

ISSN 2221-3198

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 3 / 2024



ISSN 2221-3198  
e-ISSN 2686-7486

Геофизический институт Владикавказского научного центра  
Российской академии наук

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY AND  
GEOPHYSICS  
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 14  
№ 3 / 2024**

**Владикавказ 2024**

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

**Главный редактор**

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

**Заместитель главного редактора**

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

**Члены редакционной коллегии**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Ответственный секретарь**

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

**Выпускающий редактор**

д.г.-м.н., проф. **С.Г. Парада**

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

*Журнал включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus*

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

**Учредитель:**

**ВНЦ РАН**

Адрес учредителя:

363110, РСО-Алания, Пригородный район,

с. Михайловское, ул. Вильямса, 1

Тел.: 8(8672)726788

e-mail: info@vncran.ru

http://vncran.ru

**Издатель:**

**Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук**

Адрес издателя и редакции:

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

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

e-mail: southgeo@mail.ru

http://geosouth.ru

**ISSN 2221-3198**

**e-ISSN 2686-7486**

**Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119**

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2024

*Фото на обложке – Цейский ледник и вершина Ушлтата (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, 2024

*Cover photo – Tseyskiy glacier and Uilpata peak (K.S. Kharebov)*

## СОДЕРЖАНИЕ

===== ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ =====	
<b>Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Черкашин В.И., Каламыйцев В.В.</b> О каледонидах Кавказа .....	6
<b>Попов Ю.В., Пустовит О.Е.</b> Состав и условия образования серпентинитов Беденского массива (Большой Кавказ) .....	16
===== ГИДРОГЕОЛОГИЯ =====	
<b>Музаев И.Д.</b> Математическое моделирование селективных водозаборных процессов в двухслойном стратифицированном водоеме .....	29
===== ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА =====	
<b>Маневич А.И., Дзедобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Татаринев В.Н., Дзеранов Б.В., Заалишвили В.Б., Лосев И.В., Акматов Д.Ж., Шевчук Р.В., Габараев А.Ф.</b> Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга восточных ветвей Владикавказского разлома .....	41
===== ГЕОФИЗИКА =====	
<b>Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О.</b> Уравнения затухания сейсмической интенсивности .....	57
<b>Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Мкртчян М.А., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Карапетян Р.К., Мкртчян Г.А.</b> Разрядка сейсмотектонических напряжений Восточно-Турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. $M_w = 7.8$ как процесс деструкции геологической среды очаговой области .....	71
<b>Заалишвили В.Б., Голик В.И.</b> Геофизическое обеспечение горного производства .....	85
<b>Ekanem K.R., Inyang U.U., Okonna N.N.</b> Featural analysis, protective capacity and potential of shallow hydro-geological layers of densely populated residential area, Akwa Ibom State, Southern Nigeria .....	99
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ =====	
<b>Парада С.Г.</b> Чернореченское рудопроявление золота (Восточный Донбасс) .....	112
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ =====	
<b>Ахмедов К.С., Курбанов Я.М., Верисокин А.Е., Саидова К.М.</b> Моделирование оптимальных параметров, обеспечивающих эффективное глушение скважин в условиях аномально низких пластовых давлений .....	125
<b>Попков В.И., Попков И.В.</b> Региональные сдвиги и связанные с ними дислокации в осадочном чехле Скифско-Туранской плиты .....	136
===== ГЕОЭКОЛОГИЯ =====	
<b>Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б.</b> Рекреационное районирование Северо-Восточного Кавказа .....	148
<b>Зубков Е.А., Гогичев Р.Р., Тигиева З.В.</b> Оценка качества и степени защищенности подземных вод г. Владикавказ .....	163
<b>Каменецкий Е.С., Радионов А.А.</b> Математическое моделирование азродинамики идеализированных горных ущелий .....	174
<b>Комаров Р.С., Решетняк О.С.</b> Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани .....	191
<b>Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Мамадиев Н.А.</b> Биотрансформация углеводородов в составе нефтешлама (на примере объекта исторического загрязнения в Чеченской Республике) .....	204
<b>Матасова И.Ю., Яицкая Н.А., Модина М.А., Бригида В.С.</b> Трехмерные геоэкологические модели при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа .....	217
===== ГЕОИНФОРМАТИКА =====	
<b>Лагута А.А.</b> Моделирование отвесной стенки активного клифа по данным лидарной съемки (на примере Краснодарского водохранилища) .....	230
<b>Погорелов А.В., Липилин Д.А., Кузякина М.В.</b> О техногенной деградации речных систем в Восточном Приазовье: гидрографический аспект .....	243
===== ЮБИЛЕИ =====	
<b>Владислав Борисович Заалишвили</b> .....	260
<b>Юрий Константинович Чернов</b> .....	268

## CONTENTS

===== GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =====	
<b>Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Cherkashin V.I., Kalamytsev V.V.</b> About the caledonides of the Caucasus.....	6
<b>Popov Yu.V., Pustovit O.E.</b> Composition and formation conditions of serpentinites in the Beden massif (Greater Caucasus).....	16
===== HYDROGEOLOGY =====	
<b>Muzaev I.D.</b> Mathematical modeling of selective water intake processes in a two-layer stratified reservoir .....	29
===== GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =====	
<b>Manevich A.I., Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Dzeranov B.V., Zaalishvili V.B., Losev I.V., Akmatov D.Zh., Shevchuk R.V., Gabaraev A.F.</b> Development of the deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz fault .....	41
===== GEOPHYSICS =====	
<b>Aptikaev F.F., Erteleva O.O.</b> Attenuation curves of seismic intensity .....	57
<b>Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Mkrtchyan M.A., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Karapetyan R.K., Mkrtchyan G.A.</b> Release of seismotectonic stresses of the Eastern Turkey earthquake on 06 February 2023 $M_w = 7.8$ as a destruction process in focal area .....	71
<b>Zaalishvili V.B., Golik V.I.</b> Geophysical support of mining production .....	85
<b>Ekanem K.R., Inyang U.U., Okonna N.N.</b> Featural analysis, protective capacity and potential of shallow hydro-geological layers of densely populated residential area, Akwa Ibom State, Southern Nigeria .....	99
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY =====	
<b>Parada S.G.</b> Chernorechensk gold ore deposit (Eastern Donbass).....	112
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS =====	
<b>Ahmedov K.S., Kurbanov Ya.M., Verisokin A.E., Saidova K.M.</b> Modeling of optimal parameters that ensure the effective performance of well killing in conditions of abnormally low reservoir pressure .....	125
<b>Popkov V.I., Popkov I.V.</b> Regional shifts and related dislocations in the sedimentary cover of the Scythian-Turanian plate .....	136
===== GEOECOLOGY =====	
<b>Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B.</b> Recreational zoning of the North-Eastern Caucasus.....	148
<b>Zubkov E.A., Gogichev R.R., Tigieva Z.V.</b> Assessment of quality and degree of protection for groundwater in Vladikavkaz city .....	163
<b>Kamenetsky E.S., Radionoff A.A.</b> Numerical study of the idealized mountain gorges atmosphere .....	174
<b>Komarov R.S., Reshetnyak O.S.</b> Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin .....	191
<b>Markarova M.Yu., Makhmudova L.Sh., Mamadiev N.A.</b> The biotransformation of hydrocarbons in the composition of oil sludge (on the example of a historical pollution site in the Chechen Republic).....	204
<b>Matasova I.Yu., Yaitskaya N.A., Modina M.A., Brigida V.S.</b> Three-dimensional geoeological models in forecasting sea level on Black Sea coast of Caucasus .....	217
===== GEOINFORMATICS =====	
<b>Laguta A.A.</b> Modeling of a steep wall of an active cliff using LiDAR survey data (case study of the Krasnodar Reservoir).....	230
<b>Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kuzyakina M.V.</b> On technogenic degradation of river systems in the Eastern Azov region: hydrographic aspect.....	243
===== JUBILEES =====	
<b>Vladislav Borisovich Zaalishvili</b> .....	260
<b>Yurij Konstantinovich Chernov</b> .....	268

УДК 38.21.01:38.29.19

DOI: 10.46698/o8642-8939-9443-c

Оригинальная статья

## О каледонидах Кавказа

В.Л. Омельченко<sup>1</sup>, Г.В. Рябов<sup>2,3</sup>, В.И. Черкашин<sup>3</sup>, В.В. Каламыйцев<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
e-mail: georg.riabov@yandex.ru;

<sup>3</sup> Институт геологии ДФИЦ РАН, Россия, 367030, г. Махачкала,  
ул. М. Ярагского, 75, e-mail: dangeo@mail.ru

Статья поступила: 03.06.2024, доработана: 13.07.2024, принята к публикации: 17.07.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Исследователей Большого Кавказа всегда интересовала проблема взаимоотношений в регионе герцинских и более древних образований. Считается, что доказательства того, что герцинскому тектоно-магматическому циклу здесь предшествовал каледонский цикл, отсутствуют. Время формирования поздних каледонид частично совпадает со временем образования части ранних герцинид. Считается, что вследствие размытости этой границы все палеозойские фазы тектогенеза Большого Кавказа целесообразно объединять в виде каледоно-герцинской складчатости. **Цель работы.** Рассмотреть проблемы взаимоотношений комплексов пород, относящихся к классическим каледонидам Западной Европы, и синхронных им стратифицированных девонских образований Северного Кавказа. Показать возможные следы позднекаледонских событий на Северном Кавказе в девонское время. **Методы работы.** Для решения поставленной задачи были использованы опубликованные литературные источники по классическим каледонидам Западной и Центральной Европы, и на основе имеющегося материала произведен сравнительный анализ их с ниже-верхнедевонскими отложениями зоны Передового хребта Северного Кавказа. **Результаты работы.** Во время накопления каледонских (девонских) красноцветных моласс Западной Европы на Северном Кавказе периодически отлагались сходные обломочные породы – существенно кварцевые песчаники, нередко красноцветные, которые следует относить к позднекаледонским породам, в отличие от традиционного определения их как раннегерцинские образования. Судя по их литологии, песчаники относятся к краевой части эпиплатформенного бассейна. По сравнению с Волго-Уральским бассейном, где терригенно-карбонатное осадконакопление шло в эйфеле-нижнем фланге, формирование аналогичных толщ зоны Передового хребта происходило позже: в Картджуртской подзоне – с живетского века, а южнее, в Бескесско-Кольтюбинской и Кенделляр-Суарыкской подзонах – с нижнего фамена, притом, что стабилизация режима и переход его в субплатформенный, начиналась ещё раньше, даже в живете, с излияний субщелочных базальтов.

**Ключевые слова:** каледониды, герциниды, девон, Северный Кавказ, древние красные песчаники.

**Для цитирования:** Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Черкашин В.И., Каламыйцев В.В. О каледонидах Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 6-15. DOI: 10.46698/o8642-8939-9443-c

DOI: 10.46698/o8642-8939-9443-c

Original paper

## About the caledonides of the Caucasus

V.L. Omelchenko<sup>1</sup>, G.V. Ryabov<sup>2,3</sup>, V.I. Cherkashin<sup>3</sup>, V.V. Kalamytsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC "Sevkavgeologiya", 49 Popova Str., Essentuki 357000, Russian Federation,  
e-mail: vlomelchenko.geo@gmail.com;

<sup>2</sup> Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str.,  
Novocherkassk 346428, Russian Federation, e-mail: georg.riabov@yandex.ru;

<sup>3</sup> Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,  
75 M. Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, Russian Federation,  
e-mail: dangeo@mail.ru

Received: 03.06.2024, revised: 13.07.2024, accepted: 17.07.2024

**Abstract. Relevance.** Researchers of the Greater Caucasus have always been interested in the problem of relationships between the Hercynian and more ancient formations in the region. It is believed that there is no evidence that the Hercynian tectono-magmatic cycle was preceded by the Caledonian cycle here. The time of formation of the late Caledonides partially coincides with the time of formation of part of the early Hercynides. It is believed that due to the blurring of this boundary, it is advisable to combine all the Paleozoic phases of the tectogenesis of the Greater Caucasus in the form of the Caledonian-Hercynian folding. **Aim.** To consider the problems of relationships between rock complexes belonging to the classical Caledonides of Western Europe and the synchronous stratified Devonian formations of the North Caucasus. Demonstrate possible traces of Late Caledonian events in the North Caucasus in Devonian time. **Methods.** To solve the problem, published literary sources on the classical Caledonides of Western and Central Europe were used, and based on the available material, a comparative analysis of them with the Lower-Upper Devonian deposits of the Front Range of the North Caucasus was carried out. **Results.** During the accumulation of Caledonian (Devonian) red-colored molasse of Western Europe, similar clastic rocks were periodically deposited in the North Caucasus – essentially quartz sandstones, often red-colored, which should be classified as Late Caledonian rocks, in contrast to the traditional definition of them as Early Hercynian formations. Judging by their lithology, the sandstones belong to the marginal part of the epiplatform basin. Compared with the Volga-Ural basin, where terrigenous-carbonate sedimentation took place in the Eiffel-lower Fran, the formation of similar thicknesses of the zone of the Forward Ridge occurred later: in the Kartjurt subzone – from the Givetian century, and to the south, in the Beskessko-Koltyubinsk and Kendellar-Suaryk subzones – from the lower Famien, despite the fact that the stabilization of the regime and its transition to a sub-platform one began even earlier, even in life, with outpourings of subalkaline basalts.

**Keywords:** calenonids, hercynids, devonian, North Caucasus, ancient red sandstones.

**For citation:** Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Cherkashin V.I., Kalamytsev V.V. About the caledonides of the Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 6-15. DOI: 10.46698/o8642-8939-9443-c

## Введение

Проблема взаимоотношений герцинских и более древних образований Большого Кавказа всегда интересовала геологов, занимавшихся изучением его древнего ядра. Доказательства того, что герцинскому тектономагматическому циклу здесь

предшествовал каледонский цикл, отсутствуют. Формирование герцинид произошло в пределах сложно построенной, геодинамически неоднородной области океана Тетис – в период с силура-нижнего девона по нижний инд включительно.

Классические складчатые каледониды образовались в другой сходной области, на месте древних океанов Япетус и Реикум ([ru.wikipedia.org](http://ru.wikipedia.org)). Они известны по обе стороны Атлантики – в Скандинавии, Ньюфаундленде, Северных Аппалачах, и других местах. Складкообразование в каледонидах, по крайней мере в некоторых частях этих горных цепей, завершилось в конце силура, когда соединились древние континенты Балтика и Авалония (отколовшаяся от Гондваны), постепенно сомкнувшись с Лаврентией. В результате образовался материк, известный под названием Лавруссия.

Все раннекаледонские образования, включая эокембрийские, обычно принимаются как нижнепалеозойские. Позднекаледонские постскладчатые образования включают верхнесилурийские (пржидолские) и девонские породы. Как видно, время формирования поздних каледонид частично совпадает со временем образования части ранних герцинид. Считается, что вследствие размытости этой границы все палеозойские фазы тектогенеза Большого Кавказа целесообразно объединять в виде каледоно-герцинской складчатости [Белов, Омельченко, 1976; Баранов, Греков, 1980; Белов, 1981; Омельченко и др., 2017; Гиоргобиани, 2020]. Образования, синхронные ранним и поздним каледонидам, отлагались также и в платформенных условиях.

### Методы исследования

Целью этой работы является попытка показать возможные следы позднекаледонских событий в девоне Северокавказского региона.

Для решения поставленной задачи были использованы опубликованные литературные источники по классическим каледонидам Западной и Центральной Европы, и на основе имеющегося материала произведен сравнительный анализ их с нижневерхнедевонскими отложениями зоны Передового хребта Северного Кавказа. Для этого придется вкратце рассмотреть каледониды других территорий.

### *Ранние каледониды Западной и Центральной Европы*

*Нижний (складчатый) палеозой.* Как известно из геологической литературы, в Европе каледониды развиты в Скандинавии, Шотландии, в Брабантском массиве, по-видимому, в Рейнских сланцевых горах, Судетах, Словацком рудогорье и восточнее. В пределах российской части Средиземноморско-Альпийской складчатой области, в частности, Большого Кавказа, присутствие складчатых каледонид проблематично. M.G. Rutten [Rutten, 1969; Corfu et al., 2014; Schiffer et al., 2016] пишет, что в кембро-силуре констатируется «значительное различие между эпиконтинентальной серией, развитой вне пределов каледонид, и геосинклинальной серией, принадлежащей к складчатому поясу».

Считается, что в Скандинавии древнейшая история каледонид представлена позднекембрийскими (эокембрийскими «геосинклинальными») осадками, фаунистически неохарактеризованными (т. н. спарагмитовой серией). Три более моло-

дые системы, также отражающие доскладчатый период осадконакопления каледонид, объединялись под названием кембро-силура, который образован метаморфизованными обломочными породами с большим количеством вулканитов (тронхеймские вулканические фации) и тонкими прослоями известняков.

В зоне, охватывающей Арденны, Брабантский массив, Рейнские сланцевые горы, Саксонию и частично территорию Польши, развиты породы с признаками позднесилурийских-раннедевонских тектонических движений, которые обычно связывают с каледонской орогенцией. Главная фаза (арденнская по Г. Штилле) отмечена на рубеже силура и девона [Штилле, 1968].

В процессе главной фазы складчатости пояс был интенсивно деформирован с образованием многочисленных крупных покровов. В европейской части надвигание шло в основном на юго-восток, на Скандинавском полуострове внешние покровы перекрывают значительную часть Фенноскандского щита, оставшуюся стабильной.

Покровный комплекс верхних аллохтонов района Северной Норвегии содержит деформированный метабазитовый (амфиболитовый) комплекс ордовикских офиолитов [Cook et al., 1993].

*Нижний палеозой Восточно-Европейской платформы (ВЕП).* Нижний палеозой ВЕП представлен синкаледонскими эпиконтинентальными осадками, слагающими весь известный интервал кембро-силура до пржидола [Фокин, 1998]. Выделяется несколько областей (бассейнов), где сохранились эти отложения: Палеобалтийский с прилегающим к нему Приднестровским и Прикаспийский.

### ***Позднекаледонские квазиплатформенные каледониды***

*Западная Европа.* К концу силура орогенный этап вошёл в завершающую стадию и залегающие выше девонские осадки Западной Европы представляют собою типичную посторогенную фацию – молассовые «Древние красные песчаники» (ДКП – «old red»). Снос материала происходил с так называемого континента древнего (девонского) красного песчаника. Характерны отложения межгорных и предгорных бассейнов. Они нередко залегают на нижнепалеозойских платформенных толщах форланда. Внедрение позднеорогенных гранитов, частично совпадающее с молассообразованием, завершилось в большинстве районов к среднему девону. В раннем карбоне континент ДКП подвергся трансгрессии (бретонская фаза герцинского орогенеза).

Как отмечают Н. Н. Read, Janet Watson [Read, Watson, 1975] «на южной окраине Балтийского щита девонские отложения в фациях ДКП перемежаются с морскими породами, отлагавшимися в пределах Герцинского пояса».

*Девон Волго-Уральской области.* В девонское время территория Заволжья и Западного Приуралья относилась к так называемой раннегерцинской «миогеосинклинальной области» и западному форланду, представленному Русской плитой [Read, Watson, 1975]. Отложения этого возраста образуют комплекс, отличный от «эвгеосинклинального» (восточная часть, иногда, на всю ширину Урала).

Интересующие нас девонские песчаники описаны в работе Н.А. Михайловой [Михайлова, 1964]. Эти породы входят в состав толщи, относящейся к началу эйфеля-живету-нижнему франу. Они образовались в результате размыва выступов фун-

дамента Русской платформы. Обломочный материал из пород терригенной толщи девона однообразен. Главным его породообразующим минералом для всей терригенной толщи девона является кварц. Песчаниковые пласты и служат здесь основными нефтесодержащими породами. Породы фундамента – это различные гнейсы, гранито-гнейсы и граниты.

### *Каледоно-герцинские образования Северного Кавказа*

Сведения о нижнепалеозойской (додевонской) истории Северного Кавказа скудны и отрывочны. По представлениям А. А. Белова [Белов, 1981] каледонские движения хотя и имели место на Кавказе, однако, «они не привели к смене геосинклинальных условий орогенными». Однако, мы полагаем, что девонский каледонский орогенез, проявившийся даже в Восточной Европе, мог оставить следы и на Кавказе.

Отложения ниже-верхнедевонского возраста развиты в поверхностных выходах в двух тектоно-формационных зонах – Карачаево-Черкесской на севере и зоне Передового хребта на юге. О зоне Главного хребта следует говорить особо.

*Карачаево-Черкесская зона (КЧЗ).* В Хасаутской впадине КЧЗ породы древнего осадочного чехла развиты на ограниченной площади и представлены платформенными, а также субплатформенными отложениями. Самыми древними являются олигомиктовые песчаники терригенной урлешской свиты [Потапенко, 1982], иногда красноцветные (ордовик-нижний силур?), которые с размывом залегают на докембрийских (?) образованиях. Более молодые подразделения (нижний девон-эйфель) представлены известняково-терригенными отложениями (с кремнями), с прослоями кварцевых песчаников [Омельченко и др., 2023; Чегодаев и др., 2000].

*Зона Передового хребта (ЗПХ).* ЗПХ резко отличается от смежных зон. Здесь развиты преимущественно среднепалеозойские породы, образующие аккреционную призму, сложенную серией раннегерцинских покровных комплексов, запечатанных верхнепалеозойскими-нижнеиндскими молассами. Нижний-средний девон Передового хребта представлен вулканогенными и вулкано-терригенными породами в океанической и островодужной фациях. Верхнедевонские терригенно-карбонатные породы развиты в двух покровных комплексах – Кизилкольском (верхняя часть карачаевской серии) и выделенном недавно Лабино-Зараусском. Наибольшим распространением они пользуются во втором из них, где преобладают в разрезе нескольких стратиграфических подразделений.

*Латеральная зональность Передового хребта.* В соответствии с принятой корреляционной стратиграфической схемой девонских отложений Северного Кавказа Л.Д. Чегодаева и др. [Чегодаев и др., 2000] с учётом латеральной литологической неоднородности в пределах ЗПХ выделено несколько продольных подзон (палеоподзон): Картджуртская, Бескесско-Кольтюбинская, Кенделляр-Суарыкская, Абишерская (Джентинская). Наиболее полные разрезы верхнедевонских карбонатно-терригенных пород наблюдаются во второй и третьей из них. Рассматриваемый здесь интервал приходится на часть фаменского яруса.

В Бескесско-Кольтюбинской подзоне выделены три свиты (снизу-вверх): дженатитская (известняково-песчаниковая), ужумская (существенно известняковая), вол-

чинская (алевролитово-известковистая). В Кенделляр-Суарыкской подзоне, выделены три свиты (снизу-вверх): гаралыкайская (известняково-алевролитово-песчаниковая), чиммуллярская (существенно известняковая), колсуйская (песчаниково-алевролитово-известковистая).

*Литология дженаитской – гаралыкайской свит.* Эти свиты (нижний-средний фамен) представляют для нас наибольший интерес. В их составе характерным маркирующим литологическим элементом служат анхимонокварцевые песчаники.

*Дженаитская свита* выделяется по резкой смене подстилающих зеленокаменных метаконгломератов (семиродниковская свита) терригенными и известковистыми осадками. Мощность её пород составляет от 50–70 м до 250 м. Преобладающими в её разрезе являются олигомиктовые, существенно-кварцевые, или анхимонокварцевые, песчаники. В них присутствуют прослои известняков, известковистых песчаников или песчаных известняков. Характерной особенностью некоторой части терригенных пород является их красноцветная окраска, делающая их похожими на отложения верхней герцинской молассы.

Микроструктура анхимонокварцевых песчаников псаммитовая, цемент либо базальный соприкосновения, либо его просто нет. Обломки размером до 2 мм, хорошей или средней окатанности, представлены преимущественно кварцем, иногда – кварцем с вростками плагиоклаза, редко – плагиоклазом. Изучение положения галек в конгломератах свиты, проведенное И.И. Грековым, В.А. Снежко и С.П. Момотом, показывает их южный наклон, что свидетельствует о сносе их с севера.

*Гаралыкайская свита* располагается в пределах соседней Кенделляр-Суарыкской подзоны. Здесь в основании свиты четко выделяется 50-метровый слой светлых (до белого цвета) или даже красноцветных кварцевых песчаников, переслаивающихся с серыми песчаниками и алевролитами. Остальная часть разреза (70 м) складывается, главным образом, серыми с зеленоватым оттенком песчаниками («наждачными»). В более западных участках подзоны встречаются прослои алевролитов, кварцевых конгломератов, известняков.

Севернее пос. Архыз в нижней части свиты откартирована 10–15-метровая пачка красноцветных монокварцевых песчаников, аналогичных дженаитским, с многочисленными метаморфогенными кварцевыми жилками. Мощность свиты здесь достигает 300 м.

Под микроскопом нами изучались существенно кварцевые песчаники гаралыкайской свиты, в том числе и «наждачные». В отличие от дженаитских размер обломочков в них меньше – 0,2–0,4 мм, резко преобладают кварцевые фрагменты, редко встречались обломки плагиоклаза.

*Условия формирования терригенных пород девона ЗПХ.* Из предшествующего описания видно, что глубины области осадконакопления увеличивались в южном направлении при удалении от области сноса обломочного материала. В результате многократного перемыва и переотложения обломков сиалических пород, коренные выходы которых расположены на значительном удалении, формировались прослои существенно кварцевых и кварцитовидных песчаников. Возможно, область питания, представляла собою выступ пород фундамента платформы, как это имеет место в девоне (эйфель-фран) Волго-Уральской области (Волжско-Сарматский палео-

чит). В нашем случае она характеризовалась резко континентальными условиями с глубокой эрозией вследствие интенсивного выветривания и находилась намного севернее области осадконакопления.

Как указывают Reineck H.E. and Singh L.B [Reineck, Singh, 1973], при переносе ветром обломочный материал 1-2 мм транспортируется волочением и сальтацией и этот тип перемещения частиц характеризуется большей степенью сепарации осадков и окатанности их частиц. Этим и объясняется присутствие анхимонокварцевых песчаников в разрезе свит. Чередование красноцветных и светлых разностей свидетельствует о смене мелководных лагунных условий более глубоководными, присутствие известняков, по-видимому, связано с затоплением области сноса или изменением направления господствующих ветров.

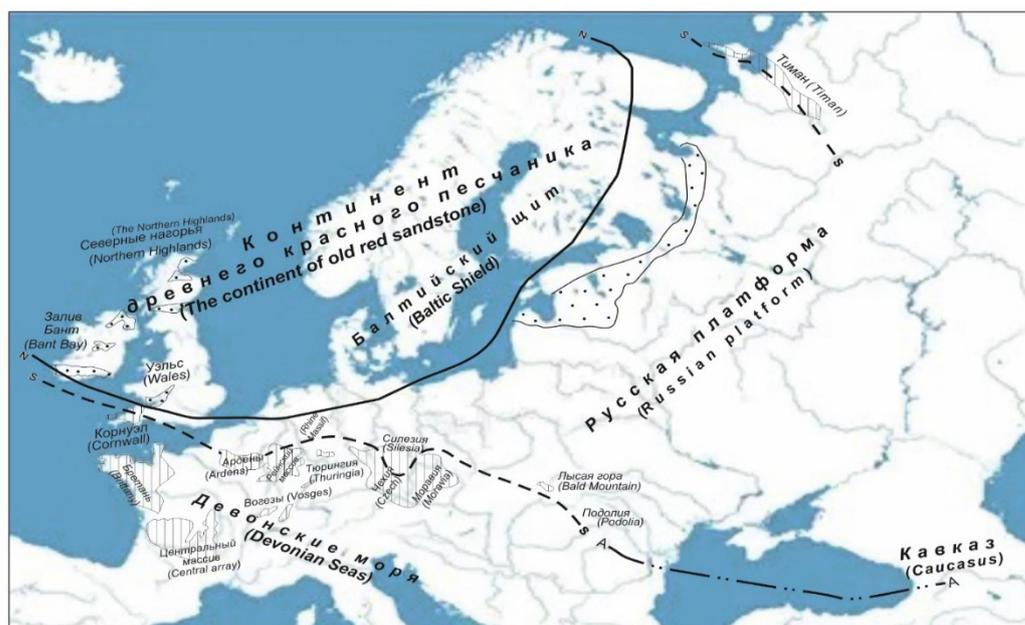
*Зона Главного хребта.* Имеются сведения о палеозойском возрасте пород некоторых комплексов Главного хребта. Так, работы М.Л. Сомина [Сомин, 2007а; Сомин 2007б; Somin, 2011] по уран-свинцовому датированию циркона кристаллических пород привели его к выводу о том, что протопороды гондарайского и макерского комплексов следует относить к кембрию-ордовики-лландовери, т.е. к каледонской части единого каледоно-герцинского цикла.

### Результаты исследования и их обсуждение

Как было показано выше, девонские образования в области развития классических каледонид относятся к квазиплатформенным отложениям, среди которых выделяются древние красные песчаники (ДКП). Наиболее богатая информация о стратиграфии девона Кавказа касается ЗПХ, где развиты осадки, по возрасту сопоставимые с поздними каледонидами, и которые, судя по их литологии, относятся к краевой части эпиплатформенного бассейна. По сравнению с Волго-Уральским бассейном, где терригенно-карбонатное осадконакопление шло в эйфеле-нижнем фране, формирование аналогичных толщ зоны Передового хребта происходило позже: в Картджуртской подзоне – с живетского века, а южнее, в Бескесско-Кольтюбинской и Кенделляр-Суарыкской подзонах – с нижнего фамена, притом, что стабилизация режима и переход его в субплатформенный, начиналась ещё раньше, даже в живете, с излияний субщелочных базальтов.

Но, в ЗПХ девонские и турнейские породы традиционно определяются как раннегерцинские (среднепалеозойские). В разрезе верхнего девона чётко выделяются существенно кварцевые песчаники, нередко красноцветные, чем они внешне близки к «древним красным песчаникам», отличаясь от них почти полным отсутствием кластогенного мусковита. Выступ пород, поставивший обломочный материал, находился на достаточном удалении от бассейна, чем и объясняется высокая зрелость псаммитов.

В монографии М. Жинью [Жинью, 1952] на схематической карте показана южная граница распространения прослоев ДКП в морском девоне Средней и частично – Восточной Европы (рис. 1). Она имеет примерное простирание  $290-110^{\circ}$ , вытягиваясь от Арденн, через Гарц-Чехию-Свентокшиские горы-Галицию-Подолию, при незамкнутом контуре на востоке. Это может указывать на вероятность продолжения на восток морского бассейна, имевшего связь с бассейном, где отлагались каледонские красноцветы.



Условные обозначения / Symbols



- 1 - главные современные выходы древнего красного песчаника (М.Жинью, 1952) / the main modern outcrops of old red sandstone;
- 2 - герцинские массивы (морской девон) (М.Жинью, 1952) / Hercynian massifs (marine Devonian);
- 3 - N-N - северная граница морских трансгрессий на континент древнего красного песчаника (М.Жинью, 1952) / N-N northern boundary of marine transgressions to the continent of old red sandstone;
- 4 - S-S - южная граница распространения прослоев древнего красного песчаника в морском девоне Средней Европы (М.Жинью, 1952) / S-S the southern boundary of the distribution of old red sandstone interlayers in the marine Devonian of Central Europe;
- 5 - A-A - южная граница распространения прослоев древнего красного песчаника в морском девоне Юго-Восточной Европы (авторы) / A-A southern the boundary of the distribution of layers of old red sandstone in the marine Devonian of Southeastern Europe (autors).

Рис. 1. Схематическая карта континента древнего красного песчаника и окаймляющей его зоны (М. Жинью, 1952) /

Fig. 1. Schematic map of the ancient red sandstone continent and the zone bordering it (M. Gignoux, 1952)

## Выводы

Во время накопления каледонских (девонских) красноцветных моласс Западной Европы на Северном Кавказе периодически отлагались сходные обломочные породы – существенно кварцевые, нередко красноцветные, песчаники, которые следует относить к позднекаледонским породам, в отличие от традиционного определения их как раннегерцинские образования.

Их источником мог служить Волжско-Сарматский палеоцит в своей южной части, хотя не исключён другой вариант.

## Литература

1. Баранов Г.И., Греков И.И. Доверхнепалеозойская структура Северного Кавказа. // В сб. «Тектоника Средиземноморского пояса». М.: Наука, 1980. – С. 162–171.
2. Белов А.А. Тектоническое развитие Альпийской складчатой области в палеозое. Вып. 347. М.: Наука, 1981. – 212 с.

