим присутствием известняков к северу от ШНГПР к КГГПР (до 3 % объема массива). Характеристики пород также вполне однотипны: преобладают кварцевые песчаники; цемент глинистый и кварцевый. Существенные различия появляются на уровне минералогических факторов мень-

шого порядка. Исключительное значение в формировании сульфатности шахтных вод всех районов имеет высокая сернистость угля.

Содержания общей серы (основная часть которой находится в виде сульфидов – до 90 %) в угле КГГПР, ГЗГПР и ШНГПР имеют повышенные их значения в первом из них (от 1,6 до 6,0 при преобладании около 5,0 %), пониженные в третьем (от 0,6 до 5,5 при преобладающем около 2,5 %), промежуточные во втором (0,9 – 3,46, преобладает около 3,0 %), что обеспечивает повсеместно высокую сульфатность шахтных вод, отражается на направлении и изменчивости концентраций ряда компонентов их состава.

Сочетание повышенной сернистости угля дополняется в КГГПР фактором относительно меньшей метаморфизации известняков и других пород – повышенной их способности к растворению и выщелачиванию кислыми средами, соответственно, более высокой генерацией углекислого газа по сравнению с шахтами ШНГПР и ГЗГПР.

В более благоприятном для участия в химических реакциях этого газа отношении по сравнению с другими районами КГГПР находится в связи с высокой газообильностью выработок и газоносностью массива. Выработки сверхкатегорийных шахт КГГПР находились в метановой зоне, где велась выемка среднеметаморфизованных углей марок К (косовый) и Ж (жирный). Метанообильность шахт колебалась от 28,9 до 55,1 м³/тонны суточной добычи. Выделение в выработки углекислого газа значительно. В ГЗГПР и ШНГПР выделения метана и углекислого газа в шахтах практически полностью отсутствовали [Каталог..., 1990].

По данным современных геологоразведочных работ газоносность углей на глубинах до 491 м в КГГПР колеблется от 1,48 до 35,78 мл/грамм горючей массы, причем содержание углекислого газа существенно и находится на том же уровне, что и метана. Здесь имеется значительный потенциал выделений углекислого газа из недр. Повышенное выделение углекислого и углеводородных газов вносит дополнительный вклад в формирование насыщенности гидрокарбонатами шахтных вод КГГПР и его отличие от других районов. Высокие газоносность пород и газообильность шахт, пониженная степень метаморфизма материала известняков позитивно отражаются на генерации гидрокарбонат-ионов и накоплении их в воде.

Выводы

Шахтные воды Восточного Донбасса отличаются от подземных вод повышенным содержанием ряда компонентов химического состава. Формирование состава шахтных вод запада региона из подземных находится под сильным влиянием факторов минералогической природы.

Изучение результатов химического анализа шахтных вод показывает существование взаимосвязей содержаний ряда компонентов состава воды и горного массива. Высокими значениями коэффициента парной корреляции характеризуется связь содержания кальция и сульфат-ионов с серой общей, натрия и гидрокарбонат-ионов. Связь содержаний гидрокарбонат- и сульфат-ионов имеет стабильно обратный характер. Эти данные позволяют сделать вывод о наличии причинно-следственной природы указанных связей.

Подтверждена зависимость генерации сульфат-ионов от окисления сульфидов. Повышенные содержания кальция и натрия вызваны выщелачиванием пород серной кислотой. Воздействие кислоты на карбонаты продуцирует появление углекис-

лого газа, что приводит к образованию и накоплению гидрокарбонат-ионов. Тот же эффект вызывает наличие в воде сульфат-ионов по реакции Гильгарда, которая запускается окислением сульфидов. Выявлена возможность поступления в воду отдельных компонентов и ухода их из воды в результате серии параллельно-последовательных реакций. Различие химического состава, потребительских свойств шахтных вод объясняется разнообразием присутствия сульфидов и карбонатов в горном массиве, содержания в нем углекислого и углеводородных газов.

Трансформация состава вод в выработках шахт создает трудности для использования их как попутных полезных ископаемых.

Литература

1. Войтович С.П. Геохимические особенности шахтных вод угольных бассейнов Украины и России. // Молодой ученый. – 2015. – № 23 (103). – С. 395-397.
2. Гавришин А.И. Состояние окружающей среды в районе угольных шахт Восточного Донбасса. // Горный журнал. – 2018. №1 – С. 92-96. DOI:10.17580/gzh.2018.01.17.
3. Гавришин А.И. Изменение гидрогеохимических условий в Восточном Донбассе за 25 лет. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т.9(3). – С. 36-46.
4. Гидрогеология СССР. Том VI. Донбасс. М.: Недра. 1971. – 480 с.
5. Докукин А.В. и Докукина Л.С. Возникновение кислотных рудничных вод и борьба с ними. – М.-Л.: Углетехиздат. – 1950. – 332с.
6. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк О.С. Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т.12(1). – С. 19-34. DOI:10.46698/VNC.2022.20.40.002.
7. Каталог метаносности и выбросоопасности основных угольных пластов Донецкого и Львовско-Волынского угольных бассейнов в границах действующих шахт / Минуглепром СССР. Донецк. 1990. – 117 с.
8. Кравцов А.И. Геологические условия газоносности угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. / М.: Недра. 1968. – 330с.
9. Мохов А.В. Гидравлические аспекты режима гидросферы на полях угольных шахт (на примере Восточного Донбасса). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т.13(3). – С. 191–199. DOI:10.46698/VNC.2023.93.35.015.
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. Никольский Ю.П., Мошкина И.А. К вопросу образования соды в природе химическим путем. // Тр. Хим.-мет. ин-та Зап.-Сиб. ф-ла АН СССР. 1958. – №12. – С. 153–162.
12. Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т.13(2). – С. 95–105. DOI:10.46698/VNC.2023.84.41.008.
13. Посохов Е.В. Общая гидрохимия. Л.: Недра. 1975. – 208с.
14. Угольная база, т.1. Угольные бассейны и месторождения европейской части России (Северный Кавказ, Восточный Донбасс, Подмосковный, Камский и Печорский бассейны, Урал). – М.: ЗАО «Геоформмарк». 2000. – 483с.
15. Гавришин А.И., Корadini А., Мохов А.В., Бондарева Л.И. Формирование химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ). 2003. – 187с.
16. Шварцев С.Л., Домрачева Е.В., Рассказов Н.М. Геохимия и формирование содовых вод Кузбасса. // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2011. – Т.318. №. 1. – С. 128–134.
17. Reshetnyak Olga S., Nikanorov Anatoly V., Zakrutkin Vladimir Ye., Gibkov Yevgeny V.

The Chemical Composition of Surface Waters of Technogenically Affected Geo-Systems in the Eastern Donbas Region. // *European Researcher*. – 2014. – Vol. 86. No. 11–1. – pp. 1978–1992. DOI:10.13187/er.2014.86.1978.

18. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Y. The influence of coal mining on groundwater pollution (Eastern Donbass). // *International multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SCeM 15th*. – 2015. – pp. 927–932.

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. – pp. 464–472.

References

1. Voitovich S.P. Geochemical features of mine waters in coal basins of Ukraine and Russia. *Young scientist*. 2015. No. 23 (103). pp. 395–397. (in Russ.)

2. Gavrishin A.I. State of the environment in the area of coal mines in Eastern Donbass. *Mining magazine*. 2018. No. 1. pp. 92–96. DOI:10.17580/gzh.2018.01.17. (in Russ.)

3. Gavrishin A.I. Changes in hydrogeochemical conditions in Eastern Donbass over 25 years. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 36–46. (in Russ.)

4. *Hydrogeology of the USSR. Volume VI. Donbass*. Moscow. Nedra. 1971. 480 p. (in Russ.)

5. Dokukin A.V. and Dokukin L.S. The occurrence of acidic mine waters and their control. *Moscow-Leningrad. Ugletekhizdat*. 1950. 332 p. (in Russ.)

6. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S. Chemical composition and some features of mineral formation in bottom sediments of rivers in the Seversky Donets basin (within the Rostov region). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 19–34. DOI:10.46698/VNC.2022.20.40.002. (in Russ.)

7. *Catalog of methane content and outburst hazard of the main coal seams of the Donetsk and Lvov-Volyn coal basins within the boundaries of existing mines*. Ministry of Coal Industry of the USSR. Donetsk. 1990. 117 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. Hydraulic aspects of the hydrosphere regime in the fields of coal mines (using the example of Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 191–199. DOI:10.46698/VNC.2023.93.35.015. (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. Nikolsky Yu.P., Moshkina I.A. On the issue of the formation of soda in nature by chemical means. *Proceedings of the Chemical-Metallurgical Institute. West Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences*. 1958. No. 12. pp. 153–162. (in Russ.)

12. Parada S.G., Hamburg K.Yu. Ore-magmatic systems of Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 95–105. DOI:10.46698/VNC.2023.84.41.008. (in Russ.)

13. Posokhov E.V. *General hydrochemistry*. Leningrad. Nedra. 1975. 208 p. (in Russ.)

14. *Coal base. Coal basins and deposits of the European part of Russia (North Caucasus, Eastern Donbass, Moscow Region, Kama and Pechora basins, Ural)*. Moscow. JSC Geoformmark, 2000. 483 p. (in Russ.)

15. Gavrishin A.I., Coradini A., Mokhov A.V., Bondareva L.I. Formation of the chemical composition of mine waters in Eastern Donbass. *Novocheerkassk. SRSTU. NPI*. 2003. 187 p. (in Russ.)

16. Shvartsev S.L., Domracheva E.V., Rasskazov N.M. Geochemistry and formation of soda waters of Kuzbass. *Izv. Tomsk Polytechnic University*. 2011. Vol. 318. No. 1. pp. 128–134. (in Russ.)

17. Reshetnyak Olga S., Nikanorov Anatoly V., Zakrutkin Vladimir Ye., Gibkov Yevgeny

V. The Chemical Composition of Surface Waters of Technogenically Affected Geo-Systems in the Eastern Donbas Region. *European Researcher* 2014. Vol. 86. No. 11–1. pp. 1978-1992. DOI:10.13187/er.2014.86.1978.

18. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Y. The influence of coal mining on groundwater pollution (Eastern Donbass). *International multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SCeM 15th*. 2015. pp. 927–932.

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. pp. 464–472.

УДК 551.3.053 + 551.4.037

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

Оригинальная статья

Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов

А.Ф. Габараев¹, Д.А. Мельков¹, А.Л. Кортиев², Е.Н. Козырев¹

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

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44

Статья поступила: 12.09.2023, доработана: 19.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Аннотация. Актуальность. Геоморфология является одним из ключевых факторов развития геологических процессов. В связи со значительной массой смещаемого материала склоновые процессы, обладают огромной разрушительной силой и представляют большую опасность для жилых, транспортных и других объектов экономики. На примере рекреационного комплекса Мамисон исследовано влияние геоморфологических особенностей горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов. **Методы.** В работе использован комплексный подход, включающий математические модели, численные эксперименты, регрессионный анализ натуральных и численных данных и разработку комплексной методики в ГИС технологиях. На основе данных космического зондирования Земли SRTM была создана цифровая модель рельефа (DEM) и выполнены расчеты устойчивости склонов в статической постановке методом Бишопа и при динамических воздействиях. При этом динамические (сейсмические) колебания моделировались методом конечных элементов. **Результаты.** Установлена связь интенсивности колебаний поверхности скального массива с коэффициентом, равным произведению угла наклона рельефа на относительную высоту, и получены формулы для пиковых ускорений и приращений интенсивности. На основе полученных данных было выполнено ранжирование территории по комплексному влиянию статических и динамических нагрузок на массив.

Ключевые слова: Мамисон, геоморфология, склоновые процессы, опасные геологические процессы, численное и цифровое моделирование, метод конечных элементов (МКЭ).

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: Габараев А.Ф., Мельков Д.А., Кортиев А.Л., Козырев Е.Н. Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 10(4): 198-212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

Original paper

Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes

A.F. Gabaraev¹, D.A. Melkov¹, A.L. Kortiev², E.N. Kozyrev¹

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

²North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation

Received: 12.09.2023, revised: 29.11.2023, accepted: 04.12.2023

Annotation. Relevance. Hemorphology is one of the key factors in the development of geological processes. Due to the significant mass of displaced material, slope processes have enormous destructive power and pose a great danger to accommodation, transport and other economic facilities. In example of the Mamison recreational complex, the influence of the geomorphological features of the mountain region on the intensity of the manifestation of hazardous heological processes was studied. **Methods.** The work uses an integrated approach, including mathematical models, numerical experiments, regression analysis of natural and numerical data and the development of an integrated methodology in GIS technologies. Based on SRTM Earth space sensing data, a digital elevation model (DEM) was created and slope stability calculations were performed in a static setting using the Bishop method and under dynamic loadings. In the latter case, seismic vibrations were modeled by the finite element method. **Results.** A connection has been established between the intensity of vibrations of the surface of a rock massif and a coefficient equal to the product of the angle of inclination of the relief and the relative height, and formulas for peak accelerations and intensity increments have been obtained. Based on the data obtained, the territory was ranked according to the complex influence of static and dynamic loads on the massif.

Keywords: Mamison, hemorphology, slope processes, hazardous geological processes, numerical and digital numerical and digital modeling, finite element method (FEM).