3. Белов А.А., Омельченко В.Л. Офиолиты в структуре Марухского покрова и некоторые вопросы стратиграфии и магматизма палеозоя Передового хребта Северного Кавказа. // Геотектоника. – 1976. – № 2. – С. 44–56.
4. Гиоргобиани Т.В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 1. – С. 35–42.
5. Жинью М. Стратиграфическая геология. М.: Изд-во иностранной литературы, 1952. – 638 с.
6. Михайлова Н.А. Характеристика кварца терригенной толщи девона и возможных источников его сноса. М.: Наука, 1964. – 71 с.
7. Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Исаев В.С. Тектоника и история развития зоны Передового хребта. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 1. – С. 40–56.
8. Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Черкашин В.И. О месте пород тоханской серии в структуре зоны Передового хребта Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 6–16.
9. Потапенко Ю.Я. Стратиграфия и структура додевонских комплексов Северного Кавказа. Тбилиси: Мецниереба, 1982. – 169 с.
10. Сомин М.Л. Главные черты строения доальпийского основания Большого Кавказа. // Комплексы горных пород и геодинамика главных этапов развития Большого Кавказа. Гл. I. М.: ГЕОС, – 2007а. С. 10–52.
11. Сомин М.Л. Структурная позиция и геодинамические условия формирования метаморфических комплексов Большого Кавказа и Кубы: автореф. дис. д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.01 / Сомин Марк Львович. – М.: МГУ, 2007б. – 56 с.
12. Фокин П.А. Раннегерцинский этап развития Восточно-Европейской платформы: палеогеография и палеотектоника: автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук: 04.00.04 / Фокин Павел Анатольевич. – М.: МГУ, 1998. – 34 с.
13. Чегодаев Л.Д., Греков И.И., Омельченко В.Л. Региональная стратиграфическая схема девонских отложений Северного Кавказа. Ессентуки: Кавказгеолсъемка, 2000. – 87 с.
14. Штилле Г.В. Ассинтская тектоника в геологическом облике Земли. Т. 11. / Под редакцией А.А. Богданов, В.Е. Хаин. – М.: Мир, 1968. – 255 с.
15. Cook N.J., Halls C., Boile A.P. Deformation and metamorphism of massive sulphides at Sulitjelma, Norway. // Mineralogical Magazine. – 1993. – Vol. 57. – pp. 67–91.
16. Corfu F., Andersen T.B., Gasser D. Scandinavian Caledonides: main features, conceptual achievements and critical issues. New views on the Caledonides of Scandinavia and related areas. // Geological Society. – 2014. – Special Publications. – Vol. 390. – pp. 9–43.
17. Read H.H., Watson J. Earth history P. 2. Later stages of Earth History. London, 1975. – 408. p.
18. Reineck H.E., Singh L.B. Depositional Sedimentary Environments — with Reference to Terrigenous Clastics. Berlin: Springer-Verlag, 1973. – 439 p.
19. Rutten M.G. The geology of Western Europe. Amsterdam London New York: Elsevier publishing company, 1969. – 548 p.
20. Somin M.L. Pre-Jurassic basement of the Greater Caucasus: brief overview. // Turkish Journal Earth Science. – 2011. – pp. 545–610.
21. Schiffer Ch., Balling N., Ebbing J., Holm Jacobsen B., Nielsen S.B. Geophysical and petrological modeling of the East Greenland Caledonides – isostatic support of the Earth's crust and upper mantle. // Tectonophysics. – 2016. – Vol. 692. – pp. 44–57.

## References

1. Baranov G.I., Grekov I.I. Pre-Upper Paleozoic structure of the North Caucasus. In: Proc. Tectonics of the Mediterranean Belt. Moscow. Nauka. 1980. pp. 162–171. (In Russ.)
2. Belov A.A. Tectonic development of the Alpine folded region in the Paleozoic. Issue 347. Moscow. Nauka. 1981. 212 p. (In Russ.)

3. Belov A.A., Omelchenko V.L. Ophiolites in the structure of the Marukh cover and some issues of stratigraphy and magmatism of the Paleozoic of the Peredovoi Ridge of the North Caucasus. *Geotectonics*. 1976. No. 2. pp. 44–56. (In Russ.)
4. Giorgobiani T.V. Stages, mechanism and geodynamics of formation of the folded system of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 35–42. (In Russ.)
5. Gignoux M. *Stratigraphic Geology*. Moscow. Publishing house Foreign Literature. 1952. 638 p. (In Russ.)
6. Mikhailova N.A. Characterization of quartz of Devonian terrigenous strata and possible sources of its drift. Moscow. Nauka. 1964. 71 p. (In Russ.)
7. Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Isaev V.S. Tectonics and geologic history of front range zone of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. Vol. 1. pp. 40–56. (In Russ.)
8. Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. On the place of rocks of the Tokhanian series in the structural zone of the peredovoi ridge of the North Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 6–16. (In Russ.)
9. Potapenko Y.Ya. Stratigraphy and structure of the pre-Devonian complexes of the North Caucasus. Tbilisi. Metsniereba. 1982. 169 p. (In Russ.)
10. Somin M.L. 2007. The main features of the structure of the pre-Alpine base of the Greater Caucasus. Rock complexes and geodynamics of the main stages of the development of the Greater Caucasus. Ch. I. Moscow. GEOS. pp. 10–52. (In Russ.)
11. Somin M.L. Structural position and geodynamic conditions for the formation of metamorphic complexes of the Greater Caucasus and Cuba. The abstract of the dissertation of Dr. geol.-mineral. science. 25.00.01. Moscow. MSU. 2007. 56 p. (In Russ.)
12. Fokin P.A. Early hercynian stage of the East European platform development: paleogeography and paleotectonics. The abstract of the dissertation of Cand. geol.-mineral. sciences. 04.00.04. Moscow. MSU. 1998. 34 p. (In Russ.)
13. Chegodaev L.D., Grekov I.I., Omelchenko V.L. Regional stratigraphic scheme of Devonian deposits of the North Caucasus. Essentuki. Kavkazgeolsemka. 2000. 87 p. (In Russ.)
14. Stille G.V. Assint tectonics in the geological appearance of the Earth. Vol. 11. Eds. A.A. Bogdanov, V.E. Khain. Moscow. Mir. 1968. 255 p. (In Russ.)
15. Cook N.J., Halls C., Boile A.P. Deformation and metamorphism of massive sulphides at Sulitjelma, Norway. *Mineralogical Magazine*. 1993. Vol. 57. pp. 67–91.
16. Corfu F., Andersen T.B., Gasser D. Scandinavian Caledonides: main features, conceptual achievements and critical issues. New views on the Caledonides of Scandinavia and related areas. Geological Society. 2014. Special Publications. Vol. 390. pp. 9–43.
17. Read H.H., Watson J. Earth history P. 2. Later stages of Earth History. London. 1975. 408 p.
18. Reineck H.E., Singh L.B. *Depositional Sedimentary Environments — with Reference to Terrigenous Clastics*. Berlin: Springer-Verlag. 1973. 439 p.
19. Rutten M.G. *The geology of Western Europe*. Amsterdam London New York: Elsevier publishing company. 1969. 548 p.
20. Somin M.L. Pre-Jurassic basement of the Greater Caucasus: brief overview. *Turkish Journal Earth Science*. 2011. pp. 545–610.
21. Schiffer Ch., Balling N., Ebbing J., Holm Jacobsen B., Nielsen S.B. Geophysical and petrological modeling of the East Greenland Caledonides – isostatic support of the Earth’s crust and upper mantle. *Tectonophysics*. 2016. Vol. 692. pp. 44–57.

УДК 552.47+551.243.4 (470.621)  
DOI: 10.46698/i7322-1725-9429-t

Оригинальная статья

## Состав и условия образования серпентинитов Беденского массива (Большой Кавказ)

Ю.В. Попов<sup>1</sup>, О.Е. Пустовит<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40,  
e-mail: popov@sfedu.ru;

<sup>2</sup> ООО «ПИК Атлас», Россия, 344018, г. Ростов-на-Дону, ул. Текучева, д. 246

Статья поступила: 06.08.2024, доработана: 30.08.2024, принята к публикации: 13.09.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Относимые к беденскому комплексу серпентиниты тектонической зоны Передового хребта Большого Кавказа достаточно слабо охарактеризованы результатами прецизионных инструментальных исследований. Их отсутствие не позволяет уверенно реконструировать формационную и геодинамическую принадлежность мантийного протолита, что, в свою очередь, осложняет анализ факторов металлогенической социализации комплекса. **Цель работы** – получение новых данных о минералого-геохимических особенностях серпентинитов Беденского массива и на их основе реконструкция петрогенетических особенностей и геодинамической принадлежности апогипербазитов. **Методы исследования.** Рентгенофазовый анализ, синхронный термический анализ, электронно-зондовый микроанализ и электронная микроскопия, элементный анализ состава серпентинитов (в том числе определение содержаний элементов платиновой группы и редкоземельных элементов) методами ICP-MS. **Результаты работы.** Серпентиниты Беденского массива представлены хризотил-лизардитовыми и хризотил-антигоритовыми разновидностями, местами содержащими хризотил-асбестовую прожилковую или сетчатую минерализацию. Акцессорные хромшпинелиды представлены зональными зернами алюмохромитов с феррихромитовыми оторочками и хорошо развитыми магнетитовыми каймами, реже группами более крупных (первые мм) зерен хромитового состава. Для алюмохромитовых ядер значение Cr# составляет 0,68 – 0,72 (среднее значение ~ 0,70); Mg# 0,34 – 0,51 (среднее значение ~ 0,42); содержание TiO<sub>2</sub> – от 0,05 до 0,22 мас.%. Хромитовые зерна имеют следующие характеристики состава: Cr# 0,76-0,80; Mg # 0,55-0,67; содержание TiO<sub>2</sub> 0,09 – 0,18%. Типохимические особенности хромшпинелидов указывают на принадлежность протолита к ультрабазитам супрасубдукционных геодинамических обстановок (SSZ) и деплитированным субстратам, свойственным преддуговым перидотитам. Отношение Cr# – TiO<sub>2</sub> указывает на соответствие составам, характерным для условий реакции бонинитовых расплавов с породами мантии. Распределение REE характеризуется обеднением тяжелыми REE и сходно с установленным для перидотитов Карабашского массива Урала. Метаморфогенно-гидротермальная минерализация в серпентинитах содержит самородный осмий. В образце с хромитовой минерализацией отмечено содержание Pd до 0,050 ppm, Au до 0,013 ppm.

**Ключевые слова:** Беденский массив, серпентинит, хромшпинелиды, офиолиты.

**Для цитирования:** Попов Ю.В., Пустовит О.Е. Состав и условия образования серпентинитов Беденского массива (Большой Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 16-28. DOI: 10.46698/i7322-1725-9429-t

DOI: 10.46698/i7322-1725-9429-t

Original paper

# Composition and formation conditions of serpentinites in the Beden massif (Greater Caucasus)

Yu.V. Popov <sup>1</sup>, O.E. Pustovit <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southern Federal University, 40 R. Zorge Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation,  
e-mail: popov@sfedu.ru;

<sup>2</sup> PIK Atlas Ltd, 246 Tekucheva Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation

Received: 06.08.2024, revised: 30.08.2024, accepted: 13.09.2024

**Abstract: Relevance.** Serpentine rocks associated with the Beden complex in the tectonic zone of the Greater Caucasus Peredovoy Ridge have been insufficiently characterized by the results of high-precision instrumental studies. The lack of such data hinders the reliable reconstruction of the protolith's formation and geodynamic setting, thus complicating the analysis of factors influencing the metallogenic socialization of the complex. **The aim of the study** is to obtain new data on the mineralogical and geochemical characteristics of serpentinites from the Beden Massif, and based on this data, to reconstruct the petrogenetic features and geodynamic setting of the apohyperbasites. **Research Methods.** X-ray diffraction analysis, synchronous thermal analysis, electron probe microanalysis, electron microscopy and elemental analysis of the serpentinites (including the determination of platinum group elements and rare earth elements) was carried out using ICP-MS. **Results.** Serpentine rocks from the Beden massif are represented by chrysotile-lizardite and chrysotile-antigorite varieties, partially containing chrysotile-asbestos vein or mesh mineralization. Accessory chromites occur as zoned grains of alu-mochromite with ferrichromite rims and well-developed magnetite fringes, less often, groups of larger grains of chromite composition. Alu-mochromite cores exhibit Cr# values of 0.68 – 0.72 (average ~ 0.70), Mg# values of 0.34 – 0.51 (average ~ 0.42), and TiO<sub>2</sub> content ranging from 0.05 to 0.22 wt %. Chromite grains are characterized by Cr# values of 0.76-0.80, Mg# values of 0.55-0.67, and TiO<sub>2</sub> content ranging from 0.09 – 0.18 wt%. The typochemical features of chromites indicate a protolith belonging to ultramafic rocks of supra-subduction zone (SSZ) geodynamic settings and depleted substrates typical of fore-arc peridotites. The Cr# – TiO<sub>2</sub> ratio suggests compositions characteristic of boninite melt-mantle rock reaction conditions. The REE distribution exhibits a depletion in heavy REEs and is similar to the one observed in peridotites of the Karabash Massif, Ural Mountains. Metamorphic-hydrothermal mineralization in the serpentinites contains native osmium. A sample with chromite mineralization exhibited Pd content up to 0.050 ppm and Au up to 0.013 ppm.

**Keywords:** Beden massif, serpentinite, chrome spinels, ophiolites.

**For citation:** Popov Yu.V., Pustovit O.E. Composition and formation conditions of serpentinites in the Beden massif (Greater Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(3): 16-28. DOI: 10.46698/i7322-1725-9429-t

## Введение

В тектоно-формационной зоне Передового хребта Большого Кавказа среди герцинических комплексов широко представлены апогипербазитовые тела разного размера, приуроченные к ограничивающим блокам кристаллических пород разломам или к границам пластин тектонических покровов. Слагающие их породы практически нацело серпентинизированы и сильно тектонически деформированы, что значи-

тельно осложняет реконструкцию состава протолита, а, следовательно, и интерпретации формационной и геодинамической приуроченности ультрабазитов.

Такие серпентинитовые тела отнесены к беденскому комплексу, их состав пород, охарактеризованный на основании данных оптической петрографии, долгое время определялся как однотипный хризотил-антигоритовый, а сведения об акцессорных минералах ограничивались общими данными о принадлежности к группе минералов без детализации их химического состава и типоморфных особенностей [Соболев, 1952 и др.]. Применение современных прецизионных инструментальных методов выявило, напротив, значимые различия в составе породообразующих минеральных ассоциаций серпентинитов из разных выходов, признаки стадийной эволюции акцессорных хромшпинелидов [Попов и др., 2022a], что дает основание для обсуждения генезиса пород, установления природы их мантийного протолита и геодинамической типизации разных массивов.

Объектом рассмотрения в настоящей статье является Беденский серпентинитовый массив – наиболее крупное (на поверхности площадью порядка 8 км<sup>2</sup>) в зоне Передового хребта апогипербазитовое тело, относимое к беденскому комплексу. Приурочен этот массив к северному флангу Передового хребта, контролируемому зоной регионального Северного разлома, и представляет собой тектоническую пластину мощностью около 1000 м. С севера серпентиниты тектонически контактируют с кристаллическими породами Бескесского выступа (сложенного нижнепалеозойскими гранитоидами и более древними кристаллическими сланцами), на юге – со среднепалеозойскими породами Урупско-Тоханского комплекса (Тоханский тектонический покров). В бортах долины р. Большая Лаба серпентиниты перекрываются трансгрессивно залегающими ниже-среднеюрскими отложениями.

Интерес к этому массиву обусловлен также и обсуждаемыми перспективами его платиноносности, положительный прогноз которой основывается на присутствии минералов платиновой группы в шлиховых пробах (в которых установлен рутениридосмин), результатах литохимического опробования коренных пород и вторичных ореолов рассеяния в пределах серпентинитового массива [Богуш и др., 2016; Parada et al., 2014].

### Материалы и методы исследования

Состав породообразующих и второстепенных минералов серпентинитов определен методами рентгенофазового анализа на дифрактометре «ARLX'TRA»; использовано характеристическое излучение медного анода (длины волн  $\text{CuK}\alpha_1$  1,5406 Å,  $\text{CuK}\alpha_2$  1,5444 Å). Идентификация проводилась с использованием рентгенографической базы PDF-2. Учитывая наложение ряда рефлексов серпентинитов в полиминеральных породах рентгенографическая идентификация минеральных фаз дополнена исследованиями методом синхронного термического анализа, выполненными на установке NETZSCH STA 449C «Jupiter» в воздушной атмосфере при скорости нагрева 10 К/мин в корундовых тиглях. Изучение микроструктурных особенностей серпентинитов, внутреннего строения и элементного состава акцессорных хромшпинелидов проводилось электронно-зондовыми методами на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU, оснащенный системами EDX INCA Energy 450/XT и WDX INCA Wave 700 производства фирмы OXFORD Instruments Analytical. Такой комплекс исследований обеспечивает не только достаточно высокую информативность, но и сопоставимость с ранее опубликованными результа-

тами исследований апогипербазитов других массивов [Попов и др., 2022а; Попов и др., 2022б и др.].

Для двух образцов серпентинитов проведено определение содержаний элементов платиновой группы, золота и редкоземельных элементов методами масс-спектрометрии квадрупольными масс-спектрометрами с индуктивно-связанной плазмой ELAN-DRC-е фирмы «Perkin Elmer».

Основной объем исследований выполнен в Центре исследований минерального сырья и состояния окружающей среды Южного федерального университета.

### Результаты исследований и их обсуждение

Серпентиниты Беденского массива внешне разнообразны: цвет меняется от черного до желтовато-зеленого, породы в разной степени тектонизированы (что определяет широкое развитие пластинчато-полосчатой текстуры) и переработаны гидротермальными растворами, разбиты на блоки, очерченные поверхностями скольжения (наиболее крупные блоки отмечаются в центральных частях массива на правобережье р. Большая Лаба). В ромбовидных блоках нередко внутренняя часть темно-серая, внешняя – желтовато-зеленая (рис. 1-2). Микроструктура неоднородная (рис. 1-3, 1-4), образованная участками чешуйчатого серпентина и тонкокристаллического массивного серпентина; иногда видно, как последний развивался по оливину (рис. 1-5). Часто серпентиниты слагают полиминеральную спутанноволокнисто-чешуйчатую массу (рис. 1-5), в которой присутствуют незакономерно ориентированные микрокристаллические агрегаты лизардита с хризотилом, спутанноволокнистая масса хризотила, участки волокнистого, игольчатого и чешуйчатого антигорита. Мелкопетельчатая микроструктура характерна для хризотил-лизардитовых разностей, спутанноволокнистая или пластинчатая – для хризотил-антигоритовых.

Минеральный состав серпентинитов определен методами рентгенофазового анализа (рис. 2) и синхронного термического анализа (рис. 3). В результатах синхронного термического анализа эндотермический эффект в наиболее низкой для серпентинитов области – близкий к  $\sim 630$  °С – указывает на обилие  $\beta$ -лизардита [Брянчанинова, 2004; Földvári, 2011]. Более высокотемпературный слабо проявленный эндоэффект в области  $\sim 670$  °С может объясняться присутствием реликтового  $\alpha$ -лизардита, а эффект в области  $\sim 770$ - $780$  °С – антигорита.

В качестве второстепенных минералов встречаются брусит, магнезит, доломит, хлорит, тальк, широко развит пылевидный магнетит. Отмечаются бастит и серпентинитовые псевдоморфозы по оливину. Протолит основной массы серпентинитов достаточно уверенно определяется как гарцбургитовый, что выявлено и более ранними исследованиями [Соболев, 1952].

Вблизи жил и даек пскентского монцодиорит-гранитного комплекса развивается хризотил, присутствующий в виде серий параллельных прожилков поперечно-волокнистого хризотил-асбеста (с длиной волокон порядка до 5-10 мм). На некоторых участках (руч. Мошевой) развивается сетчатая асбестовая минерализация. Местами серпентиниты оталькованные и карбонатизированные, вплоть до превращения в тальк-карбонатные породы. Интенсивное развитие магнезита (в том числе с образованием его коллоидальной разновидности – джиобертита) проявляется в участках выветрелых осветленных пород («белых осыпищ») на руч. Власенкова и на противоположном берегу р. Большая Лаба. Кварц-карбонатные породы (ли-

ствениты) отмечаются вблизи южного контакта (руч. Никелевый, руч. Контактный), где в зоне тектонического контакта присутствуют гипабиссальные интрузии пскентского комплекса. С листовитами связана мышьяково-сурьмяно-никелевая минерализация; при изучении этих пород в 1930–1940-х годах отмечено присутствие в них видимого золота (Грицкевич В.П. Отчет об изучении в 1962–1964 гг. Даховского, Маркопидского и Беденского массивов с целью комплексного использования серпентинитов. Северо-Кавказское геологическое управление. Краснодарская комплексная геологическая экспедиция. Том 1, г. Краснодар, 1965 г.). Среди тектонических брекчий южного контакта известны обломки жадеититов [Герасимов и др., 2020].

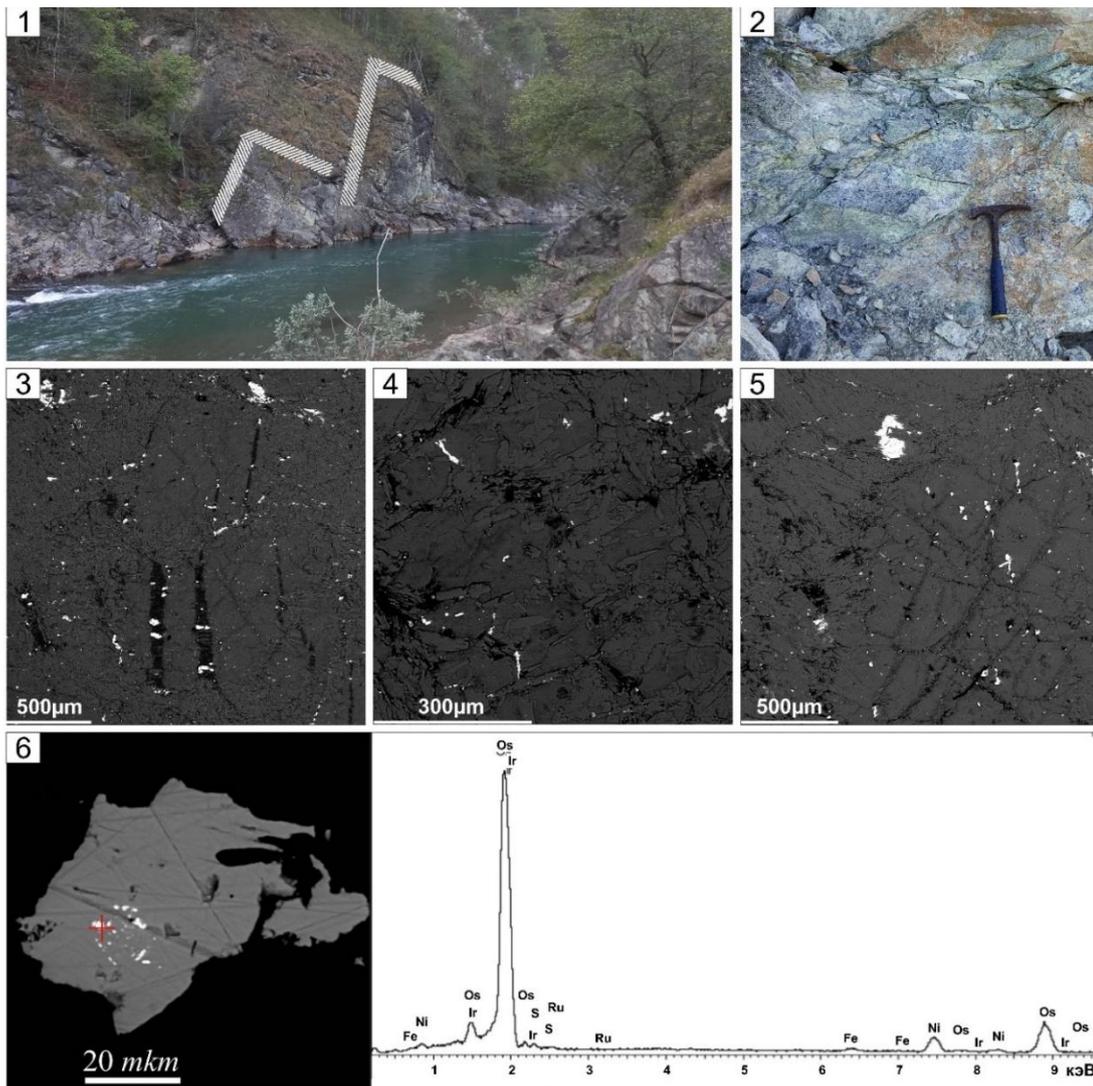


Рис. 1. Серпентиниты Беденского массива: 1-2 – ромбовидные блоки серпентинитов; 3-5 – микроструктура серпентинитов: неоднородная, образованная чешуйчатым и тонкокристаллическим массивным серпентином (3 и 4), полиминеральная спутанно-волокнисто-чешуйчатая масса (5); 6 – включения самородного осмия в зерне хезлвудита (приведен спектр EDX) /

Fig. 1. Serpentinites of the Bedensky massif: 1-2 – Rhombohedral blocks of serpentinite, 3-5 – Microstructure of serpentinite: heterogeneous, composed of scaly and fine-grained massive serpentine (3 and 4), polymineralic tangled-fibrous-scaly mass (5); 6 – Native osmium inclusions within a heazlewoodite grain (EDX spectrum shown)

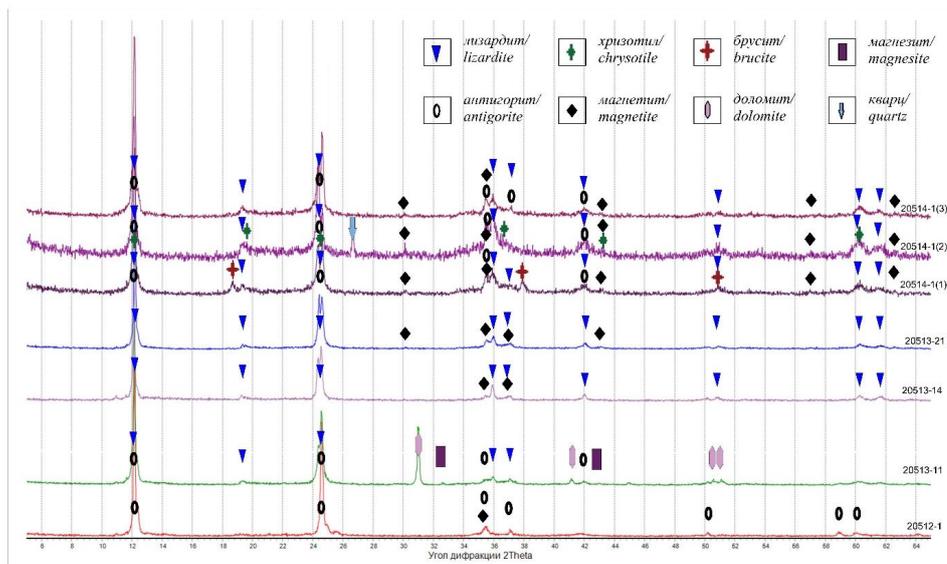


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа серпентинитов /  
 Fig. 2. X-ray diffraction analysis results of serpentinites

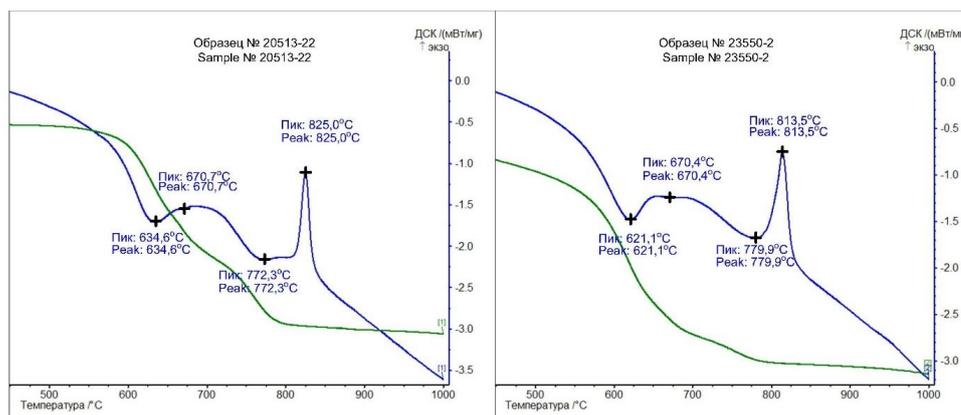


Рис. 3. Результаты синхронного термического анализа (STA) лизардит-хризотильных серпентинитов /  
 Fig. 3. Results of synchronous thermal analysis (STA) on lizardite-chrysotile serpentinites

Метаморфогенно-гидротермальная минерализация в серпентинитах представлена минералами ряда полидимит – линнеит, миллеритом, зигенитом, хезлвудитом, пиритом, карбонатами. В форме микрофазовых включений в хезлвудите обнаружен осмий (рис. 1-6) состава  $Os_{0.88}Ir_{0.07}Fe_{0.03}Ru_{0.02}$  (образец серпентинита из аллювия ручья Балка №1 на левобережье р. Большая Лаба). Наличие в её составе минералов именно осмия, иридия и рутения может объясняться сочетанием нескольких факторов. Во-первых, фоновой обогащенностью этими платиноидами относительно платины и палладия исходных гипербазитов: согласно модельному для реститов или кумулятивных остатков отношение коэффициентов распределения в системе выплавка – остаток описывается зависимостью  $Os > Ir > Ru > Rh > Pt > Pd$ , что определяет характерную относительную обогащенность осмием альпинотипных гипербазитов [Ланда, Марковский, 2007]. И, во-вторых, низкой растворимостью и подвижностью платины в арсенидно-сульфидных никельсодержащих флюидных системах [Плюснина, Лихойдов, 2009]. Для двух измеренных образцов серпентинитов содержания Ru, Ir, Rh, Pt оказались ниже предела обнаружения 0,005 ppm

(что, в целом, вполне объяснимо ввиду глубокой переработки пород), а содержание Pd в одном из образцов составило 0,05 ppm. При этом последний выделяется насыщенностью хромитовыми зернами (рис. 5-2), что может указывать на связь повышенных содержаний платиноидов с хромитовой минерализацией. Для этого же образца установлено содержание Au 0.013 ppm (для второго – 0.0048 ppm).

Присутствие лизардита отражает низкую степень метаморфизма пород, типичную и для других тел серпентинитов северного фланга зоны Передового хребта и смежной Бечасынской зоны, они установлены ранее в составе Даховского и Нижнебердинского выступов [Попов и др., 2022a; Попов и др., 2022б].

Акцессорные хромшпинелиды встречаются в виде фрагментированных зерен. Среди них присутствуют многочисленные мелкие (до 1 мм) зональные зерна алюмохромитов с феррихромитовыми оторочками и хорошо развитыми магнетитовыми каймами, между которыми нередко отчетливо проявлена диффузионная зона (рис. 4-1, 4-3, 4-4), либо, реже, группы зерен хромитового состава размером до 2–3 мм (рис. 4-2).

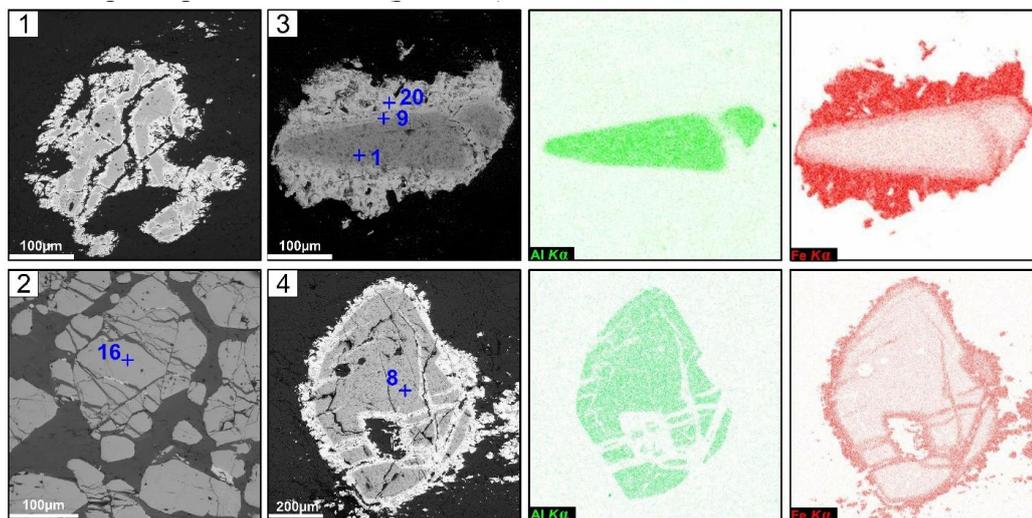


Рис. 4. Структура хромшпинелидов (изображение BE): 1,3,4 – зональные зерна алюмохромитов с феррихромитовыми оторочками; 2 – хромитовые зерна. Для зерен 3 и 4 приведены рентгеновские карты распределения алюминия и железа (излучение  $K\alpha_1$ ). Результаты микроанализов приведены в таблице 1 (на рисунке указан номер, соответствующий результату анализа в таблице) /

Fig. 4. Structure of chromites (Backscattered Electron image): 1,3,4 – zonal grains of aluminochromite with ferrichromite rims; 2 – chromite grains; For grains 3 and 4, X-ray maps of aluminum and iron distribution ( $K\alpha_1$  radiation) are shown.