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: Gabaraev A.F., Melkov D.A., Kortiev A.L., Kozyrev E.N. Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 198-212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

Введение

Территория Северной Осетии подвержена разрушительному воздействию практически всех известных типов опасных геологических процессов, которые могут привести к гибели людей и колоссальным материальным потерям, оказав существенное влияние на социально-экономическую обстановку и безопасность терри-

тории Республики. Тяжесть последствий обуславливается большим разнообразием геолого-морфологических, климатических и, в целом, ландшафтных условий преимущественно горной территории Северной Осетии. Яркими примерами служат: сход ледника Колка в 2002 г., обвал в районе Девдоракского ледника в 2014 г., активизация Мацутинского оползня в 2019 г.

Расположение исследуемой территории в зоне альпийской тектономагматической активизации Большого Кавказа определяет свойственные областям альпийской складчатости сложные инженерно-геологические условия, вызванные разнообразием литологического состава пород, их интенсивной тектонической нарушенностью, активной неотектоникой и сейсмичностью, широким развитием современных экзогенных геологических процессов [Чотчаев и др., 2016, 2017, 2020]. Определяющим фактором методологической основы исследований является геоморфология, влияние которой на интенсивность формирования экзогенных процессов, зависит от способности элементов рельефа разрушаться и условий накопления формами рельефа эрозионного материала.

Из экзогенных геологических процессов на территории распространены: выветривание, эрозионные, селевые и гравитационные (оползневые, обвальные), лавинные, солифлюкция, суффозия и др. В связи с развитием туризма актуальным является исследование района комплекса «Мамисон». Данный район характеризуется детальной изученностью, позволяющей выполнить сопоставление данных моделирования с проявлением склоновых процессов различной природы. Комплексное исследование выполнено в работах [Чотчаев и др., 2021], где территория делилась на геотаксоны и определялось воздействие целого ряда факторов на формирование опасных геологических процессов в виде экспертных оценок. Установлена устойчивая приуроченность экзогенных процессов к тектоническим нарушениям, зонам сейсмической и неотектонической активности, повсеместно отмечаемой на всей территории, интерпретируемая как результат причинно-следственной связи эндогенных и экзогенных геодинамических процессов. В настоящем исследовании с большей детальностью рассматривается геоморфологическая составляющая развития процессов при статических и динамических нагрузках на основе математического моделирования.

Методы

В работе использован комплексный подход, включающий использование математических моделей, для оценки устойчивости склонов при статических и динамических нагрузках, проведение численных экспериментов, регрессионный анализ натурных и численных данных и разработку комплексной методики на основе ГИС технологий.

В основу методологического обоснования проводимых исследований положены современные теоретические и эмпирические представления о геодинамических процессах, и экспериментально полученные данные исследований ряда динамически опасных объектов региона и районов Центрального Кавказа [Кюль и др., 2019; Svalova et al., 2019], классификационное представительство геодинамических процессов на территории, структурно-тектонические и литологические особенности геологической среды, комплекс физико-механических, геофизических и геохимических характеристик пород, наконец, их собственные физические поля [Фоменко,

2016; Заалишвили, Чотчаев, 2016; Чотчаев и др., 2016], а их отклик на воздействие искусственными полями может служить своеобразным показателем текущего состояния объекта. Определяющим фактором методологической основы исследований является также геоморфология, влияние которой на интенсивность формирования экзогенных процессов, зависит от способности элементов рельефа разрушаться и условий накопления формами рельефа эрозионного материала. Важнейшей характеристикой геодинамических объектов является их напряженно-деформированное состояние, влияющее на физические параметры объекта, петрофизические свойства пород и уровень подземных вод.

Устойчивость склонов оценивалась на основе цифровой модели рельефа с помощью программы Scoops3D [Заалишвили, Кануков, 2019; Zaalishvili et al., 2020a; Zaalishvili et al., 2020b]. Подход был первоначально описан в [Reid et al., 2000]. Результаты анализа Scoops3D определяют минимальный коэффициент безопасности (показатель устойчивости) для потенциальных поверхностей скольжения, влияющих на каждую ячейку матрицы высот по всему ландшафту, а также для объемов или площадей, связанных с этими потенциальными повреждениями склонов.

Методика позволяет рассчитывать относительную стабильность склонов по всему ландшафту, и тем самым выполнять региональные оценки подверженности оползням в качестве инструмента скрининга для выявления участков ландшафта с низкой стабильностью, что предполагает более детальный анализ устойчивости. Scoops3D позволяет пользователю выбирать между двумя хорошо известными методами геотехнического равновесия моментов для расчета устойчивости вращающейся поверхности: обычный метод Феллениуса и упрощенный метод Бишопы [Duncan, Wright, 2005].

Упрощенный метод Бишопы обеспечивает значения коэффициента безопасности, аналогичные значениям, полученным с помощью более строгих методов обеспечения устойчивости (таких как методы Спенсера или Morgenштерна-Прайса) как в 2D [Duncan, Wright, 1980], так и 3D [Reid et al., 2015]. Упрощенный метод Бишопы требует итеративного метода решения для вычисления коэффициента безопасности F , и итерационный процесс иногда не может сходиться к решению или сходится к ложному (то есть, неправильному) решению, особенно если пробная поверхность включает очень крутые участки скольжения или подвержена влиянию высокого давления поровой воды, которое пользователем отфильтровывается.

В 1984 году В.Б. Заалишвили на основе полевых наблюдений было установлено, что наклон рельефа и высота расположения участка, фактически, определяют амплитудный уровень волновых полей мощных невзрывных импульсных и вибрационных источников.

Позже, С.А. Гогмачадзе и В.Б. Заалишвили ввели понятие, т.н. коэффициента «рельефности», представляющего произведение угла наклона рельефа (α , град) и высоты расположения участка (h , м) (Отчет ИСМИС АН ГССР, 1989). Указанный параметр $K=\alpha h$ (град, м) характеризует увеличение интенсивности землетрясений в зависимости от грунтовых условий до одного-двух баллов [Габеева, Бурдзиева, 2008; Заалишвили, 2009].

Модификация динамических (сейсмических) движений грунта особенностями поверхности земли, такими как холмы, хребты, скалы и каньоны, известная как топографические эффекты, хорошо известна по данным инструментальных наблю-

дений и макросейсмического обследования сильных землетрясений [Assimaki et al., 2005; Bard, 1982; Jeong et al., 2019; Shiyamalagowri et al., 2020; Пучков, Гарагозов, 1973; Заалишвили, 2009].

В качестве примеров с большим усилением исходного сигнала влиянием рельефа, можно привести: запись движения грунта с пиковым значением ускорения 1,82 g на вершине холма Тарзана во время землетрясения в Нортридже в 1994 году [Bouchon, Barker, 1996], запись на плотине Пакойма (1,12 g) во время землетрясения в Сан-Фернандо 1971 года [Booge, 1972] и движение грунта (2,74 g), зарегистрированное японской сейсмической сетью K-Net (station MYG004) во время землетрясения Тохоку 2011 [Nagashima et al., 2012] и др.