Results of microanalyses are presented in Table 1 (the number on the figure corresponds to the analysis number in the table)

Ядра алюмохромитов содержат  $Cr_2O_3$  48,56-52,61 мас. %,  $Al_2O_3$  = 13,46-15,53%, MnO в среднем содержится ~0,5 мас. %,  $TiO_2$  менее 0,1 мас.%, содержания никеля, цинка и титана существенно изменяются (NiO 0,03-0,11%, ZnO 0,26-0,67%, мас.%); значение Cr# ( $Cr/(Cr+Al)$ ) варьирует от 0,68 до 0,72 (среднее значение ~ 0,70); Mg# ( $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ ) изменяется от 0,34 до 0,51 (среднее значение ~ 0,42). Оторочки у таких зерен хорошо выражены и имеют феррихромитовый состав. Для них характерна повышенная хромистость Cr# ~ 0,98; значения Mg# изменяются от 0,18 до 0,37 (среднее значение ~ 0,28); содержание MnO – от 0,86 до 4,43 мас.%,  $TiO_2$  – от

0,05 до 0,22 мас.%. Относительно ядер хромшпинелидов в оторочках содержится больше NiO (0,12-0,33 мас.%) и меньше ZnO (0,18-0,33 мас.%).

Хромитовые зерна разбиты трещинами, местами заполненными магнетитом. Они имеют следующие характеристики состава: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 57,55-60,73 мас.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10,46-12,12 мас.%. Значения Cr# составляют 0,76-0,80; Mg# 0,55-0,67; содержание TiO<sub>2</sub> в количестве от 0,09 до 0,18 мас.%; MnO от 0,27 до 0,66 мас.%; NiO до ~ 0,12 мас.%, ZnO менее 0,06 мас.%.

Таблица 1 / Table 1

**Состав хромшпинелидов из серпентинитов Беденского массива (в вес.%) /  
Chromite composition from serpentinites of the Bedensky massif (in wt.%)**

№	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	CoO	NiO	ZnO	Итого	Cr#	Mg#
1	9,26	15,29		0,03	0,20	48,56	0,63	25,54			0,51	100,02	0,68	0,43
2	10,41	15,19		0,01	0,43	51,37		21,11	0,23			98,75	0,69	0,51
3	7,34	13,46			0,14	51,77	0,83	24,07	0,40	0,05	0,47	98,54	0,72	0,38
4	9,19	15,00		0,11	0,41	51,08	0,06	23,32	0,03	0,03	0,26	99,50	0,70	0,43
5	6,60	14,61			0,31	51,12	0,37	24,94	0,45	0,07	0,59	99,06	0,70	0,34
6	7,55	14,22		0,11	0,38	52,61	0,51	23,48	0,24	0,14	0,59	99,83	0,71	0,39
7	7,26	15,05		0,04	0,31	50,32	0,40	24,30	0,13		0,67	98,49	0,69	0,37
8	9,57	15,53		0,03	0,25	52,23	0,77	20,41	0,22	0,14	0,43	99,58	0,69	0,47
9	5,56	0,53		0,23	0,29	42,04	1,57	48,71	0,00	0,33	0,33	100,64	0,98	0,31
10	4,71	0,45	0,65		0,24	49,09	0,86	43,46	0,35			99,81	0,99	0,25
11	3,28	0,56		0,20	0,24	49,53	1,12	43,59	0,18	0,12		98,82	0,98	0,18
12	6,04	0,50		0,05	0,28	41,51	4,43	46,24	0,11	0,19	0,18	99,53	0,98	0,37
13	13,74	11,45			0,36	58,64	0,27	15,21	0,17			99,83	0,77	0,66
14	11,92	10,46		0,11		60,73	0,66	15,81	0,33			100,01	0,80	0,59
15	12,70	10,81			0,17	59,08	0,64	16,46			0,06	99,92	0,79	0,62
16	13,50	11,30		0,09		59,19	0,28	15,61		0,01		99,98	0,78	0,55
17	13,90	12,12		0,18	0,34	57,55	0,29	15,29	0,17	0,12		99,96	0,76	0,67
18	2,39	1,10	0,38		0,54	53,42	1,55	38,42				97,80	0,97	0,14
19	2,58	0,12		0,16	0,07	33,25	1,23	61,33	0,33	0,57	0,17	99,81	0,99	0,14
20	2,03	0,06	0,56	0,07	0,08	0,34	0,08	93,17		0,75	0,02	97,16	0,77	0,11

Типохимические особенности хромшпинелидов, широко используемые для реконструкции формационной и геодинамической принадлежности апогипербазитовых комплексов [Dick, Bullen, 1984; Ishii et al., 1992], указывают на принадлежность протолита к ультрабазитам супрасубдукционных геодинамических обстановок (SSZ) (рис. 5-2) и деплитированным субстратам, свойственным преддуговым перидотитам (рис. 5-3). Такое заключение соответствует принадлежности составов хромшпинелидов к офиолитовому тренду, отвечающему, в целом, серпентинитам зоны Передового хребта [Попов и др., 2022б], для которых принадлежность к фрагментам герцинской офиолитовой ассоциации устанавливается вполне определённо [Омельченко, 2007 и др.]. Отношение Cr# – TiO<sub>2</sub> – один их наиболее показательных критериев – указывает на соответствие составам, рассматриваемым как отвечающим формированию в условиях реакции бонинитовых расплавов с породами мантии (рис. 5-4), характерной для преддуговой обстановки [Johnson, 2012]. Вариации содержания титана в ядрах и их оторочках указывают на перераспределение этого элемента при метаморфизме в коровых условиях, но нет оснований полагать, что концентрации в алюмохромитовых ядрах превышали ~ 0,2 мас.%.

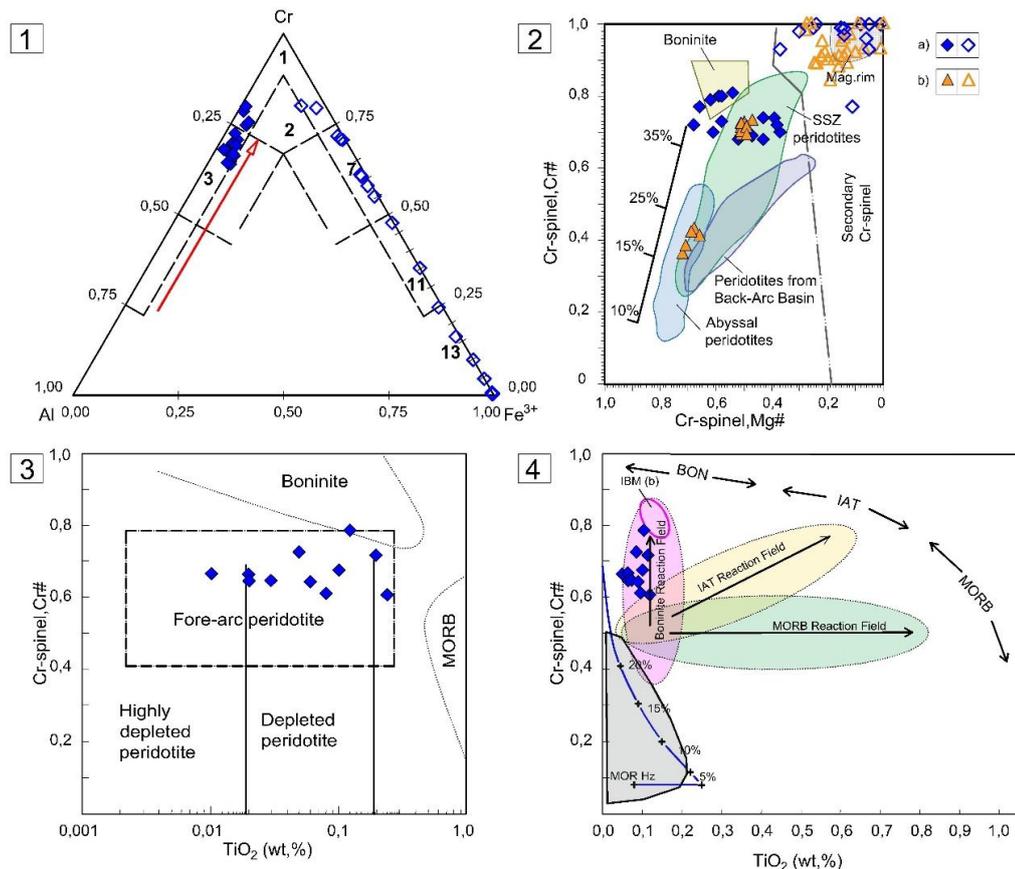


Рис. 5. Составы хромитинелидов на классификационных диаграммах:

1. Тренд изменения составов хромитинелидов в офиолитах на диаграмме Павлова Н.В. Поля составов: 1 – хромиты, 2 – субферрихромиты, 3 – алюмохромиты, 7 – феррихромиты, 11 – хроммагнетиты, 13 – магнетиты; нанесены составы хромитинелей Беденского массива; залитые значки – ядра, не залитые – оторочки зерен.
2. Обобщенная диаграмма для реконструкции геодинамической приуроченности апогипербазитовых комплексов на основе данных о составе хромитинелидов (в координатах Cr# – Mg#) по [Dick, Bullen, 1984; Ishii et al., 1992]; указана степень плавления мантийного вещества по [Arai, 1994]; составы хромитинелидов: а) Беденский массив, б) Нижнетебердинский массив; ядра – залитые значки, оторочки – незалитые.
3. Бинарная диаграмма в координатах Cr# – TiO<sub>2</sub> составов хромитинелей из ультрабазитов разных геодинамических обстановок и бонинитов [Lasheen et al., 2021].
4. Тренды изменения состава перidotитовых шпинелей с расплавами на бинарной диаграмме TiO<sub>2</sub> – Cr# [Johnson, 2012]; теоретическая кривая плавления однородной мантии (FMM) и тенденции реакции расплав-мантия (MORB и BON) по [Pearce et al., 2000]; IBM (b) – бониниты Идзу-Бонин-Марианских островных дуг /

Fig. 5. Chromite compositions on classification diagrams:

1. Chromite composition trends in ophiolites on the Pavlov N.V. diagram. Composition fields: 1 – chromites, 2 – subferrichromites, 3 – alumochromites, 7 – ferrichromites, 11 – chrommagnetites, 13 – magnetites. Chromite compositions from the Bedensky Massif are shown; filled symbols represent cores, unfilled symbols represent rims of grains.
2. Generalized diagram for reconstruction of the geodynamic setting of apohyperbasite complexes based on chromite compositions (in Cr# – Mg# coordinates): after [Dick, Bullen, 1984; Ishii et al., 1992]. Mantle melt fraction is indicated according to [Arai, 1994]. Chromite compositions: a) Bedensky massif, b) Nizhneteberdinskiy massif. Cores are filled symbols, rims are unfilled symbols.
3. Binary diagram in Cr# – TiO<sub>2</sub> coordinates of chromite compositions from ultramafic rocks of various geodynamic settings and boninites [Lasheen et al., 2021].
4. Trends of peridotitic spinel compositions with melts on a binary diagram of TiO<sub>2</sub> – Cr# [Johnson, 2012]. Theoretical curve for the Fractionated Mantle Melt (FMM) and melt-mantle reaction trends (MORB and BON) after [Pearce et al., 2000]. IBM (b) – boninites from the Izu-Bonin-Mariana island arc

На высокую степень плавления пород депилированной мантии, характерную для преддуговых обстановок, уверенно указывает и низкое содержание тяжелых редкоземельных элементов в серпентинитах (табл. 2, рис. 6). Характер распределения редкоземельных элементов близок к распределению, установленному для Карабашского массива альпинотипных гипербазитов Главного гипербазитового пояса Урала, находящегося в составе Магнитогорского синклинория в ассоциации с островодужными офиолитами; сложен массив апогарцбургитовыми и аподунитовыми преимущественно антигоритовыми серпентинитами с подчиненным количеством хризотилловых и  $\beta$ -лизардитовых разностей.

Таблица 2 / Table 2

Содержание REE в серпентинитах Беденского массива (в ppm) /  
Rare earth element (REE) concentrations in serpentinites  
of the Bedensky Massif (ppm)

образец/sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
20513-3	0,20	0,42	0,049	0,18	0,027	0,014	0,03
23542	0,21	0,36	0,044	0,15	0,033	0,011	0,021
образец/sample	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
20513-3	<0,005	0,021	0,0062	0,014	<0,005	0,018	<0,005
23542	<0,005	0,021	<0,005	0,015	<0,005	0,017	<0,005

Примечание: “<0,005” – ниже предела обнаружения /

Note: “< 0,005” indicates values below the detection limit.

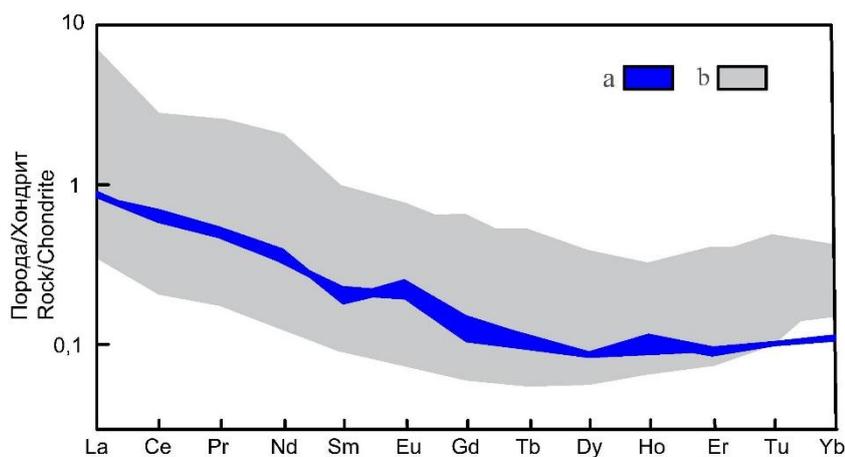


Рис. 6. Нормализованные к хондриту [Sun, McDonough, 1989] содержания редкоземельных элементов (REE) в гипербазитах. Поля составов: а – серпентиниты Беденского массива, б – серпентиниты Карабашского массива (по [Глебова, 2020; Мурзин и др., 2013]) /

Fig. 6. Chondrite-normalized [Sun, McDonough, 1989] Rare Earth Element (REE) patterns in hyperbasites. Composition fields: a – serpentinites of the Bedensky massif, b – serpentinites of the Karabash massif (after [Glebova, 2020; Murzin et al., 2013])

Хромшпинелиды обладают составами, несколько выходящими за область «субдукционных» составов на предложенной [Ishii et al., 1992] диаграмме, но вполне отвечающими составам из гипербазитов ряда офиолитовых ассоциаций, например, петрогенетической группы SSZ позднепалеозойских офиолитов Восточной пустыни Египта [Lasheen et al., 2021] (рис. 5-2) или серпентинитовых диапиров фронтальных частей Марианской и Идзу-Бонинской островных дуг (рис. 5-1). В мезозойских

офиолитах пояса Майари-Баракоа Кубы низкоглиноземистые хромшпинелиды со значением  $Cr\#$  в диапазоне от 0,72 до 0,86 [Rui et al., 2022] отождествляются с верхней частью «мантийной колонны».

### Выводы

Серпентиниты Беденского массива представлены разновидностями от хризотил-лизардитовых до антигоритовых, состав которых сформирован в ходе эксгумации верхней части «мантийной колонны» офиолитовых перидотитов, о чем свидетельствует хромит-алюмохромитовый состав хромшпинелидов (при отсутствии реликтовых хромпикотитов), и последующей аллометаморфической серпентинизации гарцбургитового протолита, в том числе с участием гидротермальных растворов кислых интрузий. Хризотил-лизардитовая ассоциация замещена существенно хризотиловой, в которой хризотил развивается как за счет лизардита, так и в форме шовных шнуров и прожилков, и, затем, в условиях тектонических деформаций с активным трещинообразованием – хризотил-антигоритовой. Активная циркуляция гидротермальных растворов сопровождалась перераспределением рудных элементов, приводя к развитию метаморфогенно-гидротермальной сульфидно-арсенидной никелевой минерализации, с которой связаны минералы платиновой группы, обогащенные осмием и иридием.

Исходные гипербазиты Беденского массива принадлежат к гарцбургитам преддуговой обстановки палеозойской супрасубдукционной зоны, видимо, отвечающим верхней части офиолитовой «мантийной колонны».

### Литература

1. Богущ И.А., Бурцев А.А., Черкашин В.И. Благородные металлы в чёрных сланцах Урупо-Лабинского района Северного Кавказа. // Коллективная монография: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. V. Грозный: Грозненский рабочий, 2016. – С. 35–40.
2. Брянчанинова Н.И. Серпентины и серпентиниты Полярного Урала. Автореф. дис. д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.05; 25.00.04 / Брянчанинова Наталья Игоревна. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2004. – 44 с.
3. Герасимов В.Ю., Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Попов С.В. Жадеит Беденского серпентинитового массива, Западный Кавказ. // Новые данные о минералах. – 2020. – Т. 54. № 4. – С. 107–112. DOI: 10.25993/FM.2021.54.2020.004.
4. Глебова Н.М. Ультрамафиты Карабашского массива (Южный Урал): минералогия, геохимия, метаморфизм. // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 83. – С. 33–40.
5. Ланда Э.А., Марковский Б.А. Основные геохимические различия пород зональных и альпинотипных массивов: их природа, возможные следствия. // Региональная геология и металлогения. – 2007. – №№ 30–31. – С. 62–73.
6. Мурзин В.В., Варламов Д.А., Ронкин Ю.Л., Шанина С.Н. Происхождение золотоносных родингитов Карабашского массива альпинотипных гипербазитов на Южном Урале. // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55. № 4. – С. 320–341. DOI: 10.7868/S0016777013040059.
7. Омельченко В.Л. О месте пород Блыбского комплекса в домезозойской структуре зоны Передового хребта (Северный Кавказ). // Геотектоника. – 2007. – Т. 41. № 4. – С. 60–70.
8. Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г. Поведение платины в гидротермальных условиях. // Вестник ДВО РАН. – 2009. – Т. 25. № 4. – С. 30–37.

9. Попов Ю.В., Пустовит О.Е., Кубрин С.П., Никулин А.Ю. Нижнетебердинский серпентинитовый массив: состав и эволюция (Большой Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2022а. – Т. 12. № 3. – С. 18–33. DOI:10.46698/VNC.2022.74.71.002.
10. Попов Ю.В., Пустовит О.Е., Левченко С.В. Геодинамический комплекс апогипербазитов зоны Передового хребта Большого Кавказа. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2022б. – № 2 (214). – С. 85–92. DOI: 10.18522/1026-2237-2022-2-85-92.
11. Соболев Н.Д. Ультрабазиты Большого Кавказа. М.: Госгеолиздат, 1952. – 240 с.
12. Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. // Chemical Geology. – 1994. – Vol. 113. – pp. 191–204.
13. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1984. – Vol. 86. Issue 1. – pp. 54–76. DOI: 10.1007/BF00373711.
14. Földvári M. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. Budapest, 2011. – 180 p.
15. Ishii T., Robinson P.T., Maekaw H., Fiske R. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamount in the Izu-Ogazawara-Mariana forearc, Leg 125. // In: Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific results. Leg 125. College Station, Texas. – 1992. – Vol. 125. – pp. 445–485. DOI: 10.2973/odp.proc.sr.125.129.1992.
16. Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan: Ph.D. thesis. Cardiff University, 2012. – 468 p.
17. Lasheen E.S.R., Saleh G.M., Khaleal F.M., Alwetaishi M. Petrogenesis of Neoproterozoic Ultramafic Rocks, Wadi Ibib–Wadi Shani, South Eastern Desert, Egypt: Constraints from Whole Rock and Mineral Chemistry. // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. Issue 22. – Art. No. 10524. DOI: 10.3390/app112210524.
18. Parada S.G., Markin M.Y., Stolyarov V.V., Shishkalov I.Y. The first chemical-analytical data on the platinum-bearing potential of the Beden serpentinite massif, Karachai-Cherkesiya. // Doklady Earth Sciences. – 2014. – Vol. 454. No 2. pp. 128–130. DOI: 10.1134/S1028334X14020147.
19. Pearce J., Barker P.F., Edwards S.J., Parkinson I.J. and Leat, P.T. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. // Contribution to Mineralogy and Petrology. – 2000. – Vol. 139. – pp. 36–53. DOI: 10.1007/S004100050572.
20. Rui H.C., Yang J.-S., Castro A.I.L., Zheng J.-P., Lian D.Y., Wu W., Mariño Y.V. Ti-poor high-Al chromitites of the Moa-Baracoa ophiolitic massif (eastern Cuba) formed in a nascent forearc mantle. // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 148. Issue 10. – 144 p.
21. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. // Geological Society London Special Publications. – 1989. – Vol. 42. Issue 1. – pp. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

## References

1. Bogush I.A., Burtsev A.A., Cherkashin V.I. Noble metals in black shales of the Urup-Labinsky region of the North Caucasus. In: Collective monograph: Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Vol. 5. Grozny. Groznensky Rabochy. 2016. pp. 35–40. (In Russ.)
2. Bryanchanova N.I. Serpentinities and Serpentinities of the Polar Urals. The abstract of the dissertation of Dr. geol.-mineral. science. 25.00.05, 25.00.04. Syktyvkar. Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural RAS. 2004. 44 p. (In Russ.)
3. Gerasimov V.Yu., Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Popov S.V. Jadeite of the Beden Serpentine Massif, Western Caucasus. New Data on Minerals. 2020. Vol. 54. No. 4. pp. 107–112. DOI: 10.25993/FM.2021.54.2020.004. (In Russ.)

4. Glebova N.M. Ultramafic rocks of the Karabash Massif (South Urals): mineralogy, geochemistry, metamorphism. *Regional Geology and Metallogeny*. 2020. No. 83. pp. 33–40. (In Russ.)
5. Landa E.A., Markovskiy B.A. The main geochemical differences of rocks of zonal and alpine-type massifs: their nature, possible consequences regional. *Geology and Metallogeny*. 2007. Nos. 30-31. pp. 62–73. (In Russ.)
6. Murzin V.V., Varlamov D.A., Ronkin Y.L., Shanina S.N. Origin of au-bearing rodingite in the Karabash massif of Alpine-type Ultramafic Rocks in the Southern Urals. *Geology of Ore Deposits*. 2013. Vol. 55. No. 4. pp. 278–297. DOI: 10.7868/S0016777013040059. (In Russ.)
7. Omelchenko V.L. On the position of the Blybsky rocks complex in the Pre-Mesozoic structure of the Peredovoy Range Zone (North Caucasus). *Geotectonics*. 2007. Vol. 41. No. 4. pp. 60–70. (In Russ.)
8. Plyusnina L.P., Likhoidov G.G. Platinum Behavior under Hydrothermal Conditions. *Bulletin of the Far Eastern Branch of RAS*. 2009. Vol. 25. No. 4. pp. 30–37. (In Russ.)
9. Popov Yu.V., Pustovit O.E., Kubrin S.P., Nikulin A.Yu. Nizhneteberdinskiy serpentinite massif: composition and evolution (Greater Caucasus). *Geology and geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 18–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.71.002. (In Russ.)
10. Popov Yu.V., Pustovit O.E., Levchenko S.V. Geodynamic complex of apohyperbasites of the zone of the Peredovoy ridge of the Greater Caucasus. *Bulletin of higher educational institutions. (In: Proceedings Izvestiya vuzov) North Caucasus region. Natural sciences*. 2022. No. 2. Issue 214. pp. 85–92. DOI: 10.18522/1026-2237-2022-2-85-92. (In Russ.)
11. Sobolev N.D. Ultrabasic rocks of the Greater Caucasus. Moscow. Gosgeolizdat. 1952. 240 p. (In Russ.)
12. Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*. 1994. Vol. 113. pp. 191–204.
13. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol. 86. Issue 1. pp. 54–76. DOI: 10.1007/BF00373711.
14. Földvári M. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. Budapest. 2011. 180 p.
15. Ishii T., Robinson P.T., Maekaw H., Fiske R. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamount in the Izu-Ogazawara-Mariana forearc, Leg 125. In: *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific results. Leg 125*. College Station, Texas. 1992. Vol. 125. pp. 445–485. DOI: 10.2973/odp.proc.sr.125.129.1992.
16. Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan: Ph.D. thesis. Cardiff University. 2012. 468 p.
17. Lasheen E.S.R., Saleh G.M., Khaleal F.M., Alwetaishi M. Petrogenesis of Neoproterozoic Ultramafic Rocks, Wadi Ibib–Wadi Shani, South Eastern Desert, Egypt: Constraints from Whole Rock and Mineral Chemistry. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 22. Art. No. 10524. DOI: 10.3390/app112210524.
18. Parada S.G., Markin M.Y., Stolyarov V.V., Shishkalov I.Y. The first chemical-analytical data on the platinum-bearing potential of the Beden serpentinite massif, Karachai-Cherkesiya. *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 454. No. 2. pp. 128–130. DOI: 10.1134/S1028334X14020147.
19. Pearce J., Barker P.F., Edwards S.J., Parkinson I.J. and Leat, P.T. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2000. Vol. 139. pp. 36–53. DOI: 10.1007/S004100050572.
20. Rui H.C., Yang J.-S., Castro A.I.L., Zheng J.-P., Lian D.Y., Wu W., Mariño Y.V. Ti-poor high-Al chromitites of the Moa-Baracoa ophiolitic massif (eastern Cuba) formed in a nascent forearc mantle. *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 148. Issue 10. 144 p.
21. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*. 1989. Vol. 42. Issue 1. pp. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

УДК 517; 532

DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x

Оригинальная статья

## Математическое моделирование селективных водозаборных процессов в двухслойном стратифицированном водоеме

И.Д. Музаев <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а;

<sup>2</sup> Владикавказский филиал Финансового университета при правительстве Российской Федерации, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Молодежная, 7,  
e-mail: muzaevid@mail.ru

Статья поступила: 21.05.2024, доработана: 28.08.2024, принята к публикации: 29.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Применение селективных способов забора воды из слоисто-стратифицированного водоема крайне необходимо для водоснабжения тепловых и атомных электростанций. Для исключения перегрева конденсаторов турбин этих важных объектов и тем самым исключения создания в них аварийной ситуации в летнее время необходимо подавать к ним воду из глубинного слоя водоема, где вода бывает холоднее на 8–10° чем в верхнем слое. Когда вода в нижнем слое сильно загрязнена, то воду надо забирать из осветленного чистого и холодного слоя стратифицированного водоема источника водоснабжения. Вплоть до настоящего времени расчеты и проектирование селективных водозаборных устройств выполнялись по сильно упрощенным эмпирическим формулам. Не существовало научно обоснованных методов расчета селективного водозаборного процесса. **Научная новизна.** В представленной работе впервые в мире физико-математически строго смоделирован селективный водозаборный процесс на базе теоретической гидродинамики, математической физики, вычислительной математики, с использованием компьютерных методов. **Цель исследования.** Разработка совокупности расчетных формул для вычисления и управления селективными водозаборными процессами в приложении проектирования водозаборных устройств. Проведение компьютерных вычислительных экспериментов по определению входных параметров водозаборного устройства, отметки его заглубления в водоеме, а также критического значения расхода (скорости) забираемой воды. **Методы исследования.** Поставлена и решена начально-краевая задача математической физики, моделирующая селективный водозаборный процесс в стратифицированном водоеме. Использованы методы операционного исчисления и двукратные тригонометрические ряды Фурье. **Результаты исследования.** Полученная в результате совокупность расчетных формул полностью содержит все входные параметры водоема и водозаборного устройства. Использование результатов исследования на этапе проектирования существенно повышает селективность и рентабельность водозаборного устройства.

**Ключевые слова:** стратифицированный водоем, селективный водозаборный процесс, начально-краевая задача, критические положения поверхности раздела слоев.

**Для цитирования:** Музаев И.Д. Математическое моделирование селективных водозаборных процессов в двухслойном стратифицированном водоеме. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 29-40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x

DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x

Original paper

# Mathematical modeling of selective water intake processes in a two-layer stratified reservoir

I.D. Muzaev <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation;

<sup>2</sup> Vladikavkaz branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation, 7 Molodezhnaya Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: muzaevid@mail.ru

Received: 21.05.2024, revised: 28.08.2024, accepted: 29.08.2024

**Abstract: Relevance.** The use of selective methods of water intake from a stratified reservoir is extremely necessary for the water supply of thermal and nuclear power plants. To avoid overheating of the turbine condensers of these important facilities and thereby avoid creating an emergency situation in them in the summer, it is necessary to supply water to them from the deep layer of the reservoir, where the water is 8-10° colder than in the upper layer. Water from the clarified clean and cold layer of the stratified reservoir of the water supply source should be taken, if the water in the lower layer is heavily polluted. Calculations and design of selective water intake devices have been carried out according to highly simplified empirical formulas up to the present time. There were no scientifically based methods for calculating the selective water intake process. **Scientific novelty.** In the presented work, for the first time in the world, a selective water intake process is strictly modeled physics-mathematically using theoretical hydrodynamics, mathematical physics and computer methods. **Aim.** Development of a set of formulas for calculating and controlling selective water intake processes in the design application of water intake devices. Conducting computer computational experiments to determine the input parameters of the intake device, the mark of its depth in the reservoir, as well as the critical value of the water flow rate (velocity) taken away. **Methods.** An initial boundary value problem of mathematical physics modeling a selective water intake process in a stratified reservoir was set and solved. The methods of operational calculus and two-fold trigonometric Fourier series are used. **Results.** The resulting set of calculation formulas fully contains all the input parameters of the reservoir and the intake device. The use of the research results at the design stage significantly increases the selectivity and profitability of the water intake device.

**Keywords:** stratified reservoir, selective water intake process, initial boundary value problem, critical positions of the interface of layers.

**For citation:** Muzaev I.D. Mathematical modeling of selective water intake processes in a two-layer stratified reservoir. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 29-40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x

## Введение

Водоем, в котором вода по глубине состоит из нескольких слоев, отличающихся плотностями, мутностями, температурами либо химико-биологическими составами называется слоисто-стратифицированным водоемом. Водозаборный процесс, когда вода из такого водоема забирается из определенного слоя при-

чем исключено поступление воды в водозаборное окно из другого слоя называется селективным водозаборным процессом. Если вода забирается из верхнего слоя двухслойного стратифицированного водоема и поверхность раздела слоев в результате искривления достигает нижней грани водозаборного окна, то такое положение называется нижним критическим положением поверхности раздела слоев, при этом числовое значение расхода (скорости) забираемой воды через проем водозаборного окна называется критическим значением расхода (скорости) забираемой воды [Craуa, 1949; Аверкиев и др., 1969; Справочник ..., 1977; Музаев, Туаева, 2004; Методические ..., 2003; Музаев и др., 2016]. Аналогично вышесказанному, если вода забирается из нижнего слоя и при определенном значении расхода (скорости) забираемой воды поверхность раздела слоев воды в результате искривления опускается до верхней грани водозаборного окна, то такое положение называется верхним критическим положением. Соответственно, числовое значение расхода (скорости) называется критическим значением расхода (скорости). Отсюда следует, что если в результате искривления поверхность раздела слоев превышает критическое положение, то этим нарушается селективный водозаборный процесс из определенного слоя водоема.

Применение селективного способа водозабора из стратифицированного водоема часто бывает целесообразным [Аверкиев и др., 1969; Справочник ..., 1977]. Например, для охлаждения конденсаторов турбин тепловых и атомных электростанций и отвода от них излишнего тепла в летнее время требуется подавать к ним воду из глубинных промежуточных слоев стратифицированного водоема источника водоснабжения, где вода бывает холоднее на  $8^{\circ}$ – $10^{\circ}$ С по сравнению с температурой поверхностного слоя и одновременно чище и качественнее, чем в придонном мутном слое. При этом надо исключить возможность затекания воды из других слоев стратифицированного водоема.

### Использованная методика

В специальных справочных источниках, а также в приложении к строительным нормам и правилам [Аверкиев и др., 1969; Справочник ..., 1977; Методические ..., 2003] представлены полуэмпирические формулы, предназначенные для гидравлических расчетов и проектирования селективных водозаборных устройств. Для схемы водозабора, рис. 2, когда необходимо забирать воду из верхнего осветленного слоя двухслойного водоема через водозаборное окно, устроенное на боковой грани водоема, рекомендуется руководствоваться двумя эмпирическими формулами А. Края [Аверкиев и др., 1969; Craуa, 1949]. Первая формула предназначена для двумерной задачи, когда ширина водозаборного окна соизмерима с шириной водоема, схематизированного в виде прямоугольного параллелепипеда. Формула имеет следующий вид:

$$q_k = 1,51 \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}} g Z_0^3 . \quad (1)$$

Вторая формула предназначена для пространственной задачи, когда ширина водоема значительно больше чем ширина водозаборного окна. Она имеет следующий вид:

$$Q_k = 2,55 \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}} g Z_0^5 . \quad (2)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

$\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности воды в верхнем и нижнем слоях соответственно,  $Z_0$  – расстояние от первоначально горизонтальной плоскости раздела слоев до центра водозаборного окна,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $q_k$  и  $Q_k$  – критические значения расходов забираемых вод. Как было сказано во введении статьи, критическое значение – это максимальное числовое значение расхода забираемой воды при превышении которого происходит поднятие искривленной поверхности раздела слоев выше нижней грани водозаборного окна. При этом в водозаборное окно частично будет затекать вода из нижнего мутного слоя, что нарушает селективный водозабор из верхнего осветленного слоя водоема.