В частности, при Рачинском землетрясении (Грузия, 1991) в Амбролаурском и Онском районах много зданий сельского типа, расположенных у оснований холмов, получило незначительные повреждения (0–1-й степени) (Гогмачадзе, Заалишвили и др., 1991-Отчет ИСМИС АН ГССР). В то же время здания, расположенные на склонах, превышающих 20°, были повреждены значительно сильнее (2–3-я степень). При расположении обширных территорий на высокогорных плато сейсмический эффект часто предопределяется исключительно влиянием рельефа, но на это редко обращали внимание. При этом из-за близости к эпицентру могут преобладать частичные и полные обрушения застройки. Например, в с. Боква при Рачинском землетрясении 1991 г. преобладали повреждения 4–5-й степени, т.е. частичные и полные обрушения зданий и сооружений [Папалашвили и др., 1997]. Здесь при анализе причин формирования сейсмического эффекта, влияние рельефа в виде параметра αh , не учитывалось, хотя на основе дальнейшего анализа, в основном, отчетливо проявлялось [Заалишвили, 2009].

Топографические эффекты изучаются с использованием таких методов, как аналитические решения в замкнутой форме, конечные разности, конечные элементы и граничные элементы [Bard, 1982; Assimaki, 2005; Заалишвили и др., 2000, 2008 и др.].

Моделирование методом конечных элементов позволяет строить двухмерные и трехмерные модели и подходит для моделирования геологических объектов [Заалишвили и др., 2000, 2008]. Основная идея МКЭ заключается в том, что исследуемый объект представляется в виде совокупности отдельных элементов конечных размеров, связанных между собой в узлах. В качестве элементов используются тела различных конфигураций: призмы – в трехмерных задачах; стержни – в разных конструкциях; треугольники, четырехугольники и другие плоские фигуры – в двумерных задачах [Бате, Вильсон, 1982]. Выбор треугольных элементов имеет ряд преимуществ, т.к. сетка из треугольных элементов позволяет достаточно точно описать любую форму рельефа и слоистой структуры грунтового массива со своими физико-механическими свойствами, изменяющимися во времени в зависимости от интенсивности воздействия. В качестве воздействия используется акселерограмма землетрясения, как правило, горизонтального направления, приложенного к основанию грунтового массива. Грунт находится в условиях плоской деформации и рассматривается как ортотропная среда. Оси ортотропии совпадают с направлениями главных напряжений. Решение системы выполнялось методом Вильсона, по существу являющимся развитием метода линейного ускорения.

Геоинформационное моделирование реализовано в среде QGIS, статистическая

обработка данных, регрессионный анализ выполнялись средствами библиотеки sklearn [Pedregosa et al., 2011].

Результаты и обсуждение

Расчеты выполнялись на цифровой модели рельефа (рис. 1), построенной по данным SRTM [Fag et al., 2007]. Программа Scoops3D использует трехмерный «метод столбцов» анализа предельного равновесия для расчета устойчивости потенциальных разрушений откосов (оползней) со сферической потенциальной поверхностью скольжения. Результаты анализа (рис. 2) показывают минимальный коэффициент безопасности (показатель устойчивости) для потенциальных поверхностей скольжения, влияющих на каждую ячейку матрицы высот по всему ландшафту, а также для объемов или площадей, связанных с этими потенциальными повреждениями склонов. Для высот более 3500 м расчеты не выполнялись. Следует отметить, что по данным расчетов, выполненных ранее, в целом, для территории Северной Осетии [Мельков, Ревазов, 2021], участки, характеризующиеся наибольшей опасностью (минимальные значения коэффициента безопасности F) расположены в районах Цей, Унал-Садон и Бурон. Исследуемый район в отличие от них характеризуется более высокими значениями индекса безопасности и вполне обоснованно подходит для создания рекреационной зоны. Детальное изучение свойств горных пород и топосъемка опасных участков позволят произвести более точную оценку их устойчивости.

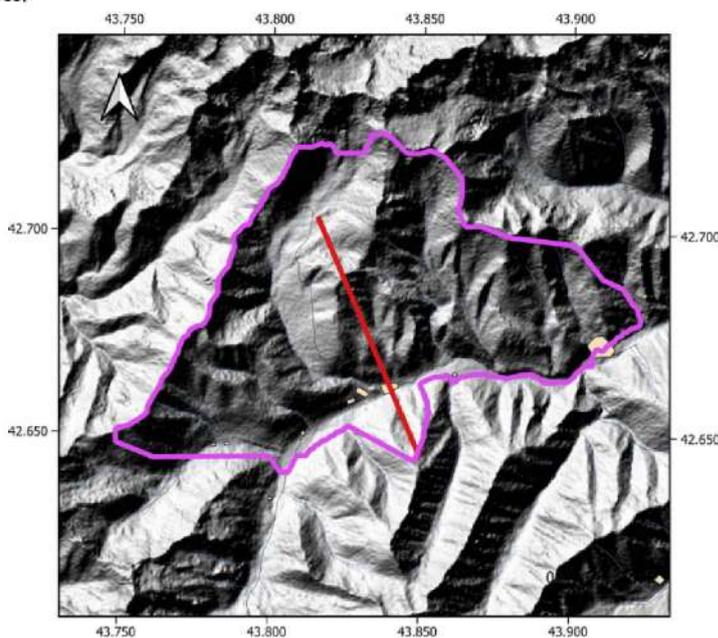
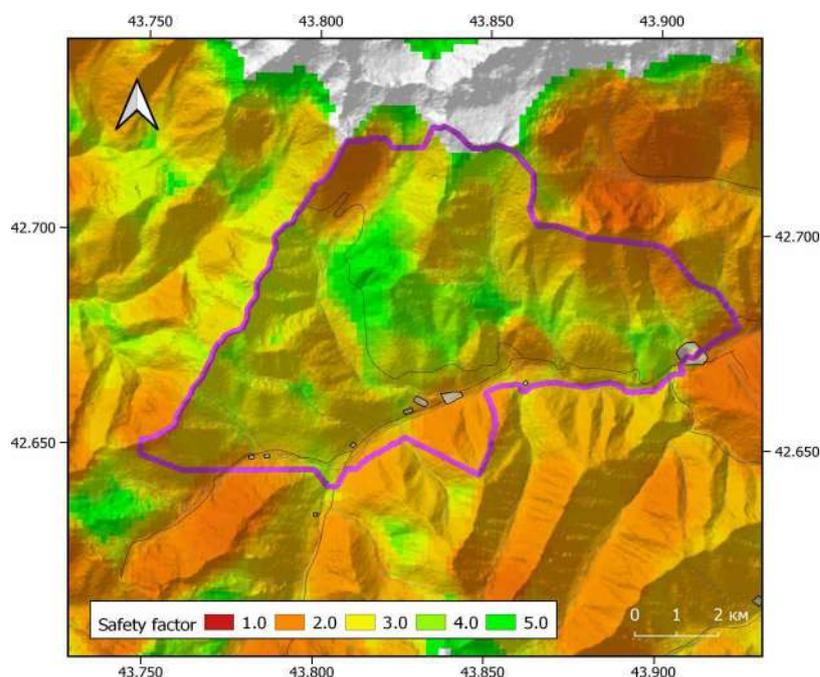


Рис. 1. Цифровая модель рельефа, исследуемый район и профиль для которого построена расчетная конечноэлементная модель (секущая прямая) /

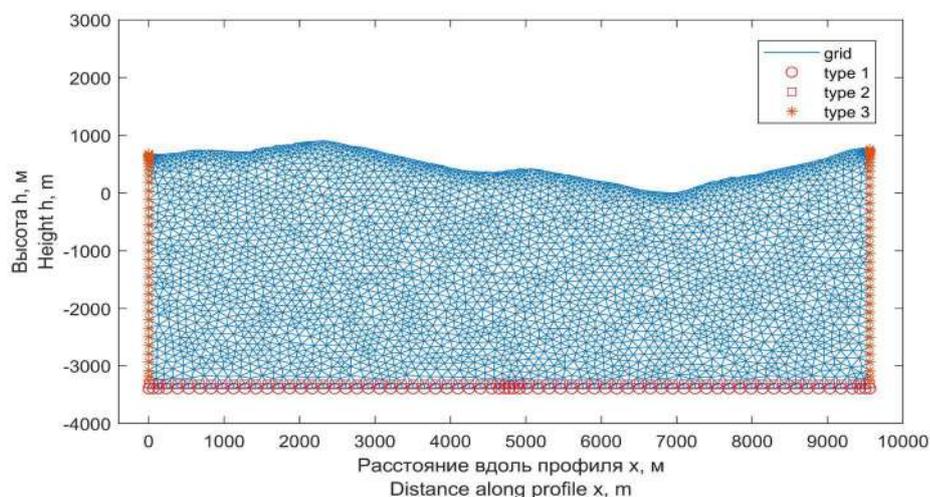
Fig. 1. Digital elevation model, the area under study and the profile for which a computational finite element model (secant line) was built

Для установления параметров влияния рельефа на усиление сейсмических колебаний была построена двумерная конечно-элементная модель разреза, включающего основные объекты, один из горнолыжных склонов и проявление опасных геологических процессов (рис. 3). Слева и справа от склона для минимизации влияния отражений от границ, на них заданы демпфирующие элементы (тип узла 4). Свой-

ства горного массива заданы для средних значений физико-механических свойств слабо выветрелых коренных пород: плотность 2600 кг/м^3 , модуль Юнга $E = 15 \cdot 10^9 \text{ Па}$ и коэффициент Пуассона – 0.1.



*Рис. 2. Результаты оценки устойчивости склонов в виде фактора безопасности F /
Fig. 2. Results of slope stability assessment in the form of safety factor F*



*Рис. 3. Двумерная модель разреза для расчета колебаний массива
методом конечных элементов (МКЭ) /*

*Fig. 3. Two-dimensional model of the section for calculating rock mass vibrations
using the finite element method (FEM)*

Пространственная неоднородность сейсмических колебаний поверхности также может быть обусловлена и другими факторами, такими как направление прихода сейсмической волны и является важной характеристикой для расчета протяженных линейных объектов [Заалишвили и др., 2022]. В данном случае воздействия задавались в основание модели в горизонтальном направлении, моделируя вертикально

распространяющуюся SH-волну. Воздействие задавалось на нижнем втором слое узлов модели, нижние узлы закреплены в обоих направлениях, в соответствии с [Jeremić, 2006], в узлах на вертикальных границах модели задавалось демпфирование колебаний (предполагалось демпфирование по Рэлею). Внешнее воздействие задавалось в виде инструментальной акселерограммы Loma Prieta.

Далее приведены результаты расчетов в виде пиковых ускорений поверхности PGA вдоль расчетного профиля (рис. 4 в). Видна связь с высотой и углом наклона рельефа (рис. 4 а, б). Далее были построены соответствующие регрессионные выражения.

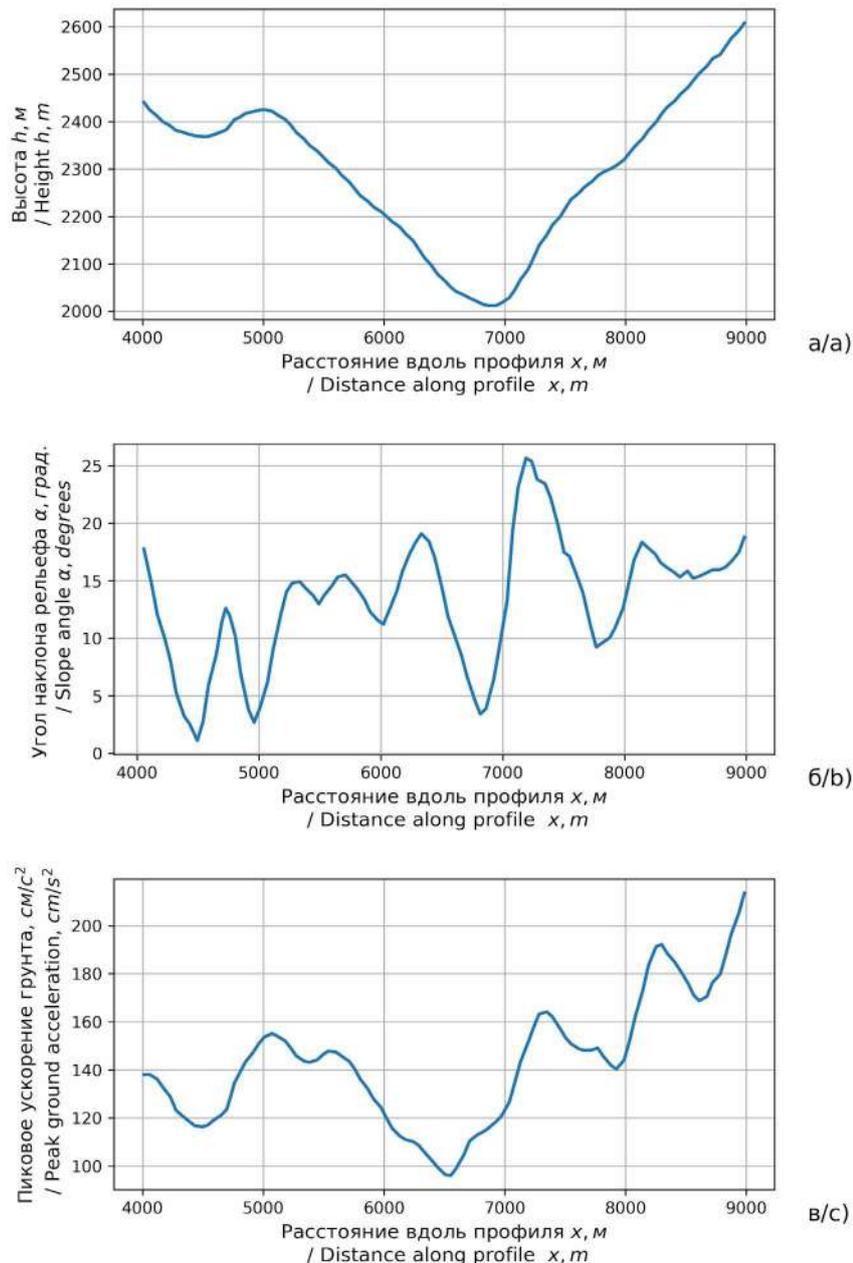


Рис. 4. Значения высот и углов наклона рельефа вдоль исследуемого профиля и соответствующие максимальные ускорения /