У этих формул имеются существенные недостатки. В них не содержатся габаритные размеры водозаборного окна, которое принято как точечный сток. Решение рассматриваемой задачи в строгой гидродинамической постановке [Музаев и др., 2016] показывает, что селективный водозаборный процесс существенно зависит как от толщин слоев, так и от габаритных размеров водозаборного окна. В связи с этими обстоятельствами расчет и проектирование селективных водозаборных устройств на базе эмпирических формул (1) и (2) может не гарантировать селективность и рентабельность водозабора из верхнего осветленного слоя стратифицированного водоема.

Для расчета селективного водозаборного процесса, когда вода забирается из нижнего, холодного слоя, лежащего под теплым поверхностным слоем, рекомендуются: формула Д. Харлемана [Harleman, 1972] и формула И. Макарова. Формула Д. Харлемана со своими пределами применимости предназначена для пространственной задачи, когда ширина водоема значительно превосходит ширину водозаборного окна. Она со своими пределами применимости имеет следующий вид [Аверкиев и др., 1969; Справочник, 1977] (рис. 1 и 2):

$$\frac{z_0}{h} = 0,87Fr^{0,51}; Fr = 0,08 \div 1,3; \frac{z_0}{h} = 0,2 \div 2. \quad (3)$$

Формула И. Макарова предназначена для двумерной задачи, когда ширина водоема соизмерима с шириной водозаборного окна. Она со своими пределами применимости имеет следующий вид:

$$\frac{z_0}{h} = 1,3\sqrt{Fr}, Fr = 0,2 \div 2,5, \quad (4)$$

где  $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} h}}$  – плотностное число Фруда для проема водозаборного окна,

$V$  – средняя скорость течения воды в проеме окна,

$z_0$  – расстояние от невозмущенной поверхности раздела слоев до верхней грани окна,

$h$  – высота окна.

В работе [Музаев и др., 2016] в рамках гидродинамической строгой теории поверхностных и внутренних гравитационных волн поставлена и решена начальная краевая задача, моделирующая селективный водозаборный процесс в трехслойном стратифицированном водоеме, когда вода забирается из промежуточного слоя через одно окно, устроенное на боковой грани водоема. В отличие от эмпирических формул (1) – (4) в расчетных формулах, полученных в работе [Музаев и др., 2016], содержатся все входные параметры системы, включая габаритные размеры водоза-

борного окна, а также промежутки времени плавного (медленного) открытия окна. При мгновенном либо быстром открытии водозаборного окна происходит всплеск слоев воды с последующим перемешиванием слоев между собой.

### Забор воды из нижнего слоя двухслойного стратифицированного водоема

Полагается, что в прямоугольной системе координат  $oxuz$  часть пространства, ограниченная условиями  $0 \leq x \leq L_1$ ,  $0 \leq y \leq L_2$ ,  $-H_2 \leq z \leq H_1$  занята двухслойным плотностно-стратифицированным водоемом с толщинами слоев  $H_1$  и  $H_2$ , плотностями слоев  $\rho_1$  и  $\rho_2$  верхнего и нижнего слоев соответственно. Ось  $oz$  направлена вертикально вверх, плоскость  $oxy$  совмещена с плоскостью невозмущенной поверхности раздела слоев,  $L_1$  и  $L_2$  – длина и ширина водоема, схематизированного в виде прямоугольного параллелепипеда, как показано на рис. 1.

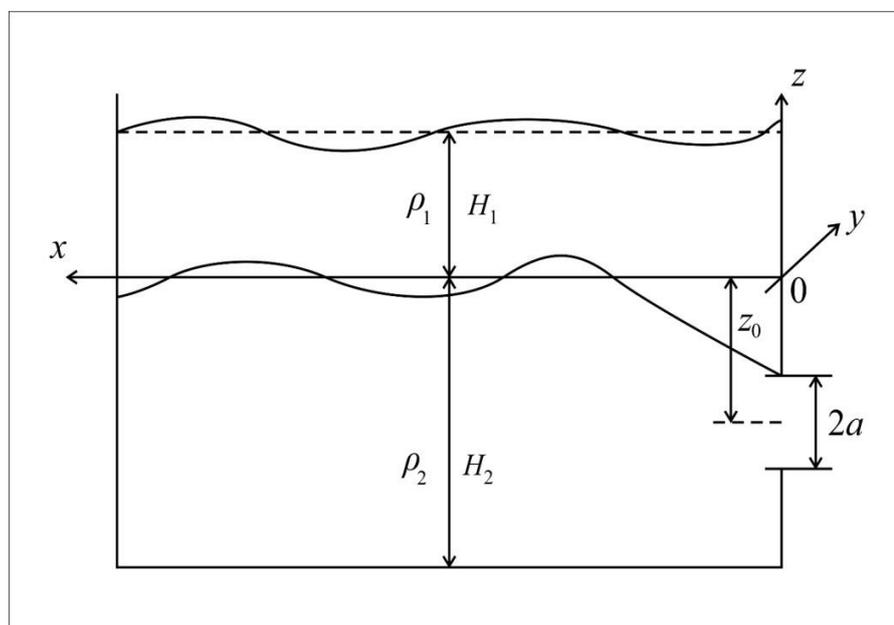


Рис. 1. Расчетная схема начально-краевой задачи при заборе воды из нижнего слоя стратифицированного водоема /

Fig. 1. Calculation scheme of the initial boundary value problem for water intake from the lower layer of a stratified reservoir

Вода из нижнего слоя забирается через окно, устроенное на боковой грани водоема при  $x=0$ . Окно расположено на некотором расстоянии от дна водоема, чтобы в его проем не затекала мутная вода с поверхности дна водоема. Движение воды в водоеме наиболее адекватно моделируется следующей контактной пространственной начально-краевой задачей математической физики, поставленной на базе гидродинамики поверхностных и внутренних гравитационных волн в идеальной несжимаемой жидкости [Музаев и др., 2016; Шокин и др., 2015; Белолипецкий и др., 1961; Сретенский, 1977; Ламб, 1947; Harleman et al., 1972; Кошляков и др., 1970; Корн, Корн, 1977; Гинзбург, 1970; Букреев, 2010; Gyoo-Bum Kim et al., 2013; Lyubimova et al., 2020; Заалишвили, 2023]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} &= 0, \quad 0 \leq z \leq H_1; \\ \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} &= 0, \quad -H_2 \leq z \leq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = -U(t), \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0, \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \Big|_{y=L_2} = 0, \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{x=0} &= -V(t)Y(y)Z(z), \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = -U(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \Big|_{y=L_2} = 0, \\ \left( \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \right) \Big|_{z=H_1} &= 0, \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=0}, \\ \rho_1 \left( \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} &= \rho_2 \left( \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \right) \Big|_{z=0}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=-H_2} = 0, \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = 0, \quad \text{при } t=0, \quad (7)$$

$$\eta(x, y, t) = \frac{1}{(\rho_2 - \rho_1)g} \left( \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \right) \Big|_{z=0}, \quad (8)$$

где приняты следующие обозначения и предположения:  $\varphi_1(x, y, z, t)$  и  $\varphi_2(x, y, z, t)$  – потенциалы скоростей движения воды в верхнем и нижнем слоях воды соответственно,  $t$  – время,  $(x, y, z)$  – координаты пространственной точки в водоеме,  $Y(y)$  и  $Z(z)$  – вспомогательные функции для математической записи проема водозаборного окна:

$$\begin{aligned} Y(y) &= \begin{cases} 1, & \text{при } y \in [y_0 - b; y_0 + b]; \\ 0, & \text{при } y \notin [y_0 - b; y_0 + b]. \end{cases} \\ Z(z) &= \begin{cases} 1, & \text{при } z \in [z_0 - a; z_0 + a]; \\ 0, & \text{при } z \notin [z_0 - a; z_0 + a]. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$V(t)$  – скорость забора воды через водозаборное окно. Она задается в виде следующей функции.

$$V(t) = \begin{cases} V_0 \frac{t}{t_0}, & \text{при } 0 \leq t \leq t_0; \\ V_0, & \text{при } t > t_0. \end{cases} \quad (10)$$

Посредством этой функции учтено медленное открытие водозаборного окна за промежуток времени  $t_0$ . При мгновенном либо быстром открытии окна произойдет гидравлический удар и водозаборное устройство разрушится.  $U(t)$  – скорость затекания воды в водоем через условную вертикальную грань при  $x=L_1$ .

$$U(t) = \frac{V(t) \cdot 4ab}{(H_1 + H_2)L_2}, \quad (11)$$

где  $2a$  и  $2b$  – высота и ширина окна соответственно,  $(0, y_0, z_0)$  – координаты геометрического центра водозаборного окна. При известных потенциалах  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  уравнение волновой поверхности раздела слоев определяется из выражения (8) дифференцированием по времени.

Поставленная контактная начально-краевая задача [Тихонов, Самарский, 1977] решена аналитически путем последовательного применения интегрального преобразования Лапласа по времени  $t$  и конечного косинус интегрального преобразования Фурье по двум координатам  $x$  и  $y$  [Сретенский, 1977; Ламб, 1947; Harleman et al., 1972; Ландау, Лифшиц, 1977; Корн, Корн, 1977].

В результате выполнения обратных интегральных преобразований для закона искривления и колебания поверхности раздела слоев у водозаборного окна получается следующая совокупность расчетных формул:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \delta_{n,m} \frac{\beta_m \bar{R}}{(\omega_2^2 - \omega_1^2) \bar{Y}_1} [\Phi_1 - g \lambda t h \lambda H_1 \Phi_2] \cos \frac{m\pi}{L_2} y_0, \tag{12}$$

$$\delta_{n,m} = \begin{cases} 1, & \text{при } n = 1, 2 \dots; \quad m = 1, 2 \dots, \\ 0,5 & \text{при } m = 0, \quad n = 1, 2, \dots, \\ 0,5 & \text{при } n = 0, \quad m = 1, 2, \dots, \\ 0, & \text{при } n = m = 0. \end{cases} \tag{13}$$

$$\bar{R} = \frac{1}{ch \lambda \cdot H_2} \int_{-z_0+a}^{-z_0-a} ch \lambda (H_2 + x) dx,$$

$$\begin{aligned} \Phi_1(t) &= \begin{cases} \frac{1}{t_0} (\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t), & \text{при } 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{1}{t_0} [\cos \omega_1 t - \cos \omega_1 (t - t_0) - \cos \omega_2 t + \cos \omega_2 (t - t_0)], & \text{при } t > t_0 \end{cases} \\ \Phi_2(t) &= \begin{cases} \frac{1}{t_0} \left( \frac{1 - \cos \omega_2 t}{\omega_2^2} - \frac{1 - \cos \omega_1 t}{\omega_1^2} \right), & \text{при } 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{1}{t_0} \left[ \frac{\cos \omega_2 (t - t_0) - \cos \omega_2 t}{\omega_2^2} - \frac{\cos \omega_1 (t - t_0) - \cos \omega_1 t}{\omega_1^2} \right], & \text{при } t > t_0. \end{cases} \end{aligned} \tag{14}$$

Все величины в совокупности формул (14) кроме своих индексов зависят еще от натуральных чисел  $n$  и  $m$ . Например  $\lambda = \lambda_{n,m}$ ,  $\bar{R} = \bar{R}_{n,m}, \dots$

Решение поставленной начально-краевой задачи (5) – (8) существенно упрощается, если волновое граничное условие на свободной поверхности водоема  $\left( \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \right) \Big|_{z=H_1} = 0$  заменить следующим граничным условием:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = 0. \tag{15}$$

Физический смысл этого условия заключается в том, что на свободной поверхности водоема (при  $z=H_1$ ) волнообразование не учитывается. При таком предположении уравнение волновой поверхности раздела слоев у водозаборного окна получается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \eta(t) &= \frac{4V_0}{L_1 L_2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \delta_{n,m} \frac{\bar{R} t h \lambda H_1}{S \omega^2} \Phi(t) \cos \frac{m\pi}{L_2} y_0; \\ S &= t h \lambda H_1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} t h \lambda H_2; \quad \omega = \sqrt{g \lambda \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{t h \lambda H_1 \cdot t h \lambda H_2}{t h \lambda H_1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} t h \lambda H_2}}; \end{aligned} \tag{16}$$

$$\Phi(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_0} \cdot \frac{1 - \cos \omega t}{\omega^2}, & \text{при } 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{1}{t_0} \cdot \frac{\cos \omega(t - t_0) - \cos \omega t}{\omega^2}, & \text{при } t > t_0. \end{cases} \quad (17)$$

Компьютерные вычислительные эксперименты показывают, что числовые значения критического уровня воды у водозаборного окна, а также критического расхода (скорости) забираемой воды, вычисленные по уравнениям (12) и (16), практически не отличаются.

### Забор воды из верхнего слоя двухслойного стратифицированного водоема

По аналогии с предыдущей задачей, при заборе воды из верхнего слоя движение воды в водоеме моделируется на базе гидродинамики поверхностных и внутренних гравитационных волн в идеальной несжимаемой жидкости. Потенциалы скоростей в слоях  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  должны удовлетворять дифференциальным уравнениям (5). В граничные условия (6) – (7) вносятся следующие изменения: ненулевые граничные условия из нижнего слоя переносятся в верхний слой (рис. 2).

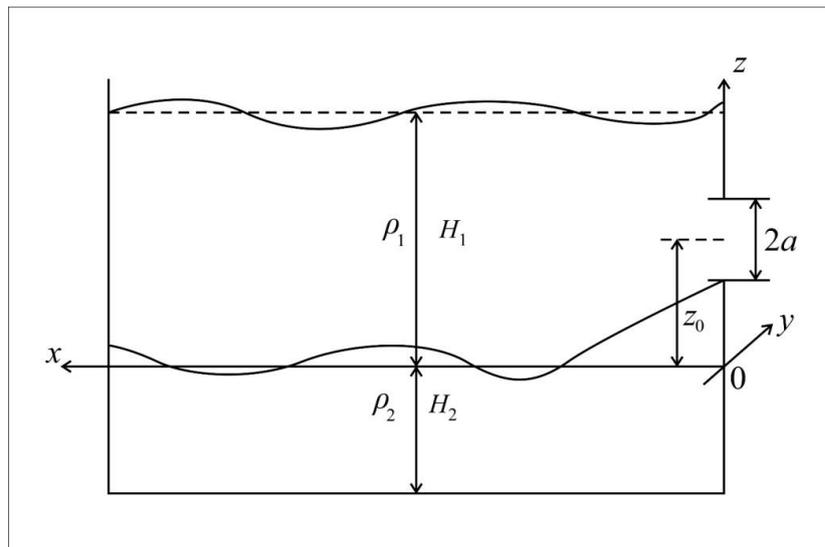


Рис. 2. Расчетная схема начально-краевой задачи при заборе воды из верхнего слоя стратифицированного водоема /

Fig. 2. Calculation scheme of the initial boundary value problem for water intake from the upper layer of a stratified reservoir

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=0} &= -V(t)Y(y)Z(z), \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = -U(t), \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = -U(t). \end{aligned} \quad (18)$$

Остальные граничные и начальные условия (6) – (7) не изменяются, так же, как и выражение (8) для волновой поверхности раздела слоев в водоеме. Поставленная начально-краевая задача решена такими же методами, какими была решена предыдущая задача для забора воды из нижнего слоя водоема. Для уравнения поверхности раздела слоев получена следующая совокупность расчетных формул:

$$\eta(t) = \frac{4V_0\rho_1}{L_1L_2\rho_2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \delta_{n,m} \frac{\beta_m}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)\bar{\gamma}_1} [R_1 \Phi_1(t) - g\lambda R_2 \Phi_2] \cos \frac{m\pi}{L_2} y_0;$$

$$R_1 = R_{1,n,m} = \frac{1}{ch\lambda H_1} \int_{z_0-a}^{z_0+a} sh\lambda(H_1 - x) dx;$$

$$R_2 = R_{2,n,m} = \frac{1}{ch\lambda H_1} \int_{z_0-a}^{z_0+a} sh\lambda(H_1 - x) dx.$$
(19)

Остальные идентификаторы (обозначения) разъяснены в предыдущем разделе. Во втором подходе волновое граничное условие на свободной волновой поверхности водоема заменено на не волновое граничное условие. Остальные граничные и начальные условия не изменяются. Для уравнения волновой поверхности раздела слоев у водозаборного окна получена следующая совокупность расчетных формул:

$$\eta(t) = \frac{4V_0\rho_1}{L_1L_2\rho_2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\delta_{n,m}\beta_m}{\gamma} th\lambda H_2 \Phi(t) \cos \frac{m\pi}{L_2} y_0;$$

$$\gamma = \gamma_{n,m} = th\lambda H_1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} th\lambda H_2; \omega = \omega_{n,m} = \sqrt{g\lambda \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \frac{th\lambda H_1}{\gamma}}$$

$$\Phi(t) = \Phi_{n,m}(t) = \begin{cases} \frac{1 - \cos\omega t}{\omega^2}, & 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{\cos\omega(t-t_0) - \cos\omega t}{\omega^2}, & t > t_0. \end{cases}$$
(20)

Компьютерные вычислительные эксперименты показывают, что числовые значения критического уровня воды у водозаборного окна, а также критического расхода (скорости) забираемой воды, вычисленные по уравнениям (19) и (20), практически не отличаются.

В отличие от эмпирических формул (1) – (4) в полученных совокупностях расчетных формул (12) – (19) содержатся все входные параметры стратифицированного водоема и селективного водозаборного окна:  $H_1, H_2, \rho_1, \rho_2$  – толщины и плотности слоев воды;  $2a, 2b, z_0$  – размеры водозаборного окна и отметка заглубления геометрического центра окна относительно первоначальной горизонтальной плоскости раздела слоев воды;  $L_1, L_2$  – длина и ширина водоема, схематизированного в виде прямоугольного параллелепипеда;  $t_0$  – промежуток времени медленного открытия окна. При мгновенном либо быстром открытии окна в системе произойдет гидравлический удар, и вся система будет разрушена.

### Результаты работы и их обсуждение

Расчет и проектирование селективных водозаборных устройств на базе полученных совокупностей расчетных формул гарантируют селективный водозаборный процесс и рентабельность водозаборного устройства.

Расчеты показывают, что проектирование селективных водозаборных устройств на основе эмпирических формул (1) – (4) гарантирует селективность водоотбора из определенного слоя стратифицированного водоема. Однако из-за того, что в этих формулах полностью не содержатся толщины слоев воды, расход забираемой воды получается сильно заниженным. Водозаборное устройство может оказаться не рентабельным. Это важное утверждение можно доказать конкретными примерами.

Рассмотрим случай, когда вода забирается из верхнего слоя. Входные параметры системы имеют следующие числовые значения: плотность воды в слоях  $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3, \rho_2 = 1002 \text{ кг/м}^3$ . Отметка центра водозаборного окна  $z_0 = 0,25 \text{ м}$ ; тол-

щины слоев воды  $H_1 = 0,5$  м,  $H_2 = 5$  м; ширины водоема и водозаборного окна  $2b = L_2 = 1$  м. Согласно эмпирической формуле (1) А. Края, величина критического расхода забираемой воды составляет  $q_{кр} = 0,025$  м<sup>3</sup>/с. Из компьютерных расчетов по совокупности формул при толщинах слоев  $H_1 = 0,5$  м,  $H_2 = 5$  м для критического расхода получается следующее числовое значение  $q_{кр} = 0,027$  м<sup>3</sup>/с, что с точностью до 11% совпадает с расходом  $q_{кр} = 0,025$  м<sup>3</sup>/с, получаемым по формуле (1) А. Края. Однако при толщине верхнего слоя  $H_1 = 2$  м из совокупности формул для критического расхода получается следующее критическое значение  $q_{кр} = 0,062$  м<sup>3</sup>/с, что в 2,5 раза больше, чем расход, получаемый по формуле (1) А. Края. Этот конкретный пример доказывает утверждение о том, что расчет и проектирование селективных водозаборных устройств на основе эмпирических формул (1) – (4) может привести к нерентабельному варианту устройства.

Что касается полученных в статье совокупностей расчетных формул (12) и (19), то они получены на основе адекватных математических моделей. В них содержатся все входные параметры системы. Расчет и проектирование на основе этих совокупностей формул гарантируют селективность и рентабельность системы водозабора из определенного слоя водоема.

### Выводы

Селективные способы забора воды из слоисто-стратифицированного водоема крайне необходимы для водоснабжения тепловых и атомных электростанций. До настоящего времени расчеты и проектирование селективных водозаборных устройств выполнялись по сильно упрощенным эмпирическим формулам. В представленной работе впервые в мире физико-математически строго смоделирован селективный водозаборный процесс на базе теоретической гидродинамики, математической физики, вычислительной математики, с использованием компьютерных методов. Используются методы операционного исчисления и двукратные тригонометрические ряды Фурье.

В результате исследования получена совокупность расчетных формул, содержащая все входные параметры водоема и водозаборного устройства. Были проведены компьютерные вычислительные эксперименты по определению входных параметров водозаборного устройства, отметки его заглубления в водоеме, а также критического значения расхода (скорости) забираемой воды. Использование результатов исследования на этапе проектирования существенно повышает селективность и рентабельность водозаборного устройства.

### Литература

1. Аверкиев А.Г., Макаров И.И., Синотин В.И. Бесплотинные водозаборные сооружения. М.-Л.: Энергия, 1969. – 164 с.
2. Белолипецкий В.М., Костюк В.Ю., Шокин Ю.И. Математическое моделирование течений стратифицированной жидкости. Новосибирск: Наука, 1991. – 176 с.
3. Букреев В.И. Способ управления селективным водозабором через отверстие в вертикальной стенке. // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51. № 3. – С. 49–54.
4. Гинзбург И.П. Теория сопротивления и теплопередачи. Л.: Изд. Ленинградского университета, 1970. – 378 с.
5. Заалишвили В.Б., Музаев И.Д. Один эффективный метод решения начально-краевых задач поперечных колебаний балки с учетом ее внутреннего сопротивления. // Геология и

геофизика Юга России. – 2023. – Т. 12. № 2. – С. 55–66. DOI: 10.46698/VNC.2023.63.12.005.

6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. – 818 с.

7. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.

8. Ламб Г. Гидродинамика. М.-Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1947. – 929 с.

9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1977. – 735 с.

10. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей. / Исполнители А.С. Соколов, И.И. Макаров, В.И. Кравец, З.Р. Филиппова. СПб.: ВНИИГ, 2003. – 116 с.

11. Музаев И.Д., Туаева Ж.Д. Математическое моделирование проблем охраны окружающей среды. М.: Научный мир, 2003. – 96 с.

12. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Теоретические положения автоматизации проектирования селективных водозаборных устройств. // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21. № 4. – С. 99–110.

13. Справочник по гидравлике. / Под ред. В.А. Большакова. Киев: Вища Школа, 1977. – С. 223–225.

14. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. – 815 с.

15. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. – 735 с.

16. Шокин Ю.И., Рычков А.Д., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. О численных методах решения задач о накате волн на берег. // Вычислительные технологии. – 2015. – Т. 20. № 5. – С. 214–232.

17. Craya A. Recherches theoriques sur l'ecoulement de couches superposees de fluides de densites defferents. // La Houille Blanche. – 1949. – Vol. 4. – pp. 44–55.

18. Gyoo-Bum Kim, Wan-Soo Kim, Jung-Hoon Park, Yeong-Cheol Son, Jin-Woo Kim. Justification of operating capacity of selective intake structure (flexible type) in winter conditions. // The journal of Engineering Geology. – 2013. – Vol. 23. Issue 3. – pp. 227–234.

19. Harleman D.R.F., Stozenbach K.D. Fluid mechanics of heat disposal from power generation. // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1972. – Vol. 4. – pp. 7–32.

20. Lyubimova T.R., Parshakova Ya.N., Lepikhin A.P., Luakhin Yu.S. Increasing the stability of cooling reservoirs by using selective water intake schemes. // Water and Ecology. – 2020. – Vol. 25. Issue 2. – pp. 45–58. DOI: 1023968/2305-34882020.25.2.45-58.

## References

1. Averkiev A.G., Makarov I.I., Sinotin V.I. Damless water intake structures. Moscow. Leningrad. Energiya. 1969. 164 p. (In Russ.)

2. Belolipetskiy V.M., Kostyuk V.Yu., Shokin Yu.I. Mathematical modelling of stratified fluid flows. Novosibirsk. Nauka. 1991. 176 p. (In Russ.)

3. Bukreev V.I. A method for controlling selective water intake through a hole in a vertical wall. Applied Mechanics and Technical Physics. 2010. Vol. 51. No. 3. pp. 49–54. (In Russ.)

4. Ginzburg I.P. The theory of resistance and heat transfer. Leningrad. Leningrad University Publishing House. 1970. 378 p. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Muzaev I.D. One effective method for solving initial boundary value problems of transverse vibrations of a beam taking into account its internal resistance. Geology and geophysics of Russian South. 2023. Vol. 12. No. 2. pp. 55–66. DOI: 10.46698/VNC.2023.63.12.005.

6. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers. Moscow. Nauka. 1977. 818 p.

7. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Partial differential equation in mathematical physics. Moscow. Vysshaya Shkola. 1970. 710 p. (In Russ.)
8. Lamb G. Hydrodynamics. Moscow. Leningrad. Gosudarstvennoe Izdatelstvo Tekhniko-Teoreticheskoy Literatury. 1947. 929 p. (In Russ.)
9. Landau L.D., Lifshits E.M. Hydrodynamics. Moscow. Nauka. 1977. 735 p.
10. Methodological guidelines for technological calculations of cooling ponds. Eds. A.S. Sokolov, I.I. Makarov, V.I. Kravets, Z.R. Filippova. Saint Petersburg. VNIIG. 2003. 116 p. (In Russ.)
11. Muzaev I.D., Tuaeve Zh.D. Mathematical modeling of environmental protection problems. Moscow. Nauchnyi Mir. 2003. 96 p. (In Russ.)
12. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Theoretical design automation of selective water intake devices. Computational Technologies. 2016. Vol. 21. No. 4. pp. 99–110. (In Russ.)
13. Reference book on hydraulics. Ed. V.A. Bolshakov. Kiev. Vyshcha Shkola. 1977. pp. 223–225. (In Russ.)
14. Sretenski L.N. Theory of wave motions of a fluid. Moscow. Nauka. 1977. 815 p. (In Russ.)
15. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. Equations of mathematical physics. Moscow. Nauka. 1977. 735 p. (In Russ.)
16. Shokin Yu.I., Rychkov A.D., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. On numerical methods for solving problems of wave runup on the shore. Computational Technologies. 2015. Vol. 20. No. 5. pp. 214–232. (In Russ.)
17. Craya A. Recherches theoriques sur l'ecoulement de couches superposees de fluides de densites defferents. La Houil le Blanche. 1949. Vol. 4. pp. 44–55.
18. Gyoo-Bum Kim, Wan-Soo Kim, Jung-Hoon Park, Yeong-Cheol Son, Jin-Woo Kim. Justification of operating capacity of selective intake structure (flexible type) in winter conditions. The journal of Engineering Geology. 2013. Vol. 23. Issue 3. pp. 227–234.
19. Harleman D.R.F., Stozenbach K.D. Fluid mechanics of heat disposal from power generation. Annual Review of Fluid Mechanics. 1972. Vol. 4. pp. 7–32.
20. Lyubimova T.R., Parshakova Ya.N., Lepikhin A.P., Luakhin Yu.S. Increasing the stability of cooling reservoirs by using selective water intake schemes. Water and Ecology. 2020. Vol. 25. Issue 2. pp. 45–58. DOI: 1023968/2305-34882020.25.2.45-58.

УДК 551.242.1

DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

Оригинальная статья

## Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга восточных ветвей Владикавказского разлома

А.И. Маневич <sup>1,2</sup>, Б.А. Дзэбоев <sup>1,3,4</sup>, А.Д. Гвишиани <sup>1,3</sup>, В.И. Кафтан <sup>1</sup>,  
В.Н. Татаринов <sup>1,3</sup>, Б.В. Дзеранов <sup>1,4</sup>, В.Б. Заалишвили <sup>1,4</sup>, И.В. Лосев <sup>1</sup>,  
Д.Ж. Акматов <sup>1,2</sup>, Р.В. Шевчук <sup>1,3</sup>, А.Ф. Габараев <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Геофизический центр РАН, Россия, 119296, г. Москва, ул. Молодёжная, 3,  
e-mail: a.manevich@gcras.ru;

<sup>2</sup> Горный институт НИТУ «МИСИС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр., 4;

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1;

<sup>4</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 18.06.2024, доработана: 03.08.2024, принята к публикации: 05.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В статье представлены результаты работ, направленных на развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга восточных ветвей Владикавказского разлома на территории Республики Северная Осетия-Алания. Территория республики отличается высокой плотностью геодезических сетей: государственных, научных и коммерческих. Однако представленные ранее исследования не предусматривали использование государственных геодезических пунктов, а также построение на их основе равномерно распределенной по территории республики геодезической сети. **Целью исследования**, в рамках настоящей статьи, являлось формирование геодезической сети для деформационного ГНСС-мониторинга восточной части и отдельно узла сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома. **Методы исследования.** Сформированный полигон основывается на государственных геодезических пунктах, скальных центрах, заложенных коллективом авторов, и пунктах постоянно действующих сетей. Выполнены исследования по совершенствованию методики оценки точности ГНСС-измерений, связанные с особенностями горных физико-географических условий. Методика полевого контроля точностных характеристик комплектов ГНСС-аппаратуры, позволяет без эталонных построений в полевых условиях осуществлять контроль по одиночной базовой линии. **Результаты исследования.** Важным аспектом является применение методики к новым типам ГНСС-антенн, ранее не исследованных, включая choke-ring, а также антенн китайского производства с китайскими платами GNSS, которые в настоящий момент все чаще применяются на территории РФ. Обработка наблюдений по разработанному алгоритму позволила сравнить номинальные параметры ГНСС-антенн с их фактическими характеристиками и учесть фактические положения фазового центра. В сентябре 2023 г. на территории сформированного Осетинского геодинимического полигона выполнен первый цикл наблюдений за СДЗК средствами ГНСС. Первые результаты показали, что основное количество СКО положения пунктов в плане группируется в диапазоне 2–3 мм, а по высоте в диапазоне 3–5 мм. Средние значения СКО в плане и по высоте составили 3 мм и 6 мм соответственно.

**Ключевые слова:** геодинимический полигон, геодезическая сеть, ГНСС станция, антенна, обработка результатов, данные, ГНСС-измерения.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор)» (проект №23-17-00176). В работе использовалось оборудование и материалы, предоставленные ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>). В работе использовалось оборудование, данные и материалы, предоставленные Единой геофизической службой РАН.

**Для цитирования:** Маневич А.И., Дзобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Дзеранов Б.В., Заалишвили В.Б., Лосев И.В., Акматов Д.Ж., Шевчук Р.В., Габараев А.Ф. Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга восточных ветвей Владикавказского разлома. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 41-56. DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

---

---

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

---

---

DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

Original paper

## Development of the deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz fault

A.I. Manevich <sup>1,2</sup>, B.A. Dzeboev <sup>1,3,4</sup>, A.D. Gvishiani <sup>1,3</sup>, V.I. Kaftan <sup>1</sup>,  
V.N. Tatarinov <sup>1,3</sup>, B.V. Dzeranov <sup>1,4</sup>, V.B. Zaalishvili <sup>1,4</sup>, I.V. Losev <sup>1</sup>,  
D.Zh. Akmatov <sup>1,2</sup>, R.V. Shevchuk <sup>1,3</sup>, A.F. Gabaraev <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, 3 Molodezhnaya Str., Moscow 119296, Russian Federation, e-mail: a.manevich@gcras.ru;

<sup>2</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”,  
4 Ave. Leninskiy, Moscow 119049, Russian Federation;

<sup>3</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
10/1 Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123995, Russian Federation;

<sup>4</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 18.06.2024, revised: 03.08.2024, accepted: 05.08.2024

**Abstract: Relevance.** This article presents the results of work aimed at developing a deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz Fault in the Republic of North Ossetia-Alania. The region is characterized by a high density of geodetic networks, including state, scientific, and commercial networks. However, previous studies did not incorporate the use of state geodetic points or the establishment of a geodetic network uniformly distributed across the republic. **The aim of the study,** development of a network for deformation GNSS monitoring in the eastern and western branches of the Vladikavkaz fault. **Research methods.** The developed test site is based on state geodetic points, rock centers laid by the team of authors, and points of permanent networks. Research was conducted to improve the methodology for assessing the accuracy of GNSS measurements, considering the specific mountain physical and geographical conditions. The field control methodology for GNSS equipment accuracy allows for in-field control using a single baseline without reference constructions. **Research results.** Similar experiments were previously conducted in flat terrain conditions. An important aspect is the application of the method to new types of GNSS antennas that have not been previously studied, including choke-rings, as well as Chinese-made antennas with Chinese CHCNAV boards, which are currently increasingly used in the Russian Federation. Processing observations using the developed algorithm made it possible to compare the nominal parameters of GNSS antennas with their actual characteristics and take

into account the actual positions of the phase center. In September 2023, the first observation cycle for modern crustal movements using GNSS was conducted at the newly established Ossetian geodynamic test site. The initial results indicated that most of the standard deviations for point positions in plan view were in the range of 2–3 mm, and in height, 3–5 mm. The average standard deviations values in plan view and height were 3 mm and 6 mm, respectively.