Fig. 4. Heights and angles of inclination of the relief along the profile under study and the corresponding peak ground accelerations

В результате получены следующие выражения (1) и (2) с соответствующими метриками (рис. 5):

$$\text{PGA} = 7.62 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha (h-h_0) + 113.71 \quad (1)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.69$

Среднее отклонение MAE = 11.83

Среднеквадратическое отклонение RMSE = 14.61

Критерий Фишера f-test = 209.67

p-уровень значимости p-value = $1.46 \cdot 10^{-25}$

$$\Delta I = 8.79 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha (h-h_0) - 0.028 \quad (2)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.66$

MAE = 0.12

RMSE = 0.15

Критерий Фишера f-test = 180.62

p-уровень значимости p-value = $1.63 \cdot 10^{-23}$

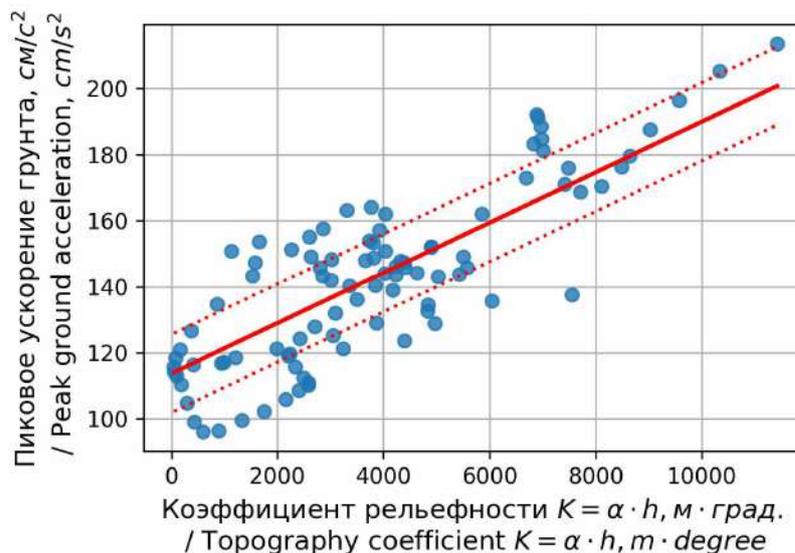


Рис. 5. Зависимость пикового ускорения от параметра $K = \alpha h$ /

Fig. 5. Variation of peak acceleration with $K = \alpha h$ parameter

Наибольшее значение коэффициента детерминации установлено для модели содержащей произведение относительной высоты и угла наклона рельефа, при значении параметра $h_0 = 2000$ м. Расчеты выполнялись для пиковых ускорений и приращений сейсмической интенсивности, предполагая увеличение амплитуды ускорений в два раза, соответствующим приращению на один балл.

Приращения сейсмической интенсивности, обусловленные влиянием рельефа, рассчитывались по формуле (2). Для оценки интегрального влияния обоих факторов рассмотрено произведение приращений сейсмической интенсивности и величины, обратной фактору безопасности (рис. 6). Даже без учета информационного слоя, содержащего геологическую информацию, выявилось маркирование оползневых и обвально-осыпных источников (рис. 6).

Сопоставление с базой данных по произошедшим на территории региона проявлениям опасных склоновых процессов позволит уточнить полученные закономерности и построить соответствующие регрессионные модели прогноза.

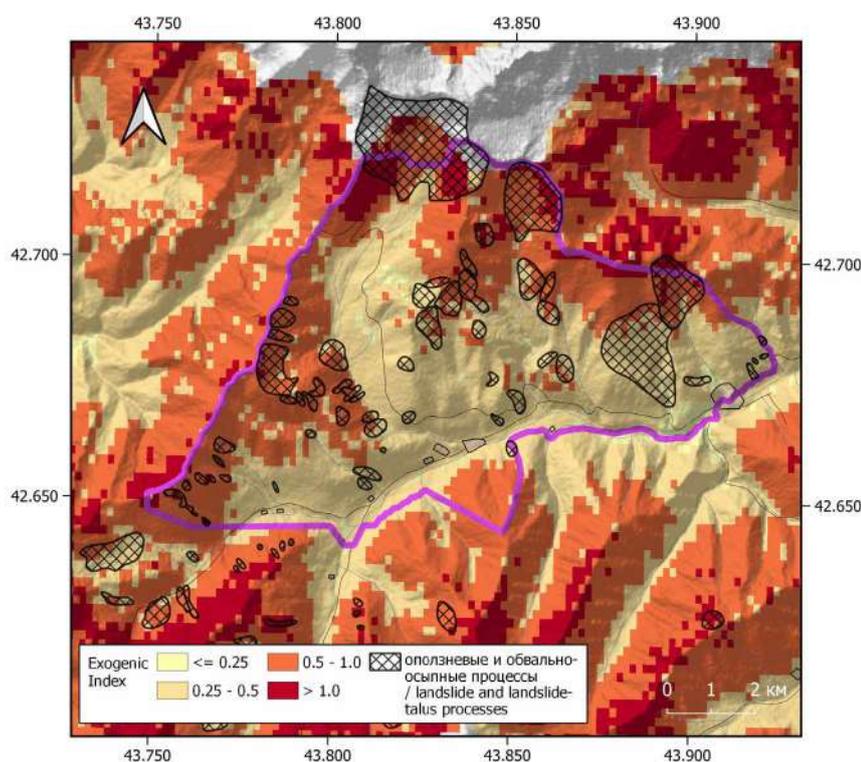


Рис. 6. Ранжирование территории по комплексному влиянию статических и динамических нагрузок на горный массив и развитие оползневых и обвально-осыпных процессов (обозначены штриховкой) /

Fig. 6. Ranking of the territory according to the complex influence of static and dynamic loads on the mountain range and the development of landslide and landslide-talus processes (indicated by shading)

Выводы

1. В связи со значительной массой смещаемого материала, склоновые процессы обладают огромной разрушительной силой и представляют большую опасность для транспортных и других объектов экономики. На примере рекреационного комплекса Мамисон исследовано влияние геоморфологических особенностей горного региона на интенсивность проявления опасных процессов.