**Keywords:** geodynamic test site, geodetic network, GNSS station, antenna, results processing, data, GNSS measurements.

**Acknowledgements:** *The research was supported by Russian science foundation “System Seismic Hazard Assessment of the Central Part of the Greater Caucasus (Ossetian sector)” (project №23-17-00176). This work employed facilities and data provided by the Shared Research Facility “Analytical Geomagnetic Data Center” of the Geophysical Center of RAS (<http://ckp.gcras.ru/>). This work employed facilities and data provided by the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences.*

**For citation:** Manevich A.I., Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Dzeranov B.V., Zaalishvili V.B., Losev I.V., Akmatov D.Zh., Shevchuk R.V., Gabaraev A.F. Development of the deformation GNSS monitoring network for the eastern branches of the Vladikavkaz fault. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 41-56. DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b

## Введение

Территория Большого Кавказа характеризуется блоковыми движениями с интенсивными вертикальными и горизонтальными перемещениями и образованием линейных тектонических депрессий, вытянутых вдоль Главного Кавказского хребта. Северное крыло Большого Кавказа представлено пологой моноклиной, погружающейся на север, где она ограничивается линейно вытянутой зоной глубинных разломов, наиболее выраженных вдоль северо-западного (Ахтырский) и юго-восточного (Владикавказский) окончаний [Милановский, 1968]. Формирование этой структуры связано с напряжениями субгоризонтального сжатия. При этом, в целом, северная часть Большого Кавказа изучена недостаточно для надежной оценки сейсмической опасности, особенно в части развития деформационных процессов.

Северный Кавказ является наиболее геодинамически активным регионом европейской части Российской Федерации, что способствовало его активному геологическому и геофизическому изучению и освоению на протяжении последних 200 лет [Милановский, 1968; Белоусов, 1982; Шолпо и др., 1993; Ismail-Zadeh et al., 2020]. Считается, что сеймотектоническое деформирование верхней части земной коры Кавказа соответствует обстановке надвигообразования при субгоризонтальной ориентации главной оси сжатия (в северосеверовосточном направлении) и субвертикальной ориентации главной оси растяжения, что подтверждается по данным ГНСС-наблюдений [McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Шевченко и др., 2014; Лукк, Шевченко, 2019].

В этой связи на территории Горной Осетии стали активно развиваться локальные исследования современных движений земной коры методами ГНСС-измерений. Первые результаты были получены в 2009–2011 годы. В рамках этих работ были созданы два геодинамических полигона: один ориентированный на мониторинг восточных ветвей Владикавказского разлома [Певнев и др., 2014], второй пересекающий главный Кавказский хребет по территории Северной и Южной Осетии [Милуков и др., 2011; 2014]. За следующие 10 лет наблюдений научными коллективами Геофизического института ВНИИ РАН, Государственной астрономической обсерватории МГУ им. П.К. Штенберга и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН были получены важные теоретические и практические результаты. Одной из главных особенностей геодинамического полигона Осетинского сектора Большого

Кавказа является комплексирование результатов геодезических измерений с результатами геолого-геофизических исследований [Рогожин и др., 2015; Стогний и др., 2023; Стогний, Стогний, 2024]. Результаты комплексных исследований позволили построить региональную модель сейсмических скоростей, в которой четко проявляются сейсмогенерирующие структуры [Рогожин и др., 2015]. На южном склоне Большого Кавказа такая структура проявила себя сильным землетрясением 1991 г. (Рачинское,  $I=9$  баллов,  $M=7.2$ ) [Арефьев и др., 2006; Тихоцкий и др., 2011], а на северном – следы сильных землетрясений были изучены с применением палеосейсмологического метода (Владикавказский разлом) [Овсюченко и др., 2008]. Важной особенностью глубинного строения в Осетинском секторе является наличие на профиле ММЗ на глубине 9–45 км клинообразного в разрезе, низкоскоростного тела (до -5дБ относительно региональной скоростной модели) [Рогожин и др., 2015].

Все это определяет актуальность системного изучения взаимосвязи современных движений с разломной тектоникой, пространственным расположением сейсмических событий и результатами численного моделирования напряжённо-деформированного состояния Осетинского сектора Большого Кавказа. Высокая степень изученности современных движений и опыт эксплуатации научных геодезических сетей в регионе за последние 15 лет позволяют сделать выводы, на основе которых целесообразно реализовать новый этап развития Осетинского геодинамического полигона. Нужно отметить, что ранее научными коллективами незаслуженно игнорировались широкие возможности эксплуатации государственных геодезических сетей, которые представляют собой надежные конструкции геодезических центров, заложенных на всей территории Республики Северная Осетия-Алания. Их совместное использование позволяет сформировать широкую развернутую сеть, равномерно покрывающую территорию исследования. Эти данные, по сути, станут главным ресурсом для дальнейшего изучения геодинамического режима территории в перспективе. Комплексные исследования позволят получить уникальный набор геолого-геофизических данных, которые могут существенно развить понимание геодинамических и сейсмотектонических процессов в Осетинском секторе Большого Кавказа.

### Методы исследования

Для выполнения ГНСС-измерений в районе исследований на долговременной основе необходимо сформировать надежную геодезическую сеть деформационного мониторинга. С этой целью в рамках полевых работ решались две задачи:

- поиск и обследование существующих геодезических пунктов государственных, научных и коммерческих сетей;
- закладка новых геодезических пунктов собственными силами.

Полевые работы были начаты с поиска и обследования существующих геодезических пунктов в районе исследований. Территория Республики Северная Осетия-Алания отличается высоким уровнем развития геодезического обеспечения. В районе исследований присутствуют следующие геодезические сети:

- совместная научная геодезическая сеть Государственного астрономического института им. П.К. Штенберга МГУ (ГАИШ) и Владикавказского научного центра (ВНЦ) РАН, охватывающая территории Северной и Южной Осетии [Мионов и др., 2021];

- научная геодезическая сеть Геофизического института ВНИЦ РАН, локализованная в районе восточных ветвей Владикавказской группы разломов [Певнев и др., 2014];
- научная геодезическая сеть постоянно-действующих станций Геофизической службы РАН (<https://sofgsras.ru/nablyudeniya/set-kompleksnykh-nablyudenij/>);
- постоянно-действующие пункты коммерческих геодезических сетей АО «ПРИН», EFT Group, АО «Русгеоком» и других (<https://portal.fppd.cgkipd.ru/main/>);
- пункты государственной геодезической сети, принадлежащие публично-правовой компании (ППК) «Роскадастр» (<https://cgkipd.ru/fsdf/ggs/monitoring-ggs/>).

Основу формируемой геодезической сети составили в первую очередь пункты государственной геодезической сети. Это связано с тем, что пункты государственной геодезической сети закладывались таким образом, чтобы равномерно покрывать территорию республики, а геодезический центр надежно и профессионально устанавливался в грунтовое или скальное основание, что повышает его долговременную устойчивость и позволяет измерять именно движения земной поверхности (рис. 1) [Правила ..., 1993; 2001].



Рис. 1. Типы геодезических центров на Осетинском геодинамическом полигоне.  
 а – грунтовые свайные центры (тип 147) (пункты ППК «Роскадастр») [Правила ..., 1993];  
 б – грунтовые анкерные центры (тип 162) (пункты ППК «Роскадастр») [Правила ..., 1993];  
 с – скальные центры (пункты ППК «Роскадастр») [Правила..., 1993]; д – скальный центр с принудительным центрированием, резьба М4.5 [Миронов и др., 2021] (пункты ВНИЦ РАН и ГАИШ МГУ); е – скальный центр с принудительным центрированием, резьба 5/8 дюйма [Маневич и др., 2022] (пункты Геофизического центра РАН); ф – вставной трубчатый центр с адаптером [Певнев и др., 2014] (пункт ГФИ ВНИЦ РАН) /

Fig. 1. Types of geodetic centers at the Ossetian geodynamic test site.  
 а – Ground pile centers (type 147) (points of PPK “Roskadastr”) [Rules ..., 1993]; б – Ground anchor centers (type 162) (points of PPK “Roskadastr”) [Rules ..., 1993]; с – Rock centers (points of PPK “Roskadastr”) [Rules..., 1993]; д – Rock center with forced centering, thread M4.5 [Mironov et al., 2021] (point of GPI VSC RAS and GAISH MSU); е – rock center with forced centering, 5/8 inch thread [Manevich et al., 2022] (point of Geophysical Center RAS); ф – inserted tubular center with adapter [Pevnev et al., 2014] (point of GPI VSC RAS)

Несмотря на то, что пункты научных сетей ГАИШ МГУ и ВНИЦ РАН являются центрами с принудительным центрированием (что положительно сказывается на стабильности ГНСС-измерений) в большинстве своем их закладка и условия

для приема сигналов ГНСС находятся на невысоком уровне качества. Преимущественно центры установлены в крыши домов, заброшенные фундаменты зданий либо расположены в залесенной местности. Пункты ППК «Роскадастр» в своем большинстве лишены указанных недостатков. В результате рекогносцировочных работ было задокументировано и оценено состояние 114 геодезических пунктов (21 – ГФИ ВНИЦ РАН, 87 – ППК «Роскадастр», 6 – ГАИШ МГУ).

Пункты государственной геодезической сети в большинстве своем находятся недалеко от населенных пунктов, т.к. служат в первую очередь для геодезического обеспечения строительных и кадастровых работ. А для сети деформационного мониторинга необходимо сформировать сеть, равномерно охватывающую исследуемую территорию. Для решения этой задачи выполнен комплекс полевых работ по закреплению новых геодезических пунктов с использованием скальных геодезических центров. Скальный геодезический центр представляет собой латунный цилиндрический стержень длиной 150 мм, с одиночным пропилом в нижней части стержня шириной 20 мм и глубиной 40 мм. Для лучшей адгезии с раствором на стержне пропилены два витка кольцевых зазоров и дополнительные опоясывающие витки глубиной в 1 мм. В качестве распирающего элемента принят клин высотой 40 мм с шириной верхней кромки в 10 мм. Диаметр скважины для установки центра составляет 32 мм. Фотография и схема конструкции представлена на рис. 1д, 2. В качестве строительной смеси использована цементно-бетонная мастика в жидком состоянии (примерные соотношения – 1 часть цемента, 2 части мелкозернистого песка, 3 части воды). Несмотря на то, что жидкая цементно-бетонная смесь имеет наибольшее время застывания и набора прочности, ее консистенция позволяет надежно заполнить все пустоты между скальным центром и стенками скважины. Вторым важным аспектом ее применения является то, что в отличие от вязкоупругих смесей она не придает стержню упругого выгаливания при расклинивании центра. Технология выполнения работ по закладке центров подробно изложена в статье [Маневич и др., 2022].

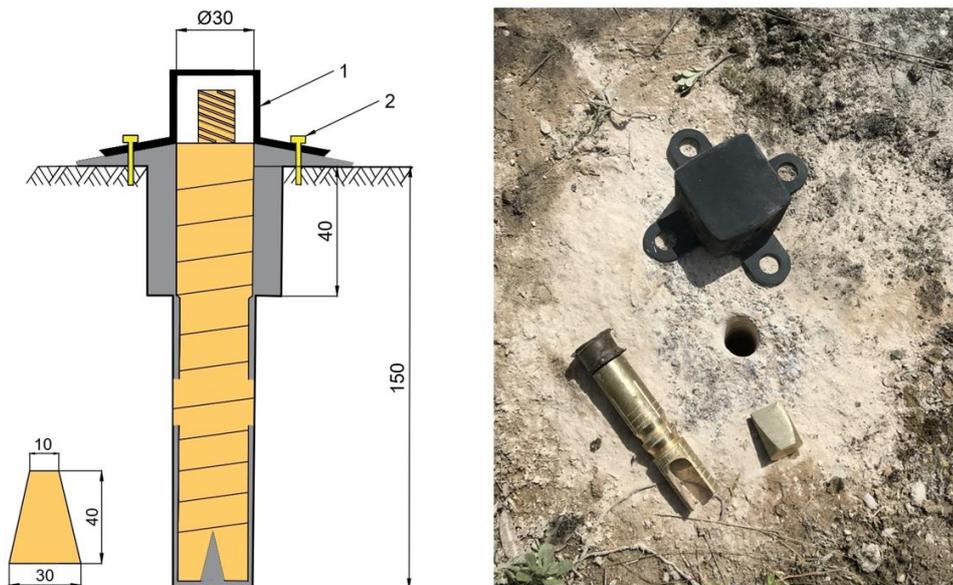


Рис. 2. Схема и общий вид конструкции скального геодезического центра (все размеры даны в миллиметрах). 1 – защитный колпак; 2 – строительный анкер с гайкой /

Fig. 2. Schematic diagram and general view of the rock surveying center structure (all dimensions are given in millimeters). 1 – protective cap; 2 – construction anchor with nut

В период с 10 июня по 20 сентября 2023 г. экспедиционной группой Геофизического центра РАН были проведены рекогносцировочные и геодезические работы. При установке скальных геодезических центров по возможности соблюдались следующие принципы выбора места для закладки новых центров [Маневич и др., 2022]:

- Долговременная сохранность и стабильность положения скального центра с точки зрения физико-географических условий (исключить расположение пунктов на участках, подверженных локальным деформациям пород (оползневые склоны), сезонному подтоплению, заболачиванию и перспективной хозяйственной деятельности);

- Наличие условий для качественного приема спутниковых сигналов (место должно находиться на возвышении, отсутствие препятствий и помех для приема радиосигнала);

- Расположение новых мест должно быть в районе простирающихся Восточных ветвей Владикавказского разлома, для формирования равномерной геодезической сети в районе исследований;

- Создание оптимальной геометрии геодезической сети, а именно увеличение числа треугольников близких к равносторонним (для снижения погрешности определения компонент деформаций) и регулярного покрытия исследуемой территории;

- Транспортная доступность скального центра.

При выборе мест размещения геодезических центров, обследование местности и поиск возможных путей подъезда выполнялись с применением автомобиля повышенной проходимости и пешими маршрутами. Топографическая привязка участков и запись треков дорожной сети осуществлялись с помощью ГЛОНАСС/GPS-навигатора GARMIN eTrex 10. В результате было закреплено на местности 9 скальных геодезических центров – UNL1, KRC1, BTRG, KBN1, KBN2, BLT3, CHMI, DZIV, SUAD. Схема новых геодезических центров на рис. 3а. Общий вид некоторых скальных центров приведен на рис. 3б,в. Демонстрация установки скального центра представлена на видео – [https://www.youtube.com/watch?v=98ta\\_fDUmac](https://www.youtube.com/watch?v=98ta_fDUmac).

В результате работ сформирована геодезическая сеть для деформационного ГНСС-мониторинга восточной части и отдельно узла сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома. Сеть позволяет сформировать хорошую геометрию конечных элементов-треугольников для вычисления плановых деформаций [Wu et al., 2003], что было невозможно в рамках эксплуатации отдельных научных или государственных сетей. Сеть включает в себя 35 пунктов, определяемых в ходе полевых кампаний (1 пункт ГФИ ВНИЦ РАН, 9 пунктов ГЦ РАН и 25 пунктов ППК «Роскадастр» (рис. 4). Кроме этого, при обработке результатов измерений нами будут использоваться данные постоянно действующих станций Геофизической службы РАН и других коммерческих базовых станций.



a)

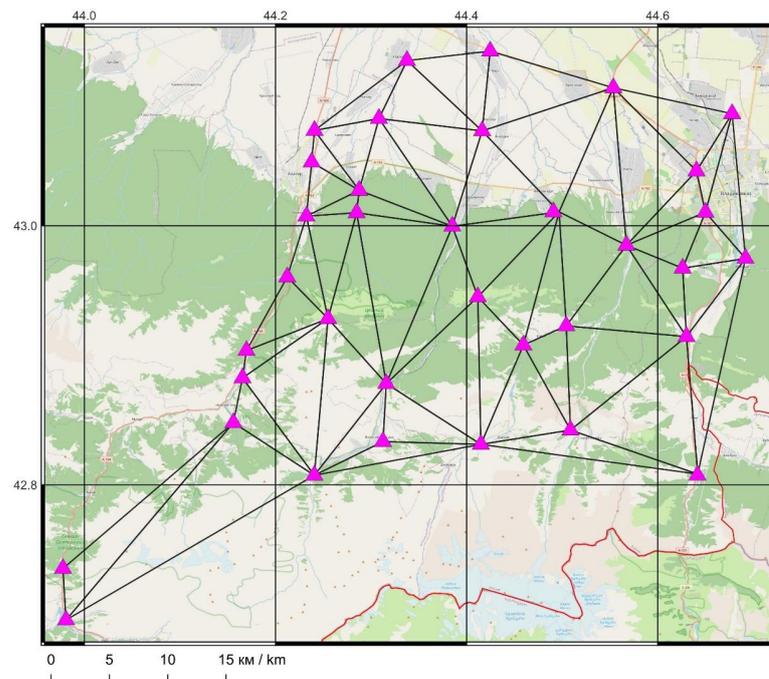


b)



c)

*Рис. 3. Скальные геодезические центры Осетинского геодинамического полигона. а – схема заложенных скальных геодезических центров; б – пункт UNL1; в – пункт CHMI (с крышкой) / Fig. 3. Rock geodesic centers of the Ossetian geodynamic test site. а – scheme of laid rock geodesic centers; б – point UNL1; в – point CHMI (with cover)*



*Рис. 4. Сформированная геодезическая сеть для деформационного мониторинга / Fig. 4. Formed geodetic network for deformation monitoring*

## Результаты исследования

На территории Осетинского геодинимического полигона в пределах сформированной геодезической сети деформационного ГНСС-мониторинга в сентябре 2023 года выполнены работы по проведению первого цикла наблюдений за современными движениями земной коры средствами ГНСС. Схема расстановок ГНСС аппаратуры в 2023 году является исходной, которая должна будет повторяться в следующих эпохах измерений. В качестве опорных пунктов ГНСС-измерений в районе приняты три постоянно действующие станции Геофизической службы РАН (ARD2, VLKZ, LAZ2) и четыре базовые станции ГНСС коммерческой сети АО «ПРИН» (NCHK, NZRN, PRHL, VKAV) (рис. 5). Дополнительно с целью получения приращений координат пунктов в национальной системе координат ГСК-2011 или международной ITRF могут быть использованы результаты наблюдений ближайших станций ФАГС (пункты AST3, PTGK, RSTS) и ближайших станций IGS (ARUC, ZECK) (рис. 6). Для выполнения полевых измерений использовались семь комплектов ГНСС-приемников и антенн, следующих моделей:

- Комплекты ГНСС-приемников PrinCe P5U с антенной choke-ring C220GR – 4 шт.;
- Комплекты ГНСС-приемников Javad Delta 3N с антеннами JAVGRANT-G3T и G5T – 3 шт.

Комплекты ГНСС с антеннами choke-ring преимущественно использовались для грунтовых центров в хороших условиях транспортной доступности и измерений с использованием геодезического штатива. Комплекты ГНСС с антеннами Javad использовались для скальных центров с принудительным центрированием или в условиях необходимого пешего маршрута или сложной транспортной доступности до пункта.

Комплекты данного ГНСС-оборудования обеспечивают двухчастотные измерения с поддержкой навигационных систем NAVSTAR GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO. Заявленная производителем точность при постобработке в режиме статики в плане до 4 мм, по высоте до 6 мм. Применение такого оборудования фактически приближает качество измерений к уровню обсерваторских станций.

В результате спутниковые измерения на пунктах геодезической сети геодинимического полигона были выполнены за 10 дней в период с 20 по 29 сентября. Измерения были проведены на 35 пунктах, включая скальные центры, установленные в 2023 году. Общее время проведения наблюдений на каждом пункте варьировалось от 4 до 12 часов. Все измерения были выполнены с показателем синхронной продолжительности записи (одновременной работы всех приемников) более 4-х часов. Внешний вид некоторых пунктов измерений представлен на рис. 7.

Первичные данные ГНСС-измерений обрабатываются с использованием лицензионной программы MAGNET Office Tools. При обработке результатов измерений принимается маска угла возвышения  $15^\circ$ . Режим постобработки включает использование спутниковых сигналов GPS и ГЛОНАСС, и точных эфемерид. Основное количество СКО положения пунктов в плане группируется в диапазоне 2–3 мм, а по высоте в диапазоне 3–5 мм. Средние значения СКО в плане и по высоте составили 3 мм и 6 мм соответственно.

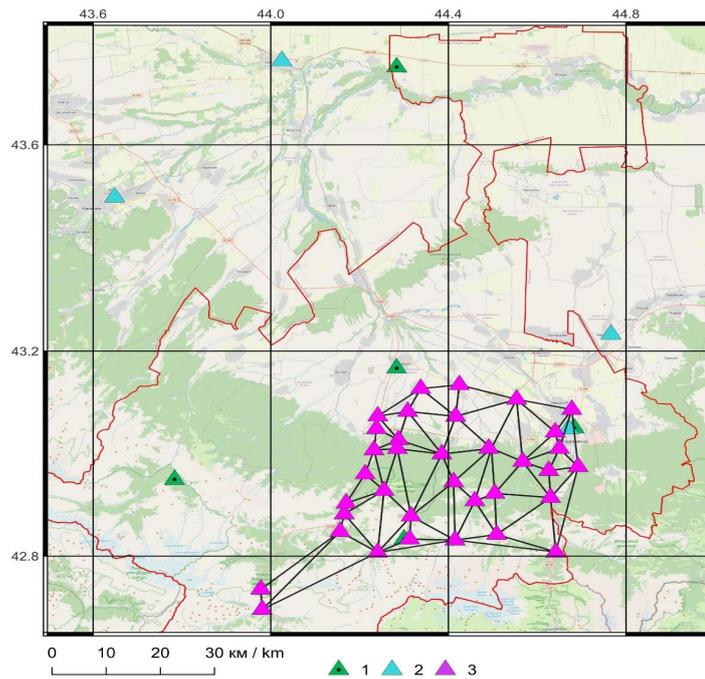


Рис. 5. Схема ГНСС-пунктов, участвующих в измерениях эпохи 2023 года. 1 – пункты Геофизической службы РАН; 2 – пункты АО «ПРИН»; 3 – пункты сформированной сети /  
 Fig. 5. Schematic of the GNSS points participating in the 2023 epoch measurements. 1 – points of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences; 2 – points of JSC “PRIN”; 3 – points of the formed network

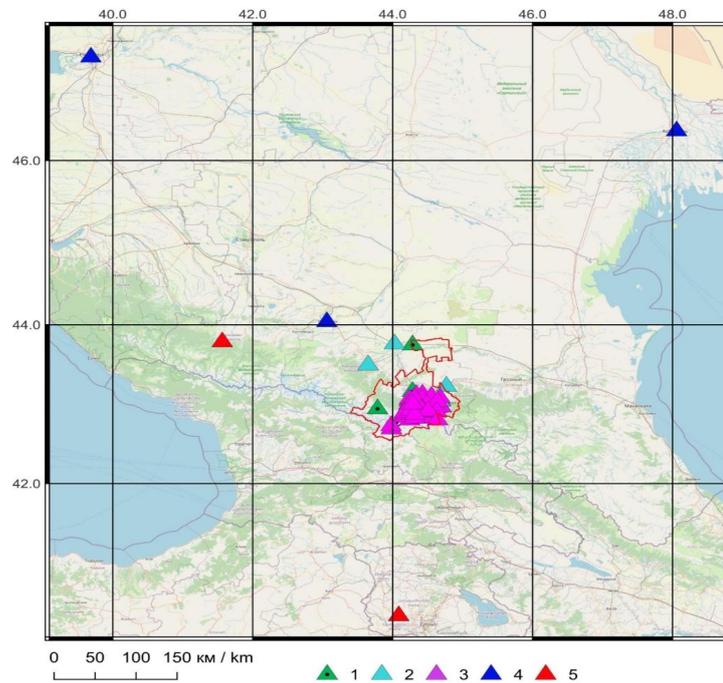


Рис. 6. Положение измеряемых ГНСС-пунктов по отношению к пунктам сетей IGS и ФАГС. 1 – пункты Геофизической службы РАН; 2 – пункты АО «ПРИН»; 3 – пункты сформированной сети; 4 – пункты фундаментальной астрономо-геодезической сети РФ; 5 – пункты международной сети IGS /

Fig. 6. Position of measured GNSS points in relation to IGS and FAGS network points. 1 – points of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences; 2 – points of JSC “PRIN”; 3 – points of the formed network; 4 – points of the fundamental astronomical and geodetic network of the Russian Federation; 5 – points of the international IGS network

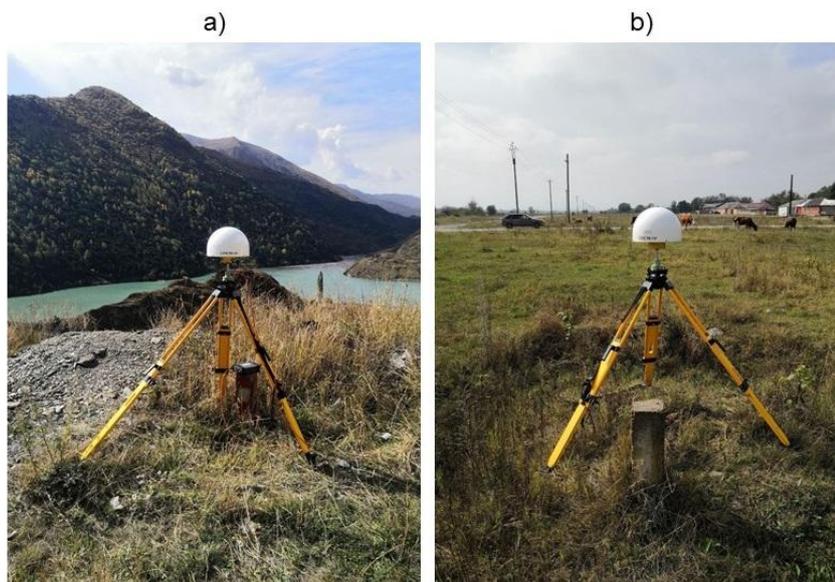


Рис. 7. Внешний вид пунктов во время ГНСС-измерений.  
a – пункт «Нижний Зарамаг»; b – пункт «71533» /  
Fig. 7. Appearance of points during GNSS measurements.  
a – point “Nizhny Zaramag”; b – point “71533”

Выполнение ГНСС-измерений в районе исследований имеет ряд особенностей из-за физико-географических условий территории. Геодезические пункты формируемого геодинимического полигона достаточно широко разнесены по территории республики и находятся в существенно отличающихся друг от друга природных условиях (горных, предгорных, равнинных). Существует несколько факторов, которые могут повлиять на точность определения местоположения ГНСС-антенн. Их условно можно разделить на внешние (многолучевость, тропосферные и ионосферные помехи) и внутренние (конструкция самой антенны). Все эти факторы оказывают влияние на точность ГНСС-измерений в различной степени в пределах Осетинского геодинимического полигона.

В работе [Кафтан и др., 2023] была представлена новая методика полевого контроля точностных параметров комплектов ГНСС-аппаратуры. Для применения этой методики не обязательно иметь эталонных геодезических построений, а достаточно использовать единственную отобранную базовую линию. Полевые измерения в сетях ГНСС осуществляются определенным количеством комплектов измерительной аппаратуры  $n$ . При использовании разностного метода это количество не может быть менее 2. В сетях с большим числом пунктов, как правило, используется большее количество комплектов. Измеряя последовательно один и тот же вектор базовой линии всеми образующимися парами комплектов, появляется возможность оценить не только точность измерения самого вектора, например, по отклонениям от среднего значения, но и оценить вклад в общую погрешность каждого из комплектов [Кафтан и др., 2023]. При этом, чем больше комплектов используется в измерениях, тем надежнее полученные оценки.

Однако данные эксперименты проводились только для условий полигонов с неизменными физико-географическими условиями, практически в равнинных условиях. В этом ключе планируется расширение и обоснование применения методики полевого контроля точности для условий горных и предгорных районов. Их осо-

бенность заключается в резком перепаде высот между пунктами, что может особенно сильно повлиять на тропосферные источники помех. Вторым важным аспектом совершенствования методики в рамках проекта – является ее применение к ГНСС-антеннам с конструкцией choke-ring, которые ранее не были исследованы. И третье, то, что в процессе работ изучаются новые антенны китайского производства с оригинальными китайскими платами CNCNAV, которые при действующих обстоятельствах все чаще применяются на территории Российской Федерации (к примеру, в коммерческих базовых сетях ГНСС-станций), что представляет собой определенный практический интерес.

Таким образом, в рамках совершенствования методики полевого контроля измерительной ГНСС-аппаратуры впервые были выполнены экспериментальные исследования ее применения в горном районе (на примере территории Республики Северная Осетия-Алания) и для конструкции ГНСС-антенн типа choke-ring. В 2023 году была отобрана тестовая базовая линия ГНСС, расположенная в наилучших доступных условиях приема спутникового сигнала (рис. 8). Длина линии составила 2095 м. Препятствия прохождению радиоволн от спутника к антенне приемника отсутствовали.



*Рис. 8. Схема измерений базовой линии /*

*Fig. 8. Schematic of baseline measurements*

Контролю были подвергнуты 6 ГНСС комплектов аппаратуры, применяемых в полевых кампаниях наблюдений, на Осетинском геодинамическом полигоне. Это ГНСС-антенны с обтекателем Javad GrAnt G3T (модель NGS JAV\_GRANT\_G3T+G – [https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=JAV\\_GRANT-G3T%2BG\\_NONE.003](https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=JAV_GRANT-G3T%2BG_NONE.003)), антенны choke-ring CHCC220GR (модель NGS CHCC220GR CHCD – [https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=CHCC220GR\\_CHCD.003](https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=CHCC220GR_CHCD.003)), стандартные антенны CHC AT312 (модель NGS CHCAT312 NONE – [https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=CHCAT312\\_NONE.003](https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=CHCAT312_NONE.003)).

Измерения парами комплектов выполнялись двухчасовыми сеансами, с дискретностью регистрации ГНСС-сигнала – 30 секунд, маска возвышения была установлена на 5°. Расстановка комплектов на контрольной базовой линии представлена в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Расстановка комплектов ГНСС-антенн и приемников для измерений /  
Arrangement of GNSS antenna and receiver sets for measurements**

Серия измерений / Series of measurements	Точка от – пункт 71924 / Point from – point 71924	Точка до – пункт 72217 / Point to – point 72217
1	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
2	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
3	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
4	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
5	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
6	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437
7	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437
8	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
9	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
10	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540
11	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	PrinCe P5U 1161612 AT312 MA00192540
12	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	Javad Delta 3N 04305 G3T 06458
13	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	Javad Delta 3N 04304 G3T 06733
14	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	PrinCe P5U 1161623 AT312 MA00192437
15	PrinCe P5U 1161651 C220GR C22060030000	PrinCe P5U 1161596 C220GR C22060029994

Обработка наблюдений по разработанному алгоритму позволит сравнить номинальные параметры ГНСС-антенн с их фактическими характеристиками. И соответственно учесть фактические положения фазового центра ГНСС-антенн при обработке результатов ГНСС-измерений. Выявление вариаций фазового центра антенн может отличаться до 25 мм от заявленного производителем, как это показано в работах [Кафтан и др., 2023].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В границах Республики Северная Осетия–Алания сформирована геодезическая сеть для деформационного ГНСС-мониторинга восточной части и отдельно узла сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома. Сформированный геодинимический полигон в настоящее время включает в себя 35 пунктов. В сентябре 2023 г. выполнен первый цикл наблюдений за СДЗК средствами ГНСС.

Выполнены исследования методики оценки точности ГНСС-измерений, связанные с особенностями горных физико-географических условий. Методика полевого контроля точности комплектов ГНСС-аппаратуры, позволяет без эталонных построений проводить в полевых условиях контроль по одиночной базовой линии. Ранее подобные эксперименты проводились для равнинных условий. Важным аспектом является применение методики к новым типам ГНСС-антенн, ранее не исследованных, включая *choke-ring*, а также антенн китайского производства с китайскими платами CNCNAV, которые в настоящий момент все чаще применяются на территории России (к примеру, в коммерческих базовых сетях ГНСС-станций). Первые результаты показали, что основное количество СКО положения пунктов в плане группируется в диапазоне 2–3 мм, а по высоте в диапазоне 3–5 мм. Средние значения СКО в плане и по высоте составили 3 мм и 6 мм соответственно.