2. Для оценки устойчивости склонов при статических и динамических нагрузках использован комплексный подход, включающий использование следующих подходов: математическое моделирование, численные эксперименты, регрессионный анализ натуральных и численных данных и разработка комплексной методики на основе ГИС технологий.

3. На основе данных космического зондирования Земли SRTM была создана цифровая модель рельефа (DEM) и выполнены расчеты устойчивости склонов методом Бишопа в программе Scoops3D, позволившие выявить участки ландшафта с низкой стабильностью, которые в дальнейшем должны быть исследованы более детально.

4. Выполнено моделирование колебаний скального массива методом конечных элементов (МКЭ) и установлена связь интенсивности колебаний поверхности скального массива с коэффициентом рельефности, равным произведению угла наклона рельефа на относительную высоту, и получены формулы для пиковых ускорений и приращений интенсивности.

5. Произведено ранжирование территории по комплексному влиянию статических и динамических нагрузок на массив и сопоставление с развитием оползневых и обвально-осыпных процессов.

6. Дальнейшее направление работ заключается в верификации выделенных участков, уточнении регрессионных соотношений и разработке вероятных сценариев, таких как эффекты различных режимов потока грунтовых вод и пространственные вариации свойств грунтовых материалов, перекрывающих скальный массив.

Литература

1. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: Пер. с англ. М.: Стройиздат. – 1982. – 448 с.
2. Габеева И.Л., Бурдзиева О.Г. Механизмы формирования интенсивности землетрясений в горных районах. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 53–56.
3. Заалишвили В.Б., Отинашвили М.Г., Тимченко И. Анализ сильных движений толщи грунта с использованием численных методов. // Теория сооружений и сейсмостойкость. – 2000. – № 1. – С. 67–71.
4. Заалишвили В.Б. Мельков Д.А., Отинашвили М.Г. Использование метода конечных элементов при оценке сейсмической опасности горных территорий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 49–52.
5. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука. – 2009. – 350 с.
6. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Комплексный анализ геологических данных и скоростной модели ММЗ на разрезах Центрального Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №4. – С. 52–67.
7. Заалишвили В.Б., Кануков А.С. Геоинформационные системы в геофизике. Практическая реализация геоинформационной системы с поддержкой моделирования последствий опасных природно-техногенных процессов. // В сборнике: Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. – 2019. – С. 374–383.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. Т. 12. № 1. – С. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
9. Кюль Е.В., Корчагина Е.А., Джаппуев Д.Р. Пространственные закономерности образования опасных экзогенных процессов. / Тематический том – Нальчик: КБНЦ РАН. 2019. 170 с.
10. 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. DOI: 10.33580/2541-9684-2021-85-2-48-54.
11. Папалашвили В.Г., Варазанашвили О.Ш., Гогмачадзе С.А., Заалишвили В.Б., Кипиани Д.Г., Махатадзе Л.Н., Мухадзе Т.И., Чачава Т.Н., Айвазишвили И.В. Рача-Джавское землетрясение 29 апреля 1991 г. // Землетрясения в СССР в 1991 г. ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. – М., 1997. – С. 18–25.
12. Пучков С. В., Гарагозов Д. Исследование влияния холмистого рельефа местности на интенсивность сейсмических колебаний при землетрясениях. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1973. – Выпуск 15. – С. 90–93.
13. Фоменко Н.Е. Комплексирование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях. / Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та. 2016. – 291с.
14. Чотчаев Х.О., Заалишвили В.Б., Невский Л.Н., Шемпелев А.Г. Геоморфология как

признак наследственности структурных особенностей земной коры. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №1. – С.141–158. DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20720.

15. Чотчаев Х.О., Оганесян С.М., Гончаренко О.А. Опасные геологические процессы на территориях экономического освоения в горной части Республики Северная Осетия – Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2017. – Т. 9. № 3(33). – С. 195–210. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210.

16. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геозекологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

17. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геозекологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.

18. Assimaki D., Kausel E., Gazetas G. Soil-dependent topographic effects: A case study from the 1999. // Athens earthquake, Earthq Spectra. – 2005. – Vol. 21. No. 4. – pp. 929–966.

19. Bard P.-Y. Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. // Geophysical Journal International. – 1982. – Vol. 72. Issue 3. – pp. 731–760.

20. Boore D.M. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. // Bulletin of the seismological Society of America. – 1972. – Vol. 62. No. 1. – pp. 275–284.

21. Bouchon M., Barker. J. Seismic response of a hill: the example of Tarzana, California. // Bulletin of the seismological Society of America. – 1996. – Vol. 86. – pp. 66–72.

22. Duncan J.M., Wright S.G. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. // Environmental Geology. – 1980. Vol. 16. – pp. 5–17.

23. Duncan J.M., Wright S.G. Soil Strength and Slope Stability. / New York, John Wiley & Sons. – 2005. – 312 p.

24. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R. et al., The Shuttle Radar Topography Mission. // Reviews of Geophysics. – 2007. – Vol. 45. Issue 2. DOI: 10.1029/2005RG000183.

25. Jeong S., Asimaki D., Dafni J., Wartman J. How topography-dependent are topographic effects? Complementary numerical modeling of centrifuge experiments. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2019. – Vol. 116. – pp. 654–667. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.10.028.

26. Jeremić B. HPC for NEES: Plastic Domain Decomposition Method. NEES Annual Meeting, Washington, District of Columbia, June 21-23, 2006.

27. Nagashima F., Kawase H., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J., Hayakawa T., Satoh T., Oshima M. Application of the H/V spectral ratios for earthquake ground motions and microtremors at K-NET sites in Tohoku region, Japan to delineate soil nonlinearity. // In: Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon. – 2012. P. 10.

28. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – pp. 2825–2830.

29. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Gravitational stability of three-dimensional stratovolcano edifices. // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – pp. 6043–6056.

30. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Henderson S.T. Scoops3D-software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape. Menlo Park: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. – 2015. – book 14. chap. A1. – 218 p. DOI: 10.3133/TM14A1

31. Shiyamalagowri G., Ganapathy P., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Partitioning around medoids approach application for computation of regional flood and landslide quantiles. // E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019). – 2020. – 02001. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702001.

32. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2019. – Vol. 9. No. 2. – pp 109–127. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31981.

33. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020a. – Vol. 913. – 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.

34. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Gabaraev A.F., Dzobelova L.V. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: luar case study. // E3S Web of Conferences. – 2020b. – Vol. 164. – 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401014.

References

1. Bathe K., Wilson E. Numerical methods of analysis and the finite element method: Transl. from English. Moscow. Stroyizdat. 1982. 448 p. (in Russ.)

2. Gabeeva I.L., Burdzieva O.G. Mechanisms of formation of earthquake intensity in mountainous areas. Earthquake-resistant construction. Safety of structures. 2008. No. 3. pp. 53–56. (in Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Otinashvili M.G., Timchenko I. Analysis of strong movements of soil thickness using numerical methods. Theory of structures and seismic resistance. 2000. No. 1. pp. 67–71. (in Russ.)