В результате проведенных исследований, было показано, что сформированный геодинамический полигон нацелен на выполнение режимных ГНСС-наблюдений в региональном масштабе. Развитие геодезической сети будет способствовать комплексному исследованию малоизученных территорий данного района и получению новых данных о динамике деформирования земной коры Осетинского сектора Большого Кавказа.

### Литература

1. Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным. // *Физика Земли*. – 2006. – № 1. – С. 30–44.
2. Белоусов В.В. Большой Кавказ как тектоническая лаборатория. // *Проблемы геодинамики Кавказа*. М.: Наука, 1982. – С. 9–13.
3. Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Маневич А.И., Кафтан А.В. Экспериментальное исследование методики полевой оценки точности измерений ГНСС. // *Геодезия и картография*. – 2023. – № 10. – С. 12–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21.
4. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. // *Физика Земли*. – 2019. – № 4. – С. 99–123. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123.
5. Маневич А.И., Шевчук Р. В., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Забродин С.М. Развитие сети ГНСС-наблюдений в пределах Нижне-Канского массива с использованием скальных геодезических центров. // *Сейсмические приборы*. – 2022. – Т. 58. № 4. – С. 111–129. DOI: 10.21455/si2022.4-7.
6. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, – 1968. 483 с.
7. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Хубаев Х.М. Осетинская геодезическая спутниковая сеть: создание и первые результаты геодинамического мониторинга. // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2014. – Т. 14. № 4. – С. 2–11.
8. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Торчинов Х.М.З., Хубаев Х.М. Изучение геодинамики горной Осетии в 2009-2011 гг. // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2011. – Т. 11. № 4. – С. 49–53.
9. Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М., Дробышев В.Н., Кусраев А.Г., Хубаев Х.М. Деформации земной коры в Осетинском регионе большого Кавказа по данным ГНСС-измерений. // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2021. – Т. 20. № 4. – С. 122–137. DOI: 10.21455/GPB2021.4-8.
10. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Рогожин Е.А. Зона Владикавказского активного разлома на территории РСО-А. // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2008. – Т. 8. № 3. – С. 44–56.
11. Певнев А.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. О модернизации геодезических исследований на Владикавказском геодинамическом прогнозном полигоне. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2014. – № 3. – С. 84–90.

12. Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей. М.: Картогеоцентр – Геодезиздат, – 1993. 104 с.
13. Правила закрепления центров пунктов спутниковой геодезической сети. М.: ЦНИИГАиК, 2001. – 30 с.
14. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36–49.
15. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001.
16. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмоструктура южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.
17. Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шур Д.Ю., Арефьев С.С. Строение очаговой зоны Рачинского землетрясения 1991 г. по данным локальной сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды. // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12. № 1. – С. 5–31.
18. Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Е. Современная геодинамика Средиземноморской-Малокавказской части Альпийско-Индонезийского подвижного пояса. // Физика Земли. – 2014. – № 1. – С. 40–58.
19. Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. – 192 с.
20. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. // Earth-Science Reviews. – 2020. – Vol. 207. Issue 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
21. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351.
22. Reilinger R.E., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., et al. 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. Solid Earth. – 2006. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
23. Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated. // Journal of Geodesy and Geodynamics. – 2003. – Vol. 23. Issue 3. pp. 26–30.

## References

1. Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Bykova V.V., Dorbat K. Depth structure of the origin zone of the Rachin earthquake from seismic tomographic data. Physics of the Solid Earth. 2006. No. 1. pp. 30–44. (In Russ.)
2. Belousov V.V. The Greater Caucasus as a tectonic laboratory. Problems of geodynamics of the Caucasus. Moscow. Nauka. 1982. pp. 9–13. (In Russ.)
3. Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Shevchuk R.V., Manevich A.I., Kaftan A.V. Experimental study of the field methodology for assessing the accuracy of GNSS measurements. Geodezia i Kartografiya. 2023. No. 10. pp. 12–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21. (In Russ.)
4. Lukk A.A., Shevchenko V.I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2019. No. 4. pp. 99–123. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123. (In Russ.)
5. Manevich A.I., Shevchyk R.V., Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Zabrodin S.M. Improvement of the network of GNSS monitoring of the Nizhne-Kansky massif using bedrock pin geodetic centre. Seismic Instruments. 2022. Vol. 58. No. 4. p. 111–129. DOI: 10.21455/si2022.4-7. (In Russ.)

6. Milanovsky E.E. Modern Tectonics of the Caucasus. Moscow. Nedra. 1968. 483 p. (In Russ.)
7. Milyukov V.K., Drobyshev V.N., Mironov A.P., Steblou G.M., Khubaev Kh.M. Ossetian geodetic satellite network: creation and first results of geodynamic monitoring. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2014. Vol. 14. No. 4. pp. 2–11. (In Russ.)
8. Milyukov V.K., Drobyshev V.N., Torchinov Kh.M.Z., Khubaev Kh.M. Study of the geodynamics of mountainous Ossetia in 2009-2011. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2011. Vol. 11. No. 4. pp. 49–53. (In Russ.)
9. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblou G.M., Drobyshev V.N., Kusraev A.G., Khubaev Kh.M. Crustal deformations in the Ossetian region of the Greater Caucasus according to GNSS measurements. *Geophysical processes and the biosphere*. 2021. Vol. 20. No. 4. pp. 122–137. DOI: 10.21455/GPB2021.4-8. (In Russ.)
10. Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Novikov S.S., Rogozhin E.A. Zone of the Vladikavkaz active fault on the territory of the RNO-A. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2008. Vol. 8. No. 3. pp. 44–56. (In Russ.)
11. Pevnev A.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. On modernization of geodetic studies at Vladikavkaz geodynamic forecast polygon. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. No. 3. p. 84–90. (In Russ.)
12. Rules for laying centers and benchmarks at points of geodetic and leveling networks. Moscow. Cartgeocenter – Geodesizdat. 1993. 104 p. (In Russ.)
13. Rules for fixing the centers of points of the satellite geodetic network. Moscow. TSNIIGAiK. 2001. 30 p. (In Russ.)
14. Rogozhin E.A., Gorbaticov A.V., Stepanova M.Y., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. Structure and modern geodynamics of the Greater Caucasus megacyclorium in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)
15. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust for the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. – Vol. 13. No. 1. pp. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006. (In Russ.)
17. Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Shur D.Yu., Arefiev S.S. Focal zone structure of the Racha earthquake 1991 from data of local seismic tomography with adaptive parameterization of the environment. *Geophysical Research*. 2011. Vol. 12. No. 1. pp. 5–31. (In Russ.)
18. Shevchenko V.I., Lukk A.A., Prilepin M.T., Reilinger R.E. Modern geodynamics of the Mediterranean-Malocaucasian part of the Alpine-Indonesian mobile belt. *Physics of the Solid Earth*. 2014. No. 1. pp. 40–58. (In Russ.)
19. Sholpo V.N., Rogozhin E.A., Goncharov M.A. Folding of the Greater Caucasus. Moscow. Nauka. 1993. 192 p. (In Russ.)
20. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 207. Issue 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
21. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. pp. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351.
22. Reilinger R.E., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., et al. 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. Solid Earth*. 2006. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
23. Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated. *Journal of Geodesy and Geodynamics*. 2003. Vol. 23. Issue 3. pp. 26–30.

УДК 550.34

DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

Оригинальная статья

## Уравнения затухания сейсмической ИНТЕНСИВНОСТИ

Ф.Ф. Аптикаев , О.О. Эртелева 

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

Статья поступила: 31.05.2024, доработана: 22.08.2024, принята к публикации: 23.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Сейсмическая интенсивность является наиболее точной характеристикой сейсмических воздействий, поскольку она напрямую связана с повреждаемостью строительных объектов. В то же время, повреждаемость объектов определяется параметрами сейсмических воздействий. Поэтому оценка затухания интенсивности весьма важна для проектирования сейсмостойких строительных конструкций. Затухание сейсмической интенсивности с расстоянием оценивается согласно уравнению макросейсмического поля. Недостатками этого метода является: 1) использование гипоцентрального расстояния; 2) описание затухания параметров сейсмических колебаний одним уравнением. По эмпирическим данным в инженерном диапазоне сейсмических воздействий (6 – 9 баллов) выделяются три зоны (разломная, ближняя и дальняя), в каждой из которых параметры сейсмического движения грунта различным образом зависят от магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий. Разработка уравнений затухания интенсивности, лишенных этих недостатков, будет способствовать повышению точности прогнозных оценок ожидаемых сейсмических воздействий. **Цель работы** – исследовать законы затухания сейсмической интенсивности в различных зонах поля колебаний при землетрясениях. **Методы исследования** – статистический анализ эмпирических данных по сильным движениям грунта. **Результаты работы** – предложены уравнения затухания для сейсмической интенсивности в различных зонах волнового поля сейсмических колебаний в зависимости от механизма очага и грунтовых условий. Погрешность оценок интенсивности составляет 0.35 балла для разломной и ближней зон и 0.40 балла для дальней зоны. В разломной зоне интенсивность нарастает, достигая максимума на некотором удалении от разлома, на границе разломной и ближней зон. Затем начинается затухание интенсивности, которое резко усиливается при переходе в дальнюю зону. В очаговой зоне (совокупность разломной и ближней зон) приращение интенсивности происходит вследствие изменения несущей способности грунта.

**Ключевые слова:** сейсмическая интенсивность, пиковое ускорение грунта, продолжительность колебаний, магнитуда землетрясения, механизм очага, расстояние, грунтовые условия.

**Благодарности:** Работа выполнена по госзаданию ИФЗ РАН.

**Для цитирования:** Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Уравнения затухания сейсмической интенсивности. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14 (3): 57-70. DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

Original paper

## Attenuation curves of seismic intensity

F.F. Aptikaev<sup>ID</sup>, O.O. Erteleva<sup>ID</sup>

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

Received: 31.05.2024, revised: 22.08.2024, accepted: 23.08.2024

**Abstract: Relevance.** Seismic intensity is the most accurate characterization of seismic effects, as it is directly related to the damageability of construction objects. At the same time, the damageability of objects is determined by the parameters of seismic impacts. Therefore, the evaluation of intensity attenuation is very important for the design of earthquake-resistant building structures. The attenuation of seismic intensity with distance is estimated according to the macroseismic field equation. The disadvantages of this method are: 1) use of hypocentral distance; 2) description of attenuation of seismic vibration parameters by a single equation. According to empirical data, in the engineering range of seismic impacts (6 – 9 points) three zones (fault, near-field and far-field) are distinguished, in each of which seismic ground motion parameters depend differently on magnitude, focal mechanism, distance and ground conditions. The development of intensity attenuation equations devoid of these disadvantages will improve the accuracy of predictive estimates of expected seismic effects. **The aim** of the paper is to investigate the laws of seismic intensity attenuation in different zones of the vibration field during earthquakes. **Research methods** – statistical analysis of empirical data on strong ground motions. **Results of work** – proposed attenuation equations for seismic intensity in different zones of the wave field of seismic vibrations depending on the source mechanism and ground conditions. The error of intensity estimates is 0.35 for the fault- and near-field zones and 0.40 for the far-field zone. In the fault zone, the intensity increases, reaching a maximum at some distance from the fault, at the boundary of the fault and near-field zone. Then the intensity begins to decay, which sharply intensifies at the transition to the far-field zone. In the source zone (a combination of the fault and near-field zones), the intensity increment occurs due to changes in the bearing capacity of the ground.

**Keywords:** seismic intensity, peak ground acceleration, vibrations duration, earthquake magnitude, focal mechanism, distance, ground conditions.

**Acknowledgments:** *The work was carried out according to the state task of the IPE RAS.*

**For citation:** Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Attenuation curves of seismic intensity. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 57-70. DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

### Введение

Сейсмический эффект в любой точке территории, подверженной воздействию землетрясения, оценивается интенсивностью землетрясения. Величина интенсивности зависит, главным образом, от параметров очага – магнитуды события, глубины очага и расстояния до точки наблюдения. Аналитически эта зависимость описывается уравнением макросейсмического поля, учитывающим расхождение волн и их поглощение [von Kövesligethy, 1907; Шебалин, 1957, 1968; Sponheuer, 1960]:

$$I = a_1 M_S - b_1 \lg (H^2 + R^2)^{0,5} - b_2 (H^2 + R^2)^{0,5} + c_1, \quad (1)$$

где  $M_S$  – магнитуда по поверхностным волнам;

$H$ , км – глубина очага;

$R$ , км – эпицентрального расстояние;

$a_1, b_1, b_2, c_1$  – эмпирические коэффициенты.

Оказалось, что влияние поглощения мало по сравнению с влиянием геометрического расхождения. Кроме того, учет поглощения в какой-то мере можно учесть, как и расхождение, степенной функцией. Поэтому формула затухания интенсивности была упрощена без снижения точности оценок [Blake, 1940; Шебалин, 1957, 1968; Sponheuer, 1960]:

$$I = a M_s - b \lg (H^2 + R^2)^{0.5} + c, \quad (2)$$

В работе [Шебалин, 1957] представлено усредненное по миру уравнение макросейсмического поля. Это уравнение широко используется и в настоящее время.

Уравнения для крупных регионов (Дальний Восток, Кавказ, Центральная Европа, Урал, Тянь-Шань, Центральная Азия и др.) и для отдельных землетрясений можно найти в многочисленных работах, например, [Bindi et al., 2011; Джанузаков, 2013; Фролова и др., 2019; Artikov et al., 2020; Ибрагимов и др., 2022].

Накопление эмпирических данных по макросейсмическим эффектам землетрясений позволяет усовершенствовать имеющиеся уравнения макросейсмического поля, повысить их точность и построить модели для малоизученных районов, см., например, [Джанузаков, 2013; Фролова и др., 2019, 2020; Петрова и др., 2020]. В статье [Фролова и др., 2019] указывается, что ошибки оценок интенсивности по таким усовершенствованным моделям снижаются до 0.5 балла.

Некоторые исследователи разрабатывают уравнения макросейсмического поля с коэффициентом затухания, зависящим от глубины очага [Bindi et al., 2011; Artikov et al., 2020]. При этом отмечается улучшение сходимости расчетных и экспериментальных оценок сейсмической интенсивности.

Среди работ, использующих для определения интенсивности количественные параметры колебаний, стоит особо отметить оригинальный подход, развитый А.А. Гусевым с соавторами [Гусев, Шумилина, 1999], – исследование закономерностей макросейсмического поля на основе волновой теории. Ошибка модели заключается в том, что амплитуда и преобладающий период сейсмических колебаний по эмпирическим данным зависят не от всего размера поверхности разрыва, а от его участка, сравнимого с длиной сейсмической волны.

В работе [Соломатин, 2013] отмечены различия в закономерностях спада интенсивности для землетрясений 2 диапазонов магнитуд  $M = 5.75 - 7.4$  и  $M = 7.5 - 8.5$  на примере Курило-Камчатского региона. В результате проведенного анализа автор делает вывод, с которым, безусловно, необходимо согласиться, о том, что экстраполяция данных по слабым землетрясениям в область сильных событий “без учета реальных результатов наблюдений по последним может привести к существенным систематическим ошибкам”. При этом, по данным автора цитируемой работы, в ближней зоне расчетное значение интенсивности может быть занижено примерно на 1 балл.

В нашей стране сейсмическая опасность по традиции задается в баллах. Но пересчет баллов в ускорения сопровождается неприемлемо большими ошибками [Neumann, 1954; Murphy, O'Brien, 1977]. Поэтому делаются попытки связать сейсмическую интенсивность с различными параметрами сейсмического движения грунта [Аптикаев, 2012; Кузин, 2022; Фидарова и др., 2023].

Анализируя имеющиеся в научной литературе публикации по исследованию закономерностей затухания сейсмической интенсивности с расстоянием, следует сделать вывод о том, что общим недостатком существующих на сегодняшний день и уточняемых на основе появления новых эмпирических данных уравнений

макросейсмического поля является, во-первых, использование гипоцентрального расстояния. Между тем, в работе [Campbell, 1981] показано, что наилучшей мерой расстояния при землетрясениях является кратчайшее расстояние до поверхности разрыва. Во-вторых, предполагается, что одним уравнением можно описывать затухание параметров сейсмических колебаний независимо от расстояния.

Многие исследователи отмечают существенные различия в параметрах сейсмического движения грунта в зависимости от расстояния и выделяют две зоны – ближнюю и дальнюю, но границы между зонами оставались не определенными. Использование двух различных функций затухания в различных диапазонах расстояний приведено в работах [Trifunac, 1976; Потапов, Чернов, 2007; Аптикаев, 2012].

Ранее считалось, что механизм очага при заданной магнитуде не может влиять на уровень амплитуды. Но в работе [Аптикаев, Копничев, 1979] было установлено влияние типа подвижки по разлому на амплитуду пикового ускорения при фиксированной магнитуде.

Сейсмические воздействия по традиции задаются в баллах шкалы сейсмической интенсивности. Пересчет баллов в ускорения грунта для объектов массового строительства производится согласно шкале сейсмической интенсивности с учетом продолжительности колебаний. Поэтому оценка затухания интенсивности весьма важна для проектирования сейсмостойких строительных конструкций. В этом заключается **актуальность** изучения затухания сейсмической интенсивности с расстоянием. **Целью** исследования является разработка системы уравнений затухания сейсмической интенсивности для различных зон: разломной, ближней и дальней. **Новизна** работы состоит в том, что разработанные в результате уравнения будут свободны от указанных недостатков, а именно: будет учтена зональность волнового поля сейсмических колебаний, учтены механизм очага и длительность колебаний, а в качестве меры расстояния использовано кратчайшее расстояние до поверхности разлома.

### Использованные данные

В работе, как и в предыдущей статье авторов [Эртелева, Аптикаев, 2023], использованы данные о параметрах сильных движений грунта при сейсмических событиях из разных регионов мира, полученные как из литературных источников, бюллетеней, каталогов, так и на основе цифровых записей сильных движений грунта. Для каждой записи сейсмического события были определены пиковое ускорение и ширина импульса (мера продолжительности колебаний). Интервал магнитуд полученного таким образом набора данных составляет  $2 \leq M_S \leq 8$ , интервал кратчайших расстояний до плоскости разрыва  $0.01 \text{ км} \leq R \leq 100 \text{ км}$ , классификация грунтов по сейсмическим свойствам согласно нормам СП 14.13330.2018.

### Методика обработки данных

Путем статистической обработки имеющегося в распоряжении авторов набора данных были установлены корреляционные соотношения, описывающие закономерности затухания пиковых ускорений и ширины импульса. В каждой из трех зон волнового поля сейсмических колебаний – разломной, ближней и дальней – эти закономерности различны. Подробно процедура обработки и принципы, на которых она основана, представлены в работах [Аптикаев, 2012; Эртелева, Аптикаев, 2023].

Вкратце напомним полученные ранее авторами результаты, использованные в данном исследовании [Аптикаев, 2012; Эртелева, Аптикаев, 2023]. Анализ разра-

ботанных кривых затухания пиковых ускорений позволил сделать вывод о том, что в волновом поле сейсмических колебаний выделяются 3 зоны с различными законами спада амплитуд колебаний. В первой из них амплитуды колебаний возрастают. При этом уровень колебаний зависит от типа механизма очага. Эта зона непосредственно примыкает к разлому землетрясения. Ее предложено называть разломной. Во второй зоне спадание амплитуд колебаний по степени меньше 1. Значит, с учетом геометрического расхождения фронта волны, сейсмические волны пополняются энергией. Закон затухания здесь не зависит от типа грунта и механизма очага. Эту зону предложено называть ближней. В третьей зоне затухание резко усиливается; здесь не происходит выделение энергии. Третью зону – зону с повышенным затуханием, называют дальней.

Заметим, что первоначально, например, в СП 286.1325800.2016, зона, примыкающая к разлому, была названа очаговой, соответственно бытующему определению очага землетрясения. Однако, по эмпирическим данным, оказалось [Эртелева, Аптикаев, 2023], что сейсмическая энергия выделяется и в ближней зоне. Таким образом, в отличие от СП 286.1325800.2016, очаговой зоне соответствует совокупность разломной и ближней зон.

Анализом эмпирических данных при создании инструментальной шкалы сейсмической интенсивности, см., например, [Аптикаев, 2012], было установлено, что интенсивность сейсмических колебаний зависит не только от значения пикового ускорения, но и от ширины импульса  $\tau$  (меры продолжительности колебаний). Ширина импульса определяется, как интервал времени, в течение которого уровень огибающей колебаний превышает половину максимального значения. В результате получено эмпирическое уравнение:

$$I = 2.5 \lg PGA + 1.25 \lg \tau + 1.05 \pm 0.35, \quad (3)$$

где  $I$  – сейсмическая интенсивность в баллах,  
 $PGA$  – пиковое ускорение грунта в  $\text{см}/\text{с}^2$ ,  
 $\tau$  – ширина импульса в секундах.

Учитывая особенности затухания пикового ускорения и ширины импульса в различных зонах волнового поля, а также зависимость сейсмического эффекта от параметров колебаний, см. формулу (3), можно составить эмпирические уравнения для оценки интенсивности землетрясения в каждой из зон.

### Интенсивность в разломной зоне

Используются результаты, полученные ранее в [Эртелева, Аптикаев, 2023] и уточненные в настоящей работе. Ускорения в разломной зоне, согласно проведенным ранее исследованиям, вычисляются по формуле:

$$\lg PGA = \lg PGA_0 + 0.4 \lg R^* + 1.2 \pm 0.20, \quad (4)$$

где  $PGA_0$  – ускорение на поверхности разлома, определенное при статистическом анализе данных по сильным движениям грунта (см. Табл. 1);

$R^*$  – нормированное (подобное) расстояние, которое вычисляется по формуле:

$$\lg R^* = \lg R - M / 3, \quad (5)$$

где  $R$  – кратчайшее расстояние до поверхности разлома,  
 $M$  – магнитуда по поверхностным волнам.

При использовании подобных расстояний ускорения уже не зависят от магнитуды. Как и ранее, здесь и далее все приведенные оценки относятся к наибольшей амплитуде на горизонтальной компоненте.

Напомним, что амплитуды ускорений в разломной зоне зависят от механизма очага и не зависят от грунтовых условий: многие авторы отмечают, что вблизи разлома амплитуды на рыхлых грунтах не выше, чем на скальных [Trifunac, 1976; Campbell, 1981; Chiaruttini, Siro, 1981; Аптикаев, 2012]. Резонансные явления, связанные с грунтами, в этой зоне практически отсутствуют [Lee et al., 2015].

Затухания в разломной и ближней зонах существенно различаются. Поэтому граница между этими зонами легко устанавливается на основании точек пересечения уравнений затухания для соседних зон.

Разломной зоне соответствуют расстояния от начальной точки  $R_0^* = 0.001$  до границы с ближней зоной  $R_1^* = 0.015$ .

Значения ускорений 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 <sup>2</sup> / $PGA_0$ , cm/sec <sup>2</sup>	$\lg R_1^*$	$PGA_{\max}$ , см/с <sup>2</sup> / $PGA_{\max}$ , cm/sec <sup>2</sup>
Взброс / Thrust	- 3	290	- 1.814	870
Сдвиг / Strike-slip	- 3	225	- 1.731	735
Сброс /Reset	- 3	170	- 1.634	620

Ширина импульса  $\tau$  в разломной зоне зависит только от магнитуды события и не зависит от грунтовых условий и расстояния. [Эртелева, Аптикаев, 2023]. Ниже приводятся данные о параметрах сейсмического движения грунта, взятые из этой работы. Учтены теоретические представления, согласно которым незначительно меняются коэффициенты при магнитуде:

$$\lg(\tau, c) = M / 3 - 1.61 \pm 0.29. \quad (6)$$

Используя формулы (4) и (6), а также значения  $PGA_0$  из таблицы 1, из формулы (3) получаем:

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.9 + \Delta I \pm 0.35 \text{ для взбросов,} \quad (7)$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.6 + \Delta I \pm 0.35 \text{ для сдвигов,} \quad (8)$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.3 + \Delta I \pm 0.35 \text{ для сбросов.} \quad (9)$$

где  $I$  – сейсмическая интенсивность,  
 $M$  – магнитуда землетрясения,  
 $R^*$  – нормированное кратчайшее расстояние до поверхности разлома,  
 $\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности относится только к несущей способности грунта.

**Интенсивность в ближней зоне**

Под ближней зоной в соответствии с работой [Эртелева, Аптикаев, 2023] понимается зона, где потенциальная энергия деформированных горных пород переходит

в энергию сейсмических колебаний. Параметры колебаний в этой зоне зависят ни от характеристик очага, ни от грунтовых условий. Резонансные явления, связанные с грунтами, практически отсутствуют. Ускорения описываются уравнением:

$$\lg \text{PGA} = 1.8 - 0.63 \lg R^* \pm 0.20. \quad (10)$$

Ширина импульса  $\tau$  в ближней зоне, как и в разломной, определяется магнитудой события, не зависит от грунтовых условий и расстояния [Эртелева, Аптикаев, 2023]: для вычисления продолжительности колебаний используется формула (6).

Тогда, аналогично предыдущему, используя формулы (10), (6) и (3) получаем, что интенсивность в ближней зоне описывается формулой:

$$I = 0.417M - 1.575 \lg R^* + 3.54 + \Delta I \pm 0.35. \quad (11)$$

Напомним, что, как и в предыдущем случае, приращение сейсмической интенсивности  $\Delta I$  относится только к несущей способности грунта.

Затухания в ближней и дальней зонах также существенно различаются. Граница между ними устанавливается по пересечению кривых затухания. Она располагается на расстоянии  $R_2^* = 0.17$  от разлома. По степени затухания в этих зонах можно сделать вывод, что в ближней зоне еще выделяется сейсмическая энергия, а в дальней зоне происходит поглощение этой энергии.

#### Интенсивность в дальней зоне

Ускорения грунта в дальней зоне описываются уравнением:

$$\lg \text{PGA} = 1.165 - 1.4 \lg R^* + C \pm 0.20, \quad (12)$$

где  $C = 0.0$  для грунтов 1-й категории;

$C = 0.196$  для грунтов 2-й категории;

$C = 0.392$  для грунтов 3-й категории.

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

$$\lg(\tau, c) = M/3 - 1.977 + 0.5 \lg R^* + C_2 \pm 0.30, \quad (13)$$

где  $C_2$  – постоянная, отражающая влияние грунтовых условий:

$C_2 = 0.00$  для грунтов 1 категории,

$C_2 = 0.15 - 2$  категории и  $C_2 = 0.55$  для 3 и 4 категорий.

Используя формулы (12) и (13), из формулы (3), получаем соотношения, описывающие затухание сейсмической интенсивности в дальней зоне для грунтов разных категорий по сейсмическим свойствам. Для этого примем во внимание, что по анализу эмпирических данных диапазон приведенных расстояний для грунтов 1-ой категории в дальней зоне определяется соотношением:

$$\lg R = -1.77 + M/3. \quad (14)$$

Последнее выражение определяет границу очага. Переход от ближней зоны к дальней происходит плавно, но для простоты выкладок были формально увеличены границы ближней зоны. Ошибки оценки баллов, вызванные этим упрощением, пренебрежимо малы.

Соотношение для оценки интенсивности в дальней зоне имеет вид:

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.0 \pm 0.40, \text{ грунты 1-й категории,} \quad (15)$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.6 \pm 0.40, \text{ грунты 2-й категории,} \quad (16)$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 3.4 \pm 0.40, \text{ грунты 3-й и 4-й категорий.} \quad (17)$$

Для грунтов 2 категории диапазон приведенных расстояний в дальней зоне определяется соотношением:

$$\lg R^* \geq -0.398. \quad (18)$$

Для грунтов 3 и 4 категорий диапазон приведенных расстояний в дальней зоне определяется соотношением:

$$\lg R^* \geq -0.046. \quad (19)$$

Соединяя воедино полученные результаты, в графическом виде затухание сейсмической интенсивности в инженерном диапазоне показано на рисунке 1 (для случая  $M_S = 7.0$ ).

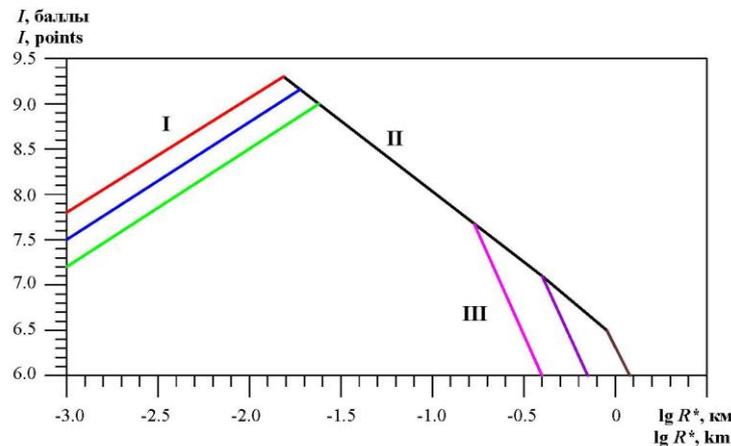


Рис. 1. Затухание сейсмической интенсивности при магнитуде  $M_S = 7.0$ .

Условные обозначения: I – разломная зона, II – ближняя зона, III – дальняя зона.

В разломной зоне: красным цветом изображена кривая затухания интенсивности для взбросов, синим – для сдвигов, зеленым – для сбросов. В дальней зоне розовым цветом изображена кривая затухания интенсивности для грунтов 1-ой категории, фиолетовым цветом – для грунтов 2-ой категории, коричневым – для грунтов 3-ей и 4-ой категорий /

Fig. 1 – Seismic intensity attenuation for earthquake of magnitude  $M_S = 7.0$ .

Legend: I – fault zone; II – near-field zone, III – far-field zone. In the fault zone a red line is the attenuation curve for thrust, blue line – for strike-slip, green line – for normal fault.

In the far-field zone a pink line indicates the attenuation curve for the grounds of 1 category (rock), a violet line – for the grounds of 2 category (intermediate grounds), a brown line – for the grounds of 3 and 4 categories (soft grounds)

## Обсуждение результатов

Полученные в данном исследовании расчетные формулы (7)–(9), (11), (14)–(16) основаны на установленной ранее связи величины интенсивности с пиковым ускорением грунта и шириной импульса (мера продолжительности колебаний) в ускорениях, а также на корреляционных соотношениях, описывающих законы затухания этих количественных характеристик сейсмических колебаний в зонах, выделенных по анализу эмпирических данных в волновом поле сейсмических колебаний.

Заметим, что и другие характеристики сейсмических колебаний – амплитуды скоростей и смещений, соответствующие преобладающие периоды и спектральный

состав, также коррелируются с сейсмической интенсивностью. Поиск таких зависимостей проводился еще в 20 веке. Например, в работе [Плетнев и др., 1975] значение сейсмической интенсивности коррелировалось с пиковым ускорением, длительностью и преобладающим периодом колебаний. В экспериментальных работах Николаева А.В. [Николаев, 1967] было показано, что приращение интенсивности более тесно связано не с амплитудами колебаний, а с прочностными свойствами грунтов. Этот факт находит свое подтверждение и в данном исследовании.

Принципиальное отличие предложенного и реализованного в настоящей работе подхода состоит в учете зональности волнового поля сейсмических колебаний. Параметры сейсмических колебаний в каждой из зон подчиняются своим закономерностям генерации и распространения. Как установлено в данном исследовании, схожие закономерности свойственны и макросейсмическому полю. Так, см. рис. 1, максимальное значение интенсивности наблюдается не на разломе, а на некотором расстоянии от него, как и в случае с пиковым ускорением. Заметим, что в представленной работе не рассматривалась сейсмическая интенсивность, связанная с остаточными деформациями на самом разломе.

В полученных уравнениях учтено влияние грунтовых условий на сейсмическую интенсивность – член  $\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности, определяемое по результатам СМР. Традиционно считается, что под влиянием грунтовых условий меняются амплитуды колебаний, увеличивая или уменьшая сейсмический эффект. В данной работе показано, что в очаговой зоне приращение сейсмической интенсивности относится не к параметрам сейсмических колебаний, а к несущей способности грунтов: (трещины, просадки, разжижение, вибропогружение зданий в грунт). Снижение прочности на срез в несколько раз (в горизонтальной плоскости) происходит при вертикальных колебаниях свыше 0.1 g [Окамото, 1961; Ross et al., 1975]. Учет этого приращения – задача механики грунтов.

В дальней зоне ускорения малы, и грунты редко заметно теряют свою несущую способность. В этой зоне, как показали эмпирические данные, половина приращения интенсивности связана с увеличением амплитуды ускорений, а вторая половина – с увеличением продолжительности колебаний.

Вопрос о том, насколько существенны региональные различия для предложенной системы уравнений интенсивности, тесно связан с вопросом о существовании региональных различий законов затухания ускорений и других параметров колебаний. Разработанные авторами кривые затухания ускорений были применены в различных регионах мира – России, Ирана, Индии, Китая. Во всех случаях различия в оценках ускорений находятся в пределах стандартных отклонений. Следовательно, можно сделать вывод, что установленные закономерности затухания ускорений не связаны с региональными различиями. Такой же вывод можно найти и в работе [Vommer et al., 2010]. Полученные различными авторами региональные различия в уравнениях затухания – результат попыток построить одну кривую для всех зон. Очевидно, что в таком случае эмпирические коэффициенты уравнений определяются количеством данных в различных зонах. Аналогично решается вопрос о региональных различиях и для других параметров колебаний и, следовательно, сейсмической интенсивности.

Если погрешность оценок интенсивности для классических уравнений макросейсмического поля составляет 0.6 балла, то разработка уравнений для отдельных регионов позволила понизить погрешность примерно до 0.5 балла, см., например,

[Соломатин, 2013; Фролова и др., 2019 и др.]. В соответствии с формулами, полученными в данном исследовании, погрешность оценок интенсивности составляет 0.35 балла для разломной и ближней зон и 0.40 балла для дальней зоны. Увеличение погрешности для дальней зоны связано с большим разнообразием исходных данных в этой зоне. Повышение точности оценок сейсмической интенсивности по сравнению с семейством классических уравнений макросейсмического поля достигается как за счет учета влияния продолжительности колебаний (такие попытки известны), так и за счет отдельной оценки этих параметров в различных зонах.

В данной работе был рассмотрен достаточно представительный материал, позволяющий учесть влияние амплитуды ускорения и продолжительности колебаний. Возможно построение и других эмпирических уравнений, например, связывающих сейсмическую интенсивность с мощностью сейсмических колебаний в виде:

$$I = f(\lg \text{PGA} + \lg \text{PGV}). \quad (20)$$

Ожидаемая среднеквадратичная погрешность около 0.3 балла. Еще большую точность можно ожидать от учета энергии сейсмических колебаний вида:

$$I = f(\lg \text{PGA} + \lg \text{PGV} + \lg \tau). \quad (21)$$

Примеры практического применения системы полученных уравнений и сравнение результатов с макросейсмическими данными конкретных сейсмических событий не приводятся в данной работе, так как подобное сравнение (исследоваться должны все 7 уравнений!) потребовало бы значительного увеличения объема статьи и является темой для отдельной публикации.

## Выводы

Применяя статистические методы обработки эмпирических данных и учитывая связь сейсмической интенсивности с величиной пикового ускорения грунта и ширины импульса – меры продолжительности колебаний, разработаны уравнения затухания сейсмической интенсивности в различных зонах: разломной, ближней и дальней с учетом механизма очага и грунтовых условий.

Разломная зона.

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.9 + \Delta I \pm 0.35, \text{ механизм очага взброс,}$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.6 + \Delta I \pm 0.35, \text{ механизм очага сдвиг,}$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.3 + \Delta I \pm 0.35, \text{ механизм очага сброс.}$$

Ближняя зона.

$$I = 0.417M - 1.575 \lg R^* + 3.54 + \Delta I \pm 0.3.$$

Дальняя зона.

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.0 \pm 0.40, \text{ грунты 1-й категории,}$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.6 \pm 0.40, \text{ грунты 2-й категории,}$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 3.4 \pm 0.40, \text{ грунты 3-й и 4-й категорий,}$$

где  $I$  – сейсмическая интенсивность,

$M$  – магнитуда землетрясения,

$\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности.

$R^*$  – нормированное кратчайшее расстояние до поверхности разлома, определяемое по формуле:  $\lg R^* = \lg R - M/3$ , где  $R$  – кратчайшее расстояние до поверхности разлома.

При примененной методике отдельных оценок интенсивности, величина погрешности уменьшилась до 0.35 балла для разломной и ближней зон и 0.40 балла для дальней зоны.

Разработанные уравнения затухания интенсивности являются среднемировыми. При этом описываемые ими закономерности не подвержены региональным различиям.

Структура макросейсмического поля сложнее, чем это принято считать в классической сейсмологии. В разломной зоне происходит не спад, а нарастание интенсивности. Максимум интенсивности должен наблюдаться на некотором удалении от разлома, на границе разломной и ближней зон. Затем начинается затухание интенсивности, связанное с геометрическим расхождением волнового фронта. В дальней зоне затухание сейсмической интенсивности резко возрастает.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что, поскольку в очаговой зоне параметры сейсмического движения грунта практически не зависят от грунтовых условий, приращение сейсмической интенсивности происходит вследствие изменения несущей способности грунта. Следовательно, в практике сейсмостойкого строительства необходима их техническая мелиорация.

Разработанные уравнения затухания сейсмической интенсивности могут быть применены в теоретических исследованиях для развития методов прогноза землетрясений и прогноза сейсмических воздействий. Использование этих уравнений будет способствовать повышению точности прогнозных оценок ожидаемых сейсмических воздействий.

## Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. – 175 с.
2. Аптикаев Ф.Ф., Копничев Ю.Ф. Учет механизма очага при прогнозе параметров сильных движений. // Доклады академии наук СССР. – 1979. – Т. 247. № 4. – С. 822–825.
3. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл – магнитуда – расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге. // Вулканология и сейсмология. – 1999. – №№ 4-5. – С. 29–40.
4. Джанузакв К.Дж. Региональные особенности затухания интенсивности сотрясений сильных землетрясений Кыргызстана и прилегающих к нему районов. // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2013. – № 2. – С. 13 – 18.
5. Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А., Ашуров С.Х. О различиях в оценках сейсмической опасности территории Узбекистана при применении вероятностно-детерминистического и вероятностного подходов. // Проблемы сейсмологии. – 2022. – Т. 4. № 2. – С. 5–18.
6. Кузин И.П. Соотношения между макросейсмической интенсивностью в баллах и параметрами сейсмического воздействия при сильных землетрясениях. // Физика Земли. – 2002. – № 4. – С. 99–106.
7. Николаев А.В. Сейсмические свойства рыхлой среды. // Физика Земли. – 1967. – № 2. – С. 23–31.
8. Окамото Ш. Несущая способность песчаного грунта и горизонтальное давление земли во время землетрясения. // Международная конференция по сейсмостойкому строительству в Сан-Франциско. 1956. Сборник статей. / Пер. с англ. В.А. Быховского. М.: Госстройиздат, 1961. – 367 с.
9. Плетнев К.Г., Роман А.А., Шебакин Н.В. Корреляция между параметрами колебаний и балльностью по данным повторных толчков Дагестанского землетрясения 1970 г. // Бюллетень инженерной сейсмологии. – 1975. – № 9. – С. 5–14.

10. Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П. Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2020. – Т. 47. № 4. – С. 5–25.
11. Потапов В.А., Чернов Е.А. Уравнение макросейсмического поля с конвергентным решением. // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. № 8. – С. 881–888.
12. Соломатин А.В. Построение уточненной модели уравнения макросейсмического поля для землетрясений Курило-Камчатского региона. Интерполяционный и регрессионный подходы. // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2013. – Т. 6. № 1. – С. 30–42.
13. 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. – Т. 13. № 1. – С. 59–75.
14. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений. // Геоэкология. – 2019. – № 5. – С. 23–37.
15. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на примере землетрясений в Албании. // Геоэкология. – 2020. – № 5. – С. 62–77.
16. Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. // Сейсмическое районирование СССР. / Под ред. С.В. Медведева. М.: Наука, 1968. – Глава шестая. – С. 95–111.
17. Шебалин Н.В. Соотношение между балльностью и интенсивностью землетрясений в зависимости от глубины очага. // Бюллетень Совета по сейсмологии. – 1957. – № 4.
18. Эртелева О.О., Аптикаев Ф.Ф. Модель очаговой зоны землетрясения и прогноз параметров сильных движений грунта. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 71–84.
19. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Models of the macroseismic field earthquakes and their influence on seismic hazard assessment values for Central Asia. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2020. – Vol. 11. No. 3. – pp. 606–623.
20. Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrakhmatov K., Muraliev A., Zschau J. Intensity Prediction Equations for Central Asia. // *Geophysical Journal International*. – 2011. – Vol. 187. No. 1. – pp. 327–337.
21. Blake A. Mathematical problems in seismology. // *Transactions of the American Geophysical Union*. – 1940.
22. Bommer J.J., Stafford P.J., Akkar S. Current empirical ground-motion prediction equations for Europe and their application to Eurocode 8. // *Bulletin Earthquake Engineering*. – 2010. – Vol. 8. No. 1. – pp. 5–26.
23. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1981. – Vol. 71. No. 6. pp. 2039–2070.
24. Chiaruttini C., Siro L. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpide belt. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1981. – Vol. 71. No. 6. – pp. 1993–2009.
25. Lee V.W., Manić M., Bulajić B., Herak D., Herak M., Stojković M., Trifunac M.D. Microzonation of Banja Luka for performance – based earthquake – resistant design. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 78. – pp. 71–88.
26. Murphy J., O'Brien L. The correlation of peak acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1977. – Vol. 67. No. 3. – pp. 877–915.
27. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. Seattle: University of Washington Press, 1954. – 77 p.
28. Ross G.A., Seed H.B., Migliaccio R.R. Bridge foundation behavior in Alaska Earthquake. // *J. of the Soil Mech. and Found. Div. Proc ASCE (JSMF)*. – 1975. 9B. № SM4, July.

29. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. // Freiburger Forschungshefte. C88. Berlin: Akademie Verlag, 1960. – 117 p.

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. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1976. – Vol. 66. No. 1. – pp. 189–219.

31. von Kövesligethy R. Seismischer Starkgrad und Intensität der Beben. // Beiträge zur Geophys. – 1907. – Vol. VIII. – pp. 22–29.

## References

1. Aptikaev F.F. Instrumental seismic intensity scale. Moscow. Science and Education. 2012. 175 p. (In Russ.)

2. Aptikaev F.F., Kopnichev Yu.F. Taking account of the mechanism of earthquake focus when predicting the parameters of strong movements. Doklady Earth Sciences USSR. 1979. Vol. 247. No. 4. pp. 822 – 825. (In Russ.)

3. Gusev A.A., Shumilina L.S. Fitting empirical macroseismic trends by theoretical relationships based on non-coherently radiating fault model. Vulcanology and Seismology. 1999. Nos. 4-5. pp. 29-40. (In Russ.)

4. Januzakov K.J. Regional features of an attenuation of strong earthquakes intensity in the Kyrgyzstan and its adjacent regions. Bulletin of the Institute of Seismology of NAS KR. 2013. No. 2. pp. 13–18. (In Russ.)

5. Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzayev M.A., Ashurov S.X. About the differences in seismic hazard assessments of the Uzbekistan's territory in the application of probabilistic deterministic and probabilistic approaches. Problems of seismology. 2022. Vol. 4. No. 2. pp. 5–18. (In Russ.)

6. Kuzin I.P. Relationships between macroseismic intensity in points and parameters of seismic impact during strong earthquakes. Physics of the Solid Earth. 2002. No. 4. pp. 99–106. (In Russ.)

7. Nikolaev A.V. Seismic properties of loose medium. Physics of the Solid Earth. 1967. No. 2. pp. 23–31. (In Russ.)

8. Okamoto Sh. Bearing capacity of sandy ground and horizontal earth pressure during an earthquake. In: International Conference on Earthquake Engineering, San-Francisco 1956. Transl. V.A. Bykhovsky. Moscow. Gosstroyizdat. 1961. 367 p. (In Russ.)

9. Pletnev K.G., Roman A.A., Shebalin N.V. Correlation between vibration parameters and intensity according to aftershock data of the 1970 Dagestan earthquake. Bulletin of Engineering Seismology. 1975. No. 9. pp. 5–14. (In Russ.)

10. Petrova N.V., Dyagilev R.A., Gabsatarova I.P. Features of seismic effect attenuation of the Russian platform and Ural earthquakes. Problems of Engineering Seismology. 2020. Vol. 47. No. 4. pp. 5–25. (In Russ.)

11. Potapov V.A., Chernov E.A. A macroseismic equation with a convergent solution. Geology and Geophysics. 2007. Vol. 48. No. 8. pp. 881–888. (In Russ.)

12. Solomatin A.V. The refined model of the macroseismic field for the Kurile – Kamchatka region earthquakes equation definition. Interpolation and regression approaches. Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences. 2013. Vol. 6. No. 1. pp. 30–42. (In Russ.)

13. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of vibrations in the soil stratum. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 59–75. (In Russ.)

14. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Petrova N.V., Ugarov A.N., Malaeva N.S. Influence of shaking intensity attenuation peculiarities on reliability of earthquake loss estimation in emergency mode. Geoecology. 2019. No. 5. pp. 23–37. (In Russ.)

15. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. Calibration of seismic intensity attenuation model by the example of earthquakes in Albania. Geoecology. 2020. No. 5. pp. 62–77. (In Russ.)

16. Shebalin N.V. Procedures of engineering seismological data application for seismic zoning. Seismic zoning of the USSR. Ed. S.V. Medvedev. Moscow. Nauka. 1968. Chapter 6<sup>th</sup>. pp. 95–111. (In Russ.)
17. Shebalin N.V. The relationship between the magnitude and intensity of earthquakes depending on the depth of the source. Bulletin of the Seismology Council. 1957. No. 4. (In Russ.)
18. Erteleva O.O., Aptikaev F.F. Earthquake source zone model and prediction of strong ground motion parameters. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 71–84. (In Russ.)
19. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Models of the macroseismic field earthquakes and their influence on seismic hazard assessment values for Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. Vol. 11. No. 3. pp. 606–623.
20. Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrakhmatov K., Muraliev A., Zschau J. Intensity Prediction Equations for Central Asia. *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 187. No. 1. pp. 327–337.
21. Blake A. Mathematical problems in seismology. Transactions of the American Geophysical Union. 1940.
22. Bommer J.J., Stafford P.J., Akkar S. Current empirical ground-motion prediction equations for Europe and their application to Eurocode 8. *Bulletin Earthquake Engineering*. 2010. Vol. 8. No. 1. pp. 5–26.
23. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1981. Vol. 71. No. 6. pp. 2039–2070.
24. Chiaruttini C., Siro L. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpide belt. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1981. Vol. 71. No. 6. pp. 1993–2009.
25. Lee V.W., Manić M., Bulajić B., Herak D., Herak M., Stojković M., Trifunac M.D. Microzonation of Banja Luka for performance – based earthquake – resistant design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 78. pp. 71–88.
26. Murphy J., O'Brien L. The correlation of peak acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1977. Vol. 67. No. 3. pp. 877–915.
27. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. Seattle: University of Washington Press. 1954. 77 p.
28. Ross G.A., Seed H.B., Migliaccio R.R. Bridge foundation behavior in Alaska Earthquake. *J. of the Soil Mech. and Found. Div. Proc ASCE (JSMF)*. 1975. 9B. № SM4, July.
29. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. *Freiberger Forschungshefte*. C88. Berlin: Akademie Verlag. 1960. 117 p.
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. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1976. Vol. 66. No. 1. pp. 189–219.
31. von Kövesligethy R. Seismischer Starkgrad und Intensität der Beben. *Beiträge zur Geophys.* 1907. Vol. VIII. pp. 22–29.

УДК 550.34

DOI: DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f

Оригинальная статья

## Разрядка сейсмотектонических напряжений Восточно-Турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. $M_w = 7.8$ как процесс деструкции геологической среды очаговой области

Э.Г. Геодакян <sup>1,3</sup>, Дж.К. Карапетян <sup>1,3</sup>, В.Б. Заалишвили <sup>2</sup>, М.А. Мкртчян <sup>1</sup>,  
Б.В. Саакян <sup>1</sup>, С.М. Оганесян <sup>1,3</sup>, Р.К. Карапетян <sup>1</sup>, Г.А. Мкртчян <sup>1</sup>

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

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

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

Статья поступила: 13.06.2024, доработана: 30.07.2024, принята к публикации: 31.07.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Разрушительные землетрясения, возникшие в юго-восточной части крупного Восточно-Анатолийского трансформного разлома в феврале 2023 г., соответственно с магнитудами  $M_w=7.8$ , 7.5 и 6.3, являются наиболее сильными сейсмическими событиями, произошедшими за последнее столетие в области сочленения Евроазиатской, Африканской и Аравийской литосферных макроклит. Следует особо отметить, что такие разрушительные и сильные землетрясения в сейсмоактивных регионах возникают крайне редко. Детальные исследования очаговых зон, процессов разрывообразования и релаксации тектонических напряжений в виде афтершоков таких землетрясений, являются актуальными научными задачами, позволяющими внести существенный вклад в понятие сейсмогенеза конкретного региона и решение фундаментальных проблем изучения физики очага землетрясения в целом. **Цель работы.** В настоящей работе поставлена цель на основе пространственно-временного и энергетического распределения афтершокового процесса, оценить напряженно-деформированное состояние, выявить основные закономерности и характерные особенности процесса деструкции геологической среды очаговой области сильнейшего Газиантепского землетрясения с магнитудой  $M_w=7.8$ . **Методы.** Для изучения процесса деструкции нами применены сформированные на современном этапе научные и методические представления о протяженных глубинных разломах как объемных геологических телах имеющих трехмерное измерение (протяженность, ширина разлома, и глубина его проникновения в литосферу), характеризующихся определенной внутренней структурой, параметрами и кинематикой движения крыльев. Для осуществления пространственного распределения афтершоков применены топологические методы перколяционного и кластерного анализа сейсмостатистических данных повторных толчков. **Результаты.** Полученные результаты позволили определить количественные, пространственно-временные параметры комплексной тектонофизической модели и выявить характер деструкции геологической среды и общую картину сейсмогенеза очаговой области. Периодически возникающие на протяженных региональных разломах области краткосрочных геодинамических активизаций можно принять, как очаговые зоны подготовки и возникновения крупных землетрясений. Такой подход вносит существенный вклад в решение проблем долгосрочного прогнозирования землетрясений и рассматривает региональную сейсмичность с позиций современной геодинамики.

**Ключевые слова:** очаг землетрясения, афтершок, разрывообразование, кластер, деструкция.

**Для цитирования:** Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Мкртчян М.А., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Карапетян Р.К., Мкртчян Г.А. Разрядка сейсмотектонических напряжений Восточно-Турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г.  $M_w = 7.8$  как процесс деструкции геологической среды очаговой области. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 71-84. DOI: DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f

---

---

GEOPHYSICS

---

---

DOI: DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f

Original paper

## Release of seismotectonic stresses of the Eastern Turkey earthquake on 06 February 2023 $M_w = 7.8$ as a destruction process in focal area

E.G. Geodakyan <sup>1,3</sup>, J.K. Karapetyan <sup>1,3</sup>, V.B. Zaalishvili <sup>2</sup>, M.A. Mkrтчян <sup>1</sup>, B.V. Sahakyan <sup>1</sup>, S.M. Hovhannisyan <sup>1,3</sup>, R.K. Karapetyan <sup>1</sup>, G.A. Mkrтчян <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation;

<sup>3</sup> International Scientific and Educational Center of NAS RA, 24 Marshal Baghramyan Str., Yerevan 0019, Republic of Armenia, e-mail: geodakyan.e@mail.ru

*Received: 13.06.2024, revised: 30.07.2024, accepted: 31.07.2024*

**Abstract: Relevance.** The destructive earthquakes that took place in the southeastern part of the large East Anatolian transform fault (EAF) in February 2023, with magnitudes  $M_w = 7.8, 7.5$  and  $6.3$ , respectively, are the major seismic events that have occurred over the last century in the junction area of the Eurasian, African and Arabian lithospheric macroplates. It should be outlined that such destructive and large earthquakes are extremely rare in seismically active regions. A detailed study of earthquake focal zones as well as the processes of rupture formation and relaxation of tectonic stresses in the form of aftershocks of such earthquakes are relevant scientific problems that make it possible for making a significant contribution to the seismogenesis concept of a particular region and finding solutions to fundamental problems in the study of the physics of the earthquake source in general. **Aim.** The paper aims to assess the stress-strain state, identify the main patterns and characteristic features of the destruction process for the geoenvironment in the focal area of the largest Gaziantep earthquake with a magnitude of  $M_w=7.8$  based on the spatial-temporal and energy distribution of the aftershock process. **Methods.** In order to study the destruction process, we have currently formed scientific and methodological ideas about extended deep faults as volumetric geological bodies with three-dimensional measurements (fault length, width and depth of penetration into the lithosphere), characterized by a certain internal structure, parameters and kinematics of wing movement. To carry out the spatial distribution of aftershocks, topological methods of percolation and cluster analysis of seismic statistical data of aftershocks were applied. **Results.** Based on the obtained results it was possible to determine the quantitative, spatiotemporal parameters of the complex tectonophysical model and to identify the nature of the destruction of the geological environment and the overall picture of the seismogenesis in the focal zone of the earthquake. The areas of short-term geodynamic activation that periodically occur on extended regional faults can be considered as hypocenters for the preparation and occurrence of large earthquakes. This approach makes a significant input to solving problems of long-term earthquake forecasting, and considering regional seismicity from the perspective of modern geodynamics.

**Keywords:** earthquake source, aftershock, rupture formation, cluster, destruction.

**For citation:** Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Mkrtchyan M.A., Sahakyan B.V., Hovhannisyanyan S.M., Karapetyan R.K., Mkrtchyan G.A. Release of seismotectonic stresses of the Eastern Turkey earthquake on 06 February 2023  $M_w = 7.8$  as a destruction process in focal area. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 71-84. DOI: DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f

## Введение

Разрушительные землетрясения, возникшие в юго-восточной части крупного Восточно-Анатолийского трансформного разлома/East Anatolian Fault (ВАР/ЕАФ) в феврале 2023 г., соответственно с магнитудами  $M_w = 7.8$ , 7.5 и 6.3, являются наиболее сильными сейсмическими событиями, произошедшими за последнее столетие 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 приграничной к ней территории Сирии. Произошедшие землетрясения сопровождались интенсивными процессами повторных толчков – афтершоками и стали объектами детального изучения со стороны ведущих мировых сейсмологических центров. Следует особо отметить, что такие разрушительные и сильные землетрясения в сейсмоактивных регионах возникают крайне редко. Детальное исследование очаговых зон сильнейших землетрясений, процессов их разрывообразования и релаксации тектонических напряжений в виде афтершоков, являются актуальными научными задачами, позволяющими внести существенный вклад в понятие сейсмогенеза конкретного региона и решение фундаментальных проблем изучения физики очага землетрясения в целом. Исследование развития афтершоковых процессов представляет особый научный интерес, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние разрывной зоны, разрядку остаточных деформаций в очаговой области, а также выявить модели релаксации в различных фазах афтершоковой последовательности, как процесс деструкции геологической среды.

**Цель работы.** В настоящей работе поставлена цель, на основе пространственно-энергетического распределения магистрального разрывообразования и его афтершокового процесса, оценить напряженно-деформированное состояние, выявить основные закономерности и характерные особенности процесса деструкции геологической среды очаговой области Газиантепского землетрясения.

## Методические подходы

На основе фундаментальных работ в области геомеханики [Пиотровский, 1964; Садовский, 1979], где геологическая среда рассматривается как иерархическая самоорганизованная блочная система, на современном этапе развития исследований в этом направлении разработаны новые, научные и методологические подходы для изучения разрушений сплошности сред с позиции физической мезомеханики [Панин, 1998; Гольдин, 2002; Кочарян, Кишкина, 2020]. Согласно этому подходу установлено, что возникающие в геологических средах хрупкие и пластические деформационные разрушения, являются иерархически многоуровневым коллективным процессом [Макаров, 1998, 1999, 2004; Makarov, 2011; Кочарян, Спивак, 2003; Leonov et al., 2020].

К настоящему времени сформировалось представление о протяженных глубинных разломах, как объемных геологических телах имеющих трехмерное измерение

(протяженность разлома, ширина и глубина проникновения в литосферу), характеризующихся определенной внутренней структурой, параметрами и кинематикой движения крыльев [Kocharyan, Ostapchuk, 2023]. Ширина этого объема представляет собой область динамического влияния разлома. Она в свою очередь подразделяется на 3 зоны: 1-ая зона – магистральный разрыв, в которой протекает интенсивное деформирование и дробление пород, 2-ая зона – повышенной трещиноватости вызванная движением по сместителю, 3-ья зона – разграничивающая незначительные вариации напряженного состояния от области неразрушенных горных пород. По глубине проникновения в литосферу в «разломе тела» отражается изменение релогических свойств среды, позволяющее выделить пять зон: 1 и 2 – хрупкого и квазихрупкого разрушения, 3, 4 и 5 – квазипластического, пластического и вязкого течения. Границы этих зон при постепенном переходе от одной зоны к другой неотчетливы. Границы глубин зависят от геодинамического режима, типов напряженного состояния литосферы и генетически связанных с ним морфологических разновидностей разлома [Шерман, 2004, 2012]. На этой основе разработана стационарная пространственная модель зональной структуры глубинного разлома [Spivak, Tsvetkov, 2009; Spivak, 2011]. В дальнейшем в этой модели введено понятие «сейсмогенная ширина разломной зоны» включающее магистральный разрыв и линейную область наибольшей концентрации афтершоков, в которых сосредоточена основная часть землетрясений, приуроченных к рассматриваемой структурной единице [Kocharyan et al., 2010].

Приведенные методологические подходы применены для достижения поставленной цели.

### Информационная база данных

В очаговых зонах Восточно-Турецких землетрясений, по данным информационных бюллетеней Euro-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) (<https://www.emsc-csem.org>) за период с 06.02.2023 г. по 31.12.2023 г., с высокой точностью локации по пространству и глубине залегания гипоцентров уже произошло более 15 000 афтершоков в магнитудном диапазоне  $M=1.8\div 6,7$ .

Пространственное распределение эпицентров афтершоков этих трех землетрясений, приведенное на рисунке 1, показывает, что область разрядки остаточных тектонических напряжений в геологической среде очаговых зон, имеет обширную площадь порядка  $S\approx 30000$  км<sup>2</sup>.

Выделенная сводная афтершоковая область имеет сложную геометрическую конфигурацию, охватывающую значительную часть протяженного, трансрегионального Восточно-Анатолийского разлома первого ранга и области дизъюнктивных узлов его сочленения с иерархически более низкими по рангу Сургутским и Левантинским разломами. В центральной части четко выделяется узкая протяженная зона афтершоков Газиантепского землетрясения, на северо-восточный и юго-западный края которой, соответственно, наложены участки афтершоковых полей Каграманмарашского и Латакийского землетрясений. В этой зоне Восточно-Анатолийский разлом имеет сложную структуру геолого-тектонического строения, состоящую из ступенчато-кулисообразных сегментов разрывных нарушений. Непосредственное расположение в этой системе магистрального разрываообразования, представляющего собой билатерально направленный многоактовый нелинейный

процесс [Геодакян и др., 2023; Mai et al., 2023; Baltzopoulos et al., 2023], высвобождение накопленных основных напряжений и релаксация остаточных деформаций, в виде афтершоков, являются характерными критериями, позволяющими рассматривать этот процесс как единую кратковременную деструкцию протяженного, трансрегионального, глубинного сейсмогенного разлома.

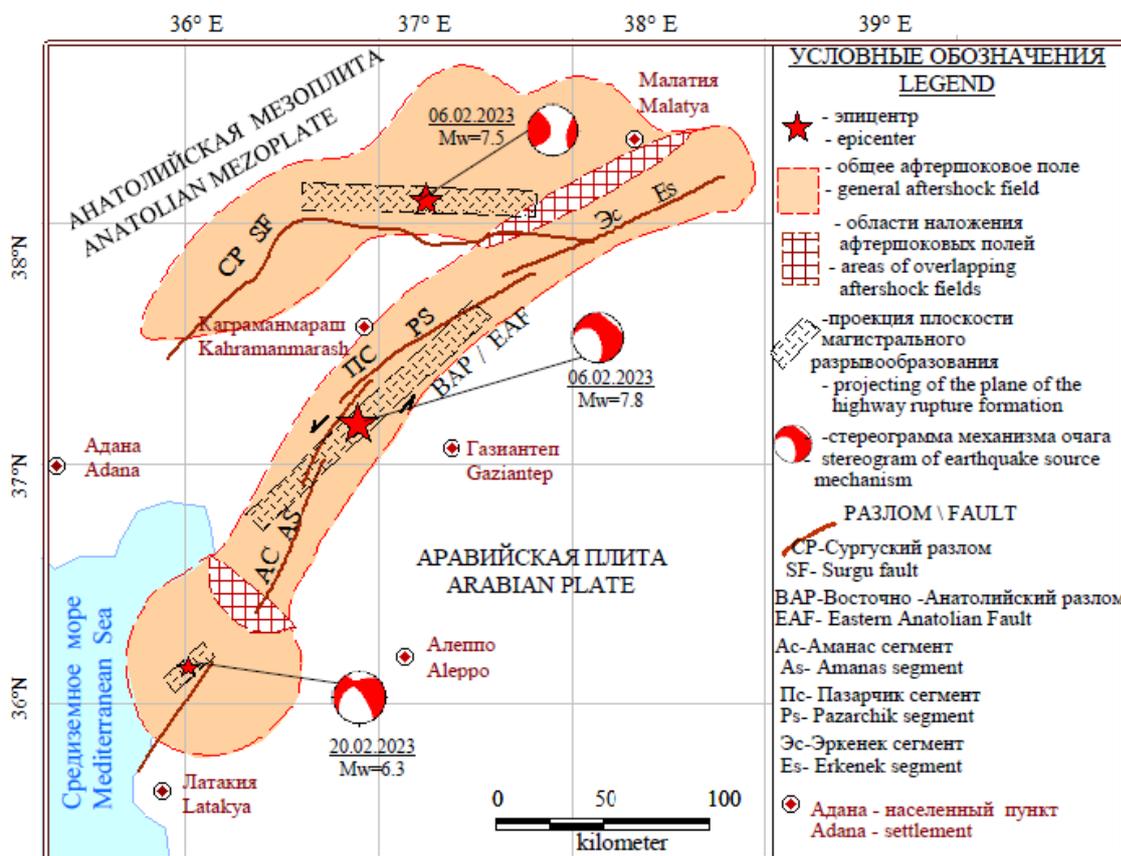


Рис. 1. Сводная карта афтершоковых полей Восточно-Турецких землетрясений /

Fig. 1. Consolidated map of aftershock areas of Eastern-Turkish earthquakes

Для выполнения поставленной цели из общего массива афтершокового потока путем применения метода оценки величины радиуса пространственного группирования землетрясений  $R_{кр}$  – так называемого «нулевого алгоритма» кластерного анализа [Дещеревский и др., 2016] отфильтрованы афтершоки непосредственно приуроченные к очагам Каграманмарашского и Латакийского землетрясений. Количество афтершоков, непосредственно связанных с очагом Газиантепского землетрясения, составляет около 7000 событий с магнитудным диапазоном  $M=1.8\div 6.7$ . Следует отметить, что через 11 минут, после основного толчка, произошел афтершок, с магнитудой  $M_w=6.7$ , уступающий по величине магнитуды основному толчку ( $\Delta M=1.1$ ), который согласно закону Бата является сильнейшим афтершоком данного землетрясения [Bath, 1965].

Для детального анализа афтершокового процесса нами был сгруппирован весь массив исходных афтершоковых данных с шагом по фрактальности энергии  $\Delta M=0.5$  и по глубине залегания афтершоков с интервалом  $\Delta h=5\text{ км}$  (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Распределение количества афтершоков по магнитуде и глубине /  
Distribution of the number of aftershocks according to magnitude and to depth**

Глубина(км) / Depth (km)	Количество афтершоков (N) по магнитуде (M) / Number of aftershocks (N) by magnitude (M)										Общее количество/ Total quantity $\Sigma N$
	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	
5	1049	1371	957	441	159	54	12	4	-	-	4047
10	928	666	335	140	59	42	15	5	1	1	2192
15	194	99	43	14	4	5	4	-	-	-	363
20	85	34	15	6	6	10	1	0	1	-	158
25	30	14	10	6	4	1	-	-	-	-	65
30	19	9	11	2	-	3	-	-	-	-	44
35	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	4
40	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	2
40+	1	1	-	1	-	3	-	-	-	-	6
$\Sigma N$	2307	2195	1372	611	232	120	32	9	2	1	6881

Результаты исследований

Для определения минимального порогового уровня ( $M_{\min}$ ) представительности исходных данных по магнитуде применен закон Гутенберга-Рихтера. На рисунке 2 представлены графики повторяемости афтершокового процесса распределения количества ( $\lg N$ ,  $\lg \Sigma N$ ) повторных толчков по магнитуде. По графику повторяемости определен коэффициент наклона графика повторяемости  $b=0.9$  и представительный минимальный магнитудный уровень  $M_{\min}=2.5$ .