4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Otinashvili M.G. Using the finite element method in assessing the seismic hazard of mountain areas. Seismic Construction. Safety of structures. 2008. No. 3. pp. 49–52. (in Russ.)

5. Zaalishvili V.B. Seismic microzoning of the territories of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka. 2009. 350 p. (in Russ.)

6. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O. Complex analysis of geological data and MMS velocity model on sections of the Central Caucasus. Geology and geophysics of Russian South. 2016. No. 4. pp.52–67. (in Russ.)

7. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S. Geographic information systems in geophysics. Practical implementation of a geographic information system with support for modeling the consequences of hazardous natural and man-made processes. In: Hazardous natural and man-made processes in mountain regions: models, systems, technologies. 2019. pp. 374–383. (in Russ.)

8. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (in Russ.)

9. Kühl E.V., Korchagina E.A., Dzhappuev D.R. Spatial patterns of formation of dangerous exogenous processes. Thematic volume – Nalchik. Publishing house KBSC RAS. 2019. pp.14–17. (in Russ.)

10. Melkov D.A., Revazov M.O. Assessment of the potential landslide hazard of the territory of North Ossetia-Alania based on geomorphological and geological data. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2021. No. 2(85). pp. 48–54. DOI: 10.33580/2541-9684-2021-85-2-48-54. (in Russ.)

11. Papalashvili V.G., Varazanashvili O.Sh., Gogmachadze S.A., Zaalishvili V.B., Kipiani D.G., Makhatadze L.N., Mukhadze T.I., Chachava T.N., Aivazishvili I.V. Racha-Java earthquake of April 29. 1991. Earthquakes in the USSR in 1991. O.Yu. Schmidt RAS. Moscow. 1997. pp. 18–25.

12. Puchkov S.V., Garagozov D. Study of the influence of hilly terrain on the intensity of seismic vibrations during earthquakes. Questions of engineering seismology. 1973. Issue 15. pp. 90–93. (in Russ.)

13. Fomenko N.E. Integration of geophysical methods in engineering and environmental surveys. Textbook. Rostov-on-Don. Publishing house of the Southern Federal University. 2016. 291 p. (in Russ.)

14. Chotchaev Kh.O., Zaalishvili V.B., Nevsky L.N., Shempelev A.G. Geomorphology as a

sign of heredity of structural features of the earth's crust. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 1. pp. 141–158. DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20720. (in Russ.)

15. Chotchaev Kh.O., Oganessian S.M., Goncharenko O.A. Hazardous geological processes in the territories of economic development in the mountainous part of the Republic of North Ossetia – Alania. *Sustainable development of mountain territories*. 2017. Vol. 9 No. 3(33). pp. 195–210. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210. (in Russ.)

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

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

18. Assimaki D., Kausel E., Gazetas G. Soil-dependent topographic effects: A case study from the 1999. Athens earthquake, *Earthq Spectra*. 2005. Vol. 21. No. 4. pp. 929–966.

19. Bard P.-Y. Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. *Geophysical Journal International*. 1982. Vol. 72. Issue 3. pp. 731–760.

20. Boore D.M. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. *Bulletin of the seismological Society of America*. 1972. Vol. 62. No. 1. pp. 275–284.

21. Bouchon M., Barker. J. Seismic response of a hill: the example of Tarzana, California. *Bulletin of the seismological Society of America*. 1996. Vol. 86. pp. 66–72.

22. Duncan J.M., Wright S.G. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Environmental Geology*. 1980. Vol. 16. pp. 5–17.

23. Duncan J.M., Wright S.G. *Soil Strength and Slope Stability*. New York, John Wiley & Sons. 2005. 312 p.

24. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R. et al., The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*. 2007. Vol. 45. Issue 2. DOI: 10.1029/2005RG000183.

25. Jeong S., Asimaki D., Dafni J., Wartman J. How topography-dependent are topographic effects? Complementary numerical modeling of centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. Vol. 116. pp. 654–667. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.10.028.

26. Jeremić B. HPC for NEES: Plastic Domain Decomposition Method. NEES Annual Meeting, Washington, District of Columbia, June 21-23, 2006.

27. Nagashima F., Kawase H., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J., Hayakawa T., Satoh T., Oshima M. Application of the H/V spectral ratios for earthquake ground motions and microtremors at K-NET sites in Tohoku region, Japan to delineate soil nonlinearity. In: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon. 2012. P. 10.

28. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. pp. 2825–2830.

29. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Gravitational stability of three-dimensional stratovolcano edifices. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. pp. 6043–6056.

30. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Henderson S.T. Scoops3D-software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape. Menlo Park: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 2015. book 14. chap. A1. 218 p. DOI: 10.3133/TM14A1

31. Shiyamalagowri G., Ganapathy P., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Partitioning around medoids approach application for computation of regional flood and landslide quantiles. *E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019)*. 2020. 02001. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702001.

32. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 2. pp 109–127. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31981.

33. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020a. Vol. 913. 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.

34. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Gabaraev A.F., Dzobelova L.V. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: luar case study. E3S Web of Conferences. 2020b. Vol. 164. 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401014.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика; 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых; 1.6.6. Гидрогеология; 1.6.9. Геофизика; 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 1.6.20. Геоинформатика, картография; 1.6.21. Геоэкология; 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика; 2.8.8. Геотехнология, горные машины, а также смежных научных направлений.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3-5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20-25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, аннотации на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи. Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <http://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Вла-

дикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Аннотация с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (кегль 14 полужирный курсив, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки ответственного автора.

Аннотация должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то аннотация должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если рукопись подается на английском языке, необходимо привести также аннотацию на русском. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце аннотации обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \lg , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т. п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным

элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений ($MВт/см^2$) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюсти размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье (не по разделам!) и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате виде, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутоновых. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем – на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

The journal "Geology and Geophysics of the South of Russia" publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4. Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6. Hydrogeology; 1.6.9. Geophysics; 1.6.10. Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11. Geology, prospecting and exploration of oil and gas fields; 1.6.12. Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20. Geoinformatics, cartography; 1.6.21. Geoinformatics, cartography; 2.8.6. Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8. Geotechnology, mining machines, and related scientific areas.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal "Geology and Geophysics of the South of Russia" are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal "Geology and Geophysics of Russian South" publishes:

- articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;
- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal "Geology and Geophysics of Russian South".

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <http://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal "Geology and Geophysics of Russian South".

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),
- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames, academic degrees and titles (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site www.naukagor.ru (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols \lim , \lg , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and ν , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value

figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal “Geology and Geophysics of 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. 2023 г. Том 13)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 18.12.2023 г. Дата фактического выхода 25.12.2023 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 25,3.

Тираж 100 экз. Заказ № 162.

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