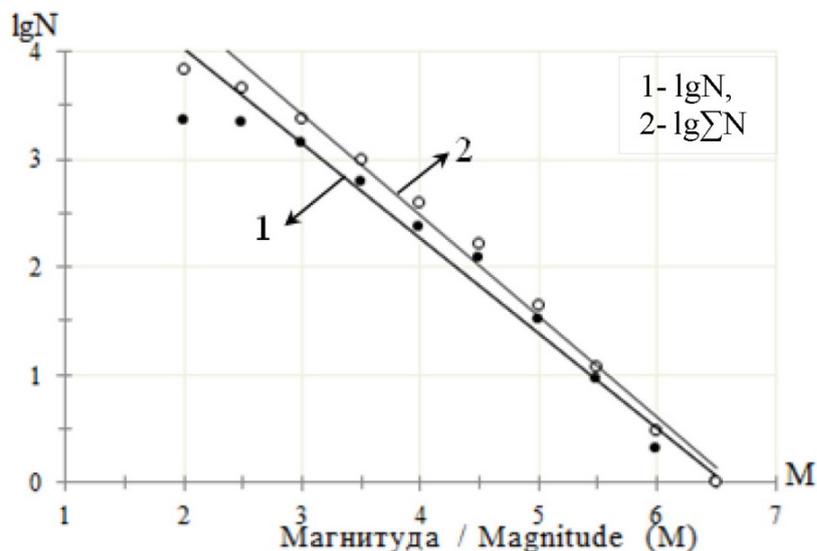


Рис. 2. График повторяемости афтершокового процесса Газиянтепского землетрясения /

Fig. 2. Recurrence period graph of the aftershock process Gaziantep earthquake

Следует отметить, что на графике наблюдается дефицит количества возникновения афтершоков в магнитудном диапазоне с  $m=5.5 \div 6.5$ , который по нашему мнению будет заполнен в ходе дальнейшего развития афтершокового процесса данного землетрясения.

Для анализа пространственного распределения эпицентров афтершоков была применена программа MapInfo в пакете GIS, с помощью которой построена карта эпицентров афтершоков Газиантепского землетрясения, за вышеуказанный период (рис. 3).

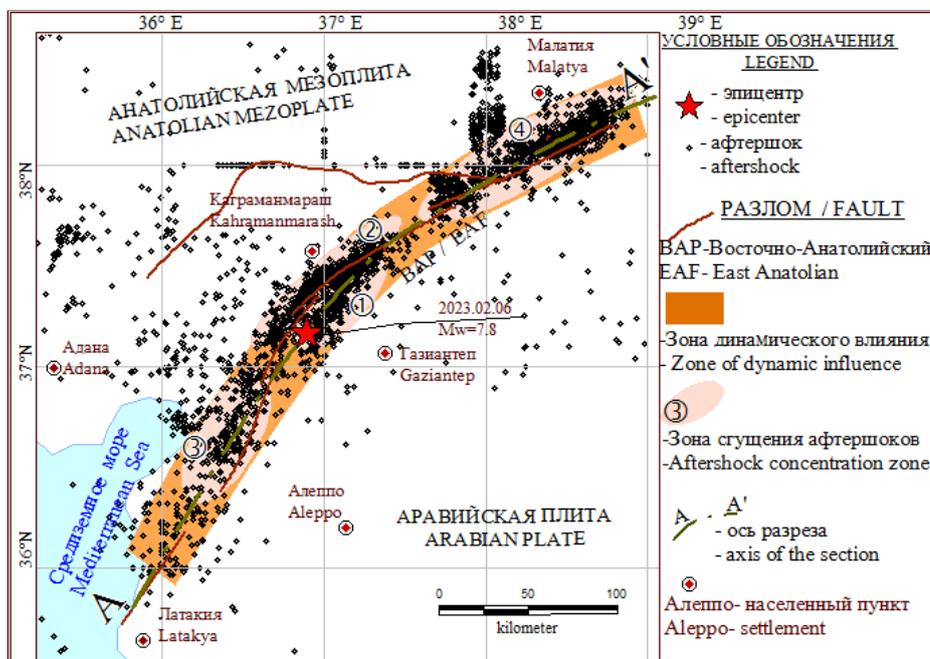


Рис. 3. Геотектоника ВАР и афтершоковое поле Газиантепского землетрясения /

Fig. 3. Geotectonics of VAF and the aftershock area of the Gaziantep earthquake

Афтершоковое поле по латерали имеет вид протяженной полосы с длиной  $L=300\div 350$  км, шириной  $W=30\div 35$  км и общей площадью  $S\approx 12000$  км<sup>2</sup>. Оно полностью охватывает магистральный разрыв и систему геолого-тектонических структур эпицентральной области, разделяющие Анатолийскую плиту от Аравийской макроплиты. Следует отметить, что плотность распределения афтершоков как по ширине, так и по протяженности, крайне неравномерная.

В работе [Kocharyan et al., 2010, 2011] приведена регрессивная зависимость (1) ширины разломной зоны от ее протяженности:

$$W = 0.85 \cdot L^{0.42}, \quad (1)$$

где  $w$  – ширина разломной зоны (км),

$L$  – протяженность разлома (км).

Для Восточно-Анатолийского разлома (ВАР) с протяженностью  $L_{\text{ВАР}}=700$  км, расчетная ширина сейсмогенной зоны составляет  $w_{\text{расч.}}=26$  км. Это значение хорошо согласуется с приведенной на рис. 3 шириной экспериментальных данных афтершокового поля  $w_{\text{афт.}}=32$  км.

Разность отклонений этих величин  $\Delta w=6$  км, по всей вероятности связана с фокальным механизмом угла падения плоскости сместителя разрыва очага по  $\text{dip}=85^\circ$ .

По протяженности выделяются 4 отдельных участка, где эпицентры афтершоков имеют повышенную насыщенность: два из них непосредственно расположены в гипоцентральной области основного толчка (рис. 3-ж,к), а два других, соответственно приурочены к юго-западной (рис. 3-л) и северо-восточной (рис. 3-м)

оконечностям магистрального разрыва. Сопоставительный анализ этих участков с геометрией элементов геотектоники, свидетельствует о совпадении с участками разрушения сплошности геологической среды между кулисообразно расположенными сегментами. В общем процессе разрывообразования эти фрагменты деструкции магистрального разрыва указывают места возникновения субочагов [Геодакян и др., 2023].

Для определения общего объема сейсмогенеза очаговой области, нами рассмотрен процесс распределения афтершоков по глубине залегания. Для этой цели гипоцентры афтершоков были спроектированы на плоскость магистрального разрыва по оси разреза AA' (рис. 4).

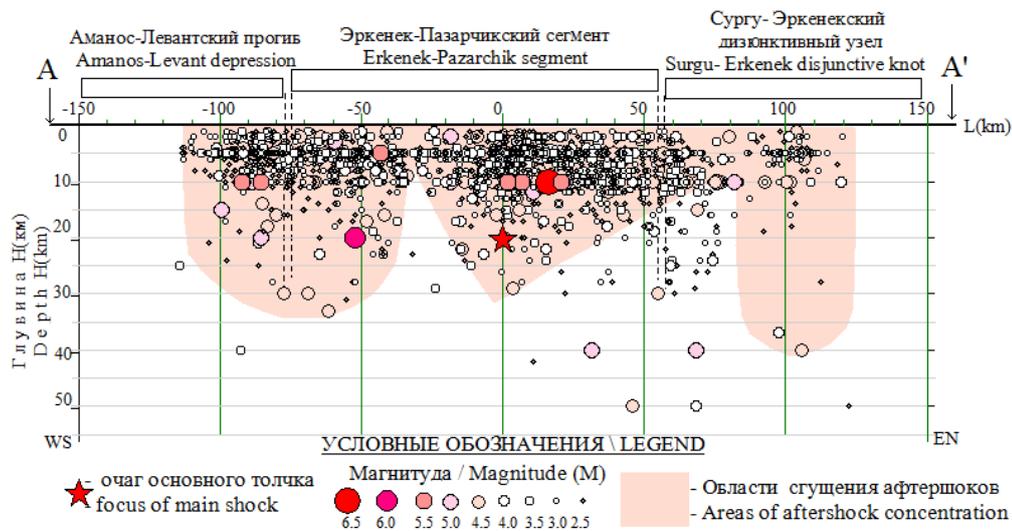


Рис. 4. Проекция гипоцентров афтершоков по разрезу AA' /

Fig. 4. Projection of hypocenters of aftershocks according to the section AA' /

Анализ распределения гипоцентров афтершоков по глубине их залегания показывает, что в юго-западной и северо-восточной оконечностях магистрального разрыва очаги углубляются до глубины 40 км с постепенным уменьшением глубины их залегания до 25 км в области гипоцентра основного толчка. В этом разрезе, по латерали выделенным кластером, в качестве характерных особенностей, выделяются 3 области сгущения гипоцентров. Эти зоны сгущения имеют различные, соответственно, в гипоцентральной области конусообразные, а в краевых зонах цилиндрические, геометрические формы распределения афтершоков. На основе параметров трехмерного пространственного распределения афтершоков, в первом приближении, оценен общий объем сейсмогенеза очаговой области, который составляет  $V \approx 6.4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ . В этом объеме по вертикали отражаются изменение реологических свойств и анизотропное состояние геологической среды, приводящие по мере углубления в литосферу к хрупкому, квазихрупкому разрушению и квазипластическому, пластическому и вязкому течению.

Для выявления зон и их мощностей хрупкого и квазихрупкого разрушения сейсмогенной области Газиантепского землетрясения, по данным приведенным в таблице 1, в виде гистограмм были построены графики распределения количества (N) очагов афтершоков и суммарная высвобожденная сейсмическая энергия ( $\Sigma E$ , Дж), по глубине залегания в земной коре (рис. 5).

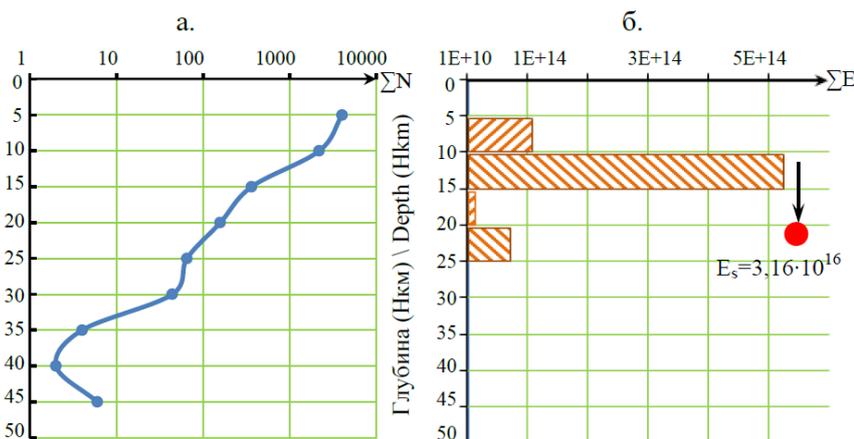


Рис. 5. Распределение количества ( $\Sigma N$ ) очагов афтершоков (а) и суммарная высвобожденная сейсмическая энергия ( $\Sigma E$ ) (б) по глубине их залегания в земной коре /  
 Fig. 5. Distribution of the number ( $\Sigma N$ ) of aftershock foci (a) and the total released seismic energy ( $\Sigma E$ ) (b) according to the depth of their location in the earth's crust

Анализ этих распределений показывает, что преобладающая часть гипоцентров слабых по магнитуде афтершоков  $\Sigma N \approx 6239$  (рис. 5а) сосредоточена в диапазоне глубин 5–15 км. Они в основном приурочены к осадочному слою и кровле кристаллического фундамента земной коры очаговой области. По мере углубления гипоцентров очагов вглубь коры, количество афтершоков убывает по степенному закону.

Распределение суммарной высвобожденной сейсмической энергии (рис. 5б) имеет более сложный вид, состоящий из 3-х максимумов на глубинах 5 км, 10 км, 20 км. Сопоставительный анализ гистограмм показывает, что высвобождение остаточных напряжений в виде возникновения большого количества мелких разрывных нарушений сосредоточено в осадочном слое и в основном отражает зону и мощность слоя хрупкого разрушения геологической среды. Второй и третий максимумы связаны с возникновением на этих глубинах сравнительно малого количества, но с более высокими значениями магнитуд разрывных нарушений и выделяют зону квазихрупкого разрушения. На глубине 20 км указан гипоцентр Газиантепского землетрясения с высвобожденной энергией  $E_s = 3.16 \cdot 10^{16}$  Дж, которая на два порядка превышает суммарную высвобожденную энергию всего афтершокового процесса  $\Sigma E_{\text{аф.}} = 6.07 \cdot 10^{14}$  Дж.

Нижняя кромка зоны квазихрупкого разрушения варьирует по вертикали в пределах от 25–45 км и разграничивает зоны хрупкого и квазихрупкого разрушения от кровли зон квазипластического и пластического течения геологической среды. Границы между этими зонами неотчетливы и зависят от геодинамического режима и типа напряженного состояния стационарной модели очаговой области Газиантепского землетрясения.

Известно, что общий геодинамический режим протяженных сейсмотектонических элементов, каким является ВАР, с макроскопической точки зрения, условно подразделяется на две составляющие: непрерывное в широком смысле пластическое течение и разрывно-непрерывное течение, в виде возникновения крупных землетрясений. В связи с недостаточностью комплекса геологических, геодезических и геоморфологических данных, нами рассмотрено только второе слагаемое, которое отражает сейсмогеодинамический режим ВАР. По сейсмостатистическим данным сильных землетрясений приведенным в каталогах [Ergin et al., 1967; Кондорская,

Шебалин, 1977; Berberian, 1994], произошедших за период с исторических времен по настоящее время, выделены более 14 землетрясений в магнитудном диапазоне  $M=6.0-7.8$ , очаги которых непосредственно расположены по всей длине зоны динамического влияния ВАР. Следует отметить, что, до возникновения Восточно-Турецких землетрясений, средний период повторяемости сильных землетрясений составляет  $T_{cp.} \approx 70$  лет. В работе [Кочарян, 2010] приведена корреляционная зависимость (2) рекуррентного времени  $\tau$  (годы) подготовки землетрясения от сейсмического момента  $M_0$ :

$$\tau \sim M_0^{0.17}, \quad (2)$$

где  $M_0$  – по определению пропорционален площади разрыва ( $S$ ) и амплитуде смещения ( $\Delta L$ ).

Используя количественное значение параметров Газиантепского землетрясения  $\Delta L=3$  м и  $S=5600$  км<sup>2</sup> [Геодакян и др., 2023], оценено рекуррентное время подготовки этого землетрясения  $\tau \sim 50 \div 55$  лет. Учет параметра рекуррентного времени позволяет от полученной стационарной модели Газиантепского землетрясения перейти к ее комплексной тектонофизической модели, как четырехмерному геологическому телу в пространстве и времени.

## Выводы

Обобщая результаты проведенных исследований, авторы пришли к следующим выводам:

– Непосредственное расположение гипоцентра Газиантепского землетрясения 06 февраля 2023 г. с магнитудой  $M_w=7.8$  на протяженном глубинном Восточно-Анатолийском сейсмоактивном разломе, его сложный многоактовый процесс магистрального разрывообразования и интенсивный поток афтершоковой последовательности являются основными критериями для рассмотрения их с позиции теории физической мезомеханики, как единый, краткосрочный процесс деструкции геологической среды в очаговой области.

– Разработанные современные научные и методологические подходы, для оценки очаговой области, как «геологическое тело, имеющее трехмерное измерение», позволили определить количественные значения этих параметров, рассчитать объем геологической среды и разработать «стационарную модель» очаговой области Газиантепского землетрясения.

– На основе расчета параметра рекуррентного времени подготовки Газиантепского землетрясения, осуществлен переход от «стационарной модели» очаговой области к четырехмерной геодинамической модели.

– Пространственное распределение гипоцентров афтершоковой последовательности указывает, что процессы разрядки как основных сеймотектонических напряжений в виде магистрального разрывообразования, так и остаточных сейсмодетформационных тектонических напряжений в виде афтершоков в очаговой области происходили крайне неравномерно. Применение методов перколяционного и кластерного анализа, позволило выделить в афтершоковом поле 3 участка концентрации афтершоков, территориально совпадающие с субочагами магистрального разрывообразования.

– Применением сопоставительного анализа распределения количества ( $N$ ) очагов афтершоков и их суммарной высвобожденной сейсмической энергии ( $\Sigma E$ , Дж)

по глубине залегания в земной коре, выделены зоны и определены мощности геологической среды хрупкого и квазихрупкого разрушения сейсмогенной области Газиантепского землетрясения.

### Заключение

Сейсмоактивный Тавро-Кавказский регион, ограниченный географическими координатами  $36.00^{\circ}\div 44.00^{\circ}\text{N}$ ;  $36.00^{\circ}\div 52.00^{\circ}\text{E}$ , представляет собой обширную область континентальной коллизии крупных Евразийской, Африканской, Аравийской, Анатолийской, Черноморской, Южно-Каспийской, Иранской макро- и мезолитосферных плит. Региональная система разномасштабных, разнонаправленных глубинных сейсмоактивных разломов имеет сложную структуру строения. Основные протяженные глубинные разломы являются зонами контактов вышеуказанных тектонических элементов [Abrehdari et al., 2023]. Очаги сильных и разрушительных землетрясений приурочены к зонам динамического влияния этих протяженных глубинных разломов. К ряду таких землетрясений относятся произошедшие за последние 50 лет, Чалдиранское (24.11.1976 г.), Ванское (23.10.2011 г.) с магнитудами  $M_w=7.1$  и  $M_w=7.2$  (Турция), Спитакское (07.12.1988 г.) с магнитудой  $M_w=7.0$  (Армения), Рачинское (29.04.1991 г.) с магнитудой  $M_w=7.0$  (Грузия), Агарийское (11.08.2012 г.) с магнитудой  $M_w=6.4$  (Иран) и произошедшие 06 и 20 февраля 2023 г. соответственно с магнитудами  $M_w=7.8$ ,  $7.5$  и  $6.3$  (Восточная Турция) разрушительные землетрясения. Эти события дискретно отображают происходящие на современном этапе сложные, интенсивные геодинамические процессы литосферы региона [Ismail-Zadeh et al., 2020; Karapetyan et al., 2023]. Следует отметить, что с сейсмологической точки зрения, эти землетрясения хорошо изучены. Решение фокальных механизмов, кинематические и динамические характеристики главных разрывов в очагах этих землетрясений, а также наличие достаточной базы сейсмостатистических данных афтершоковых процессов, позволяют, применяя в настоящей статье методологические подходы, ретроспективно разработать геодинамические модели очаговых областей этих землетрясений. Количественные значения трехмерных измерений очаговых областей в этих моделях и численные значения смещения крыльев главных разрывов, являются краевыми условиями, позволяющими применить метод конечных элементов, для оценки напряженно-деформированного состояния очаговых областей этих землетрясений. Такой подход вносит существенный вклад в решение проблем долгосрочного прогнозирования землетрясений, и рассматривает региональную сейсмичность с позиций современной геодинамики.

### Литература

1. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сеймотектоника 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. – Т. 13. № 4. – С.42–54.
2. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика. // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. № 5. – С. 5–22.
3. Дещеревский А.В., Мирзоев К.М., Лукк А.А. Критерии группирования землетрясений с учетом пространственной неоднородности сейсмичности. // Физика Земли. – 2016. – № 1 – С. 79–97. DOI: 10.7868/S0002333715060022.
4. Кондорская Н.В., Шебакин Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. – 536 с.

5. Кочарян Г.Г. Разломная зона как нелинейная механическая система. // *Физическая мезомеханика*. – 2010. – Т. 13 (Спец. Выпуск). – С. 5–17.
6. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б. Физическая мезомеханика очага землетрясения. // *Физическая мезомеханика*. – 2020. – Т. 23. № 6. – С. 9–24. DOI: 10.24411/1683-805X-2020-16001.
7. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 423 с.
8. Макаров П.В. Подход физической мезомеханики к моделированию процессов деформации и разрушения. // *Физическая мезомеханика*. – 1998. – Т. 1. № 1. – С.61–81.
9. Макаров П.В. Моделирование процессов деформации и разрушения на мезоуровне. // *Известия академии наук. Механика твердого тела*. – 1999. – № 5. – С. 109–131.
10. Макаров П.В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред. // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – Т. 7. № 4. – С. 25–34.
11. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики. // *Физическая мезомеханика*. – 1998. – Т.1. № 1. – С. 5–22.
12. Пиотровский В.В. Использование морфометрии для изучения рельефа и строения Земли. // *Земля во Вселенной*. – 1964. – С. 278–297.
13. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы. // *Доклады академии наук СССР*. – 1979. – Т. 247. № 4. – С. 829–831.
14. Шерман С.И. Стационарная и нестационарная модели формирования крупных разломов литосферы и их использование для пространственно-временного анализа сейсмического процесса. // *Эволюция тектонических процессов в истории Земли*. Новосибирск: Изд. СО РАН. – 2004. – Т. 2. – С. 299–302.
15. Шерман С.И. Деструкция литосферы: Разломноблоковая делимость и ее тектонофизические закономерности. // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2012. – Т. 3. № 4. – С. 315–344.
16. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. Tectonic Activities Description in the Ongoing Collision Zone of the Eurasia-Arabia Plates Using 2D SurfaceWaves Tomography. // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2023. – Vol. 23. No. 2. ES2004. DOI: 10.2205/2023ES000835.
17. Baltzopoulos G., Baraschino R., Chioccarelli E., Cito P. Near-source ground motion in the M7.8 Gaziantep (Turkey) earthquake. // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. – 2023. – Vol. 52. No. 11. – pp. 3903–3912. DOI: 10.1002/eqe.3939.
18. Bath M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle. // *Tectonophysics*. – 1965. – Vol. 2. Issue 6. – pp. 483–514.
19. Berberian M. Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran. // *Historical Hazards in Iran Prior to 1900*. – 1994. – Vol. 1. – 603 p.
20. Ergin K., Guglu U., Uz Z. A catalogue of earthquakes of Turkey and surrounding area (11 A.D. to 1964 A.D.). // *Technical Report, İstanbul Technical University, Faculty of Mines, Institute of Physics of the Earth*. – 1967. – Vol. 24. – 169 p.
21. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. // *Earth-Science Reviews*. – 2020. – Vol. 207. Art. No. 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
22. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., Matevosyan G. Study of modern regional and local anomalies of seismicity in the Tavro-Caucasian region. // *EGU General Assembly*. – 2023. – EGU23-16905. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-16905.
23. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismic picture of a fault zone. What can be gained from the analysis of fine patterns of spatial distribution of weak earthquake centers? // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2010. – Vol. 1. No. 4. – pp. 419–440. DOI: 10.5800/GT-2010-1-4-0027.
24. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismogenic width of fault zone. // *Doklady Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 437. No. 1. – pp. 412–415. DOI: 10.1134/S1028334X11030147.

25. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A. Mesostructure of a Tectonic Fault Slip Zone. // *Physical Mesomechanics*. – 2023. – Vol. 26. No. 1. – pp. 82–92. DOI: 10.1134/S1029959923010095.

26. Leonov M.G., Kocharyan G.G., Revuzhenko A.F., Lavrikov S.V. Tectonics of rock loosening: geological data and physics of the process. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2020. – Vol. 11. No. 3. – pp. 491–521. DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0488.

27. Mai P.M., Aspiotis T., Aquib T.A., Cano E.V. et al. The Destructive Earthquake Doublet of 6 February 2023 in South-Central Türkiye and Northwestern Syria: Initial Observations and Analyses. // *The Seismic Record*. – 2023. – Vol. 3. No. 2. – pp. 105–115. DOI: 10.1785/0320230007.

28. Makarov P.V. Resonance structure and inelastic strain and defect localization in loaded media. // *Physical Mesomechanics*. – 2011. – Vol. 14. Issue 5-6. – pp. 297–307. DOI: 10.1016/j.physme.2011.12.008.

29. Spivak A.A. Rigidity of the fault zones in the Earth's crust estimated from seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2011. – Vol. 47. No. 7. – pp. 600–609. DOI: 10.1134/S1069351311060061.

30. Spivak A.A., Tsvetkov V.M. A new model of the zonal structure of fractures. // *Doklady Earth Sciences*. – 2009. – Vol. 424. Issue 1. – pp. 151–154. DOI: 10.1134/S1028334X09010322.

## Reference

1. Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Saakyan 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 ( $M_w=7.8$ ). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 42–54. (In Russ.)

2. Goldin S.V. Destruction of the lithosphere and physical mesomechanics. *Physical Mesomechanics*. 2002. Vol. 5. No. 5. pp. 5–22. (In Russ.)

3. Deshcherevsky A.V., Mirzoev K.M., Lukk A.A. Criteria for grouping earthquakes with regard to spatial heterogeneity of seismicity. *Physics of the Solid Earth*. 2016. No. 1. pp. 79–97. DOI: 10.7868/S0002333715060022. (In Russ.)

4. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. A new catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975. Moscow. Nauka. 1977. 536 p. (In Russ.)

5. Kocharyan G.G. Fault zone as a nonlinear mechanic system. *Physical Mesomechanics*. 2010. Vol. 13. (special issue). pp. 5–17. (In Russ.)

6. Kocharyan G.G., Kishkina S.B. The physical mesomechanics of the earthquake source. *Physical Mesomechanics*. 2020. Vol. 23. No. 6. pp. 9–24. DOI: 10.24411/1683-805X-2020-16001. (In Russ.)

7. Kocharyan G.G., Spivak A.A. Dynamics of deformation of block rock masses. Moscow. ICC Akademkniga. 2003. 423 p. (In Russ.)

8. Makarov P.V. Physical mesomechanics approach to modeling of deformation and fracture processes. *Physical Mesomechanics*. 1998. Vol. 1. No. 1. pp. 61–81. (In Russ.)

9. Makarov P.V. Modeling of deformation and fracture processes at the mesolevel. *Izvestiya Akademii Nauk. Mechanics of Solid State*. 1999. No. 5. pp. 109–131. (In Russ.)

10. Makarov P.V. On hierarchical nature of deformation and fracture of solids and media. *Physical Mesomechanics*. 2004. Vol. 7. No. 4. pp. 25–34. (In Russ.)

11. Panin V.E. Fundamentals of physical mesomechanics. *Physical Mesomechanics*. 1998. Vol. 1. No. 1. pp. 5–22. (In Russ.)

12. Piotrovsky V.V. Using morphometry to study the landforms and structure of the Earth. *Earth in the Universe*. 1964. pp. 278–297. (In Russ.)

13. Sadovsky M.A. Natural lumpiness of rock. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1979. Vol. 247. No. 4. pp. 829–831. (In Russ.)

14. Sherman S.I. Stationary and non-stationary models of formation of major faults in the lithosphere and their use for the space-time analysis of the seismic process. In: *The evolution of tectonic processes in the Earth's history*. Novosibirsk. Publishing House of SB RAS. 2004. Vol. 2. pp. 299–302. (In Russ.)

15. Sherman S.I., Destruction of the lithosphere: Faultblock divisibility and its tectonophysical regularities. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. Vol. 3. No. 4. pp. 315–344. (In Russ.)
16. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. Tectonic Activities Description in the Ongoing Collision Zone of the Eurasia-Arabia Plates Using 2D SurfaceWaves Tomography. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23. No. 2. ES2004. DOI: 10.2205/2023ES000835.
17. Baltzopoulos G., Baraschino R., Chioccarelli E., Cito P. Near-source ground motion in the M7.8 Gaziantep (Turkey) earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2023. Vol. 52. No. 11. pp. 3903–3912. DOI: 10.1002/eqe.3939.
18. Bath M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*. 1965. Vol. 2. Issue 6. pp. 483–514.
19. Berberian M. Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran. *Historical Hazards in Iran Prior to 1900*. 1994. Vol. 1. 603 p.
20. Ergin K., Guglu U., Uz Z. A catalogue of earthquakes of Turkey and surrounding area (11 A.D. to 1964 A.D.). Technical Report, İstanbul Technical University, Faculty of Mines, Institute of Physics of the Earth. 1967. Vol. 24. 169 p.
21. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., et al. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 207. Art. No. 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
22. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. EGU General Assembly. 2023. EGU23-16905. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-16905.
23. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismic picture of a fault zone. What can be gained from the analysis of fine patterns of spatial distribution of weak earthquake centers? *Geodynamics and Tectonophysics*. 2010. Vol. 1. No. 4. pp. 419–440. DOI: 10.5800/GT-2010-1-4-0027.
24. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismogenic width of fault zone. *Doklady Earth Sciences*. 2011. Vol. 437. No. 1. pp. 412–415. DOI: 10.1134/S1028334X11030147.
25. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A. Mesostructure of a Tectonic Fault Slip Zone. *Physical Mesomechanics*. 2023. Vol. 26. No. 1. pp. 82–92. DOI: 10.1134/S1029959923010095.
26. Leonov M.G., Kocharyan G.G., Revuzhenko A.F., Lavrikov S.V. Tectonics of rock loosening: geological data and physics of the process. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. Vol. 11. No. 3. pp. 491–521. DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0488.
27. Mai P.M., Aspiotis T., Aquib T.A., Cano E.V. et al. The Destructive Earthquake Doublet of 6 February 2023 in South-Central Türkiye and Northwestern Syria: Initial Observations and Analyses. *The Seismic Record*. 2023. Vol. 3. No. 2. pp. 105–115. DOI: 10.1785/0320230007.
28. Makarov P.V. Resonance structure and inelastic strain and defect localization in loaded media. *Physical Mesomechanics*. 2011. Vol. 14. Issue 5-6. pp. 297–307. DOI: 10.1016/j.physme.2011.12.008.
29. Spivak A.A. Rigidity of the fault zones in the Earth is crust estimated from seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2011. Vol. 47. No. 7. pp. 600–609. DOI: 10.1134/S1069351311060061.
30. Spivak A.A., Tsvetkov V.M. A new model of the zonal structure of fractures. *Doklady Earth Sciences*. 2009. Vol. 424. Issue 1. pp. 151–154. DOI: 10.1134/S1028334X09010322.

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

Оригинальная статья

## Геофизическое обеспечение горного производства

**В.Б. Заалишвили** <sup>1</sup>, **В.И. Голик** <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва, Б. Семеновская, 38, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Статья поступила: 21.05.2024, доработана: 05.08.2024, принята к публикации: 06.08.2024

**Резюме:** Актуальность темы исследования объясняется необходимостью совершенствования методов обеспечения горного производства, для повышения качества добываемого минерального сырья при минимизации ущерба окружающей среде. Обобщены сведения о наиболее часто используемых методах геофизического обеспечения добычных работ. **Методика** достижения поставленной цели базируется на комплексном использовании геофизических методов исследования пород и слагаемых ими массивов для прогнозирования их свойств при технологическом воздействии на недра. **Результаты.** Дана справка об истории и состоянии теории и практики геофизического сопровождения горного производства при разработке рудных месторождений подземным способом. Показано, что эффективность управления массивами зависит от сбалансированности напряженно-деформированных породных сред, которая корректируется в ходе добычных работ. Дана характеристика основных геофизических методов определения свойств пород в натурных и лабораторных условиях. Приведены количественные показатели прочности основных типов пород, получаемые при модернизации технологий добычи руд и обобщенные в условиях месторождения скальных руд. Детализированы сведения о прогнозировании состояния земной поверхности, как разделительной среды зон опасности и селитебной. Состояние исследуемого массива характеризуется распределением в нем разломов и крупных трещин, которые служат средой перераспределения напряжений и деформаций в массиве и земной коре. Определено, что скальные массивы представляют собой совокупность структурных отдельных с неопределенным и независимым характером взаимодействия, что объясняет опасность эксплуатации горных объектов. Предложена типизация методов исследования.

**Ключевые слова:** геофизическое обеспечение, добыча руд, подземный способ, свойства пород.

**Для цитирования:** Заалишвили В.Б., Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 85-98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

Original paper

# Geophysical support of mining production

V.B. Zaalishvili<sup>1</sup>, V.I. Golik<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, 38 B. Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Received: 21.05.2024, revised: 05.08.2024, accepted: 06.08.2024

**Abstract:** The relevance of the research topic is explained by the need to improve the methods of ensuring mining production, to improve the quality of extracted minerals while minimizing environmental damage. The data on the most frequently used methods of geophysical support of mining operations are generalized. **The methodology** of achieving the goal is based on the complex use of geophysical methods of research of rocks and ground composed by them for prediction of their properties at technological impact on the subsoil. **Results.** The reference on the history and state of theory and practice of geophysical support of mining production at development of ore deposits by underground method is given. It is shown that the efficiency of ground control depends on the balance of stress-strain rock media, which is corrected in the course of mining operations. The main geophysical methods of determining the properties of rocks in full-scale and laboratory conditions are characterized. Quantitative indicators of the strength of the main rock types obtained during modernization of ore mining technologies and generalized in the conditions of the rock ore deposit are given. Information on forecasting the state of the earth surface as a separating medium of danger zones and settlement zones is detailed. The condition of the studied massif is characterized by the distribution of faults and large cracks in it, which serve as a medium for redistribution of stresses and deformations in the ground and the earth crust. It is determined that rock massifs are a set of structural separations with uncertain and independent character of interaction, which explains the danger of exploitation of mining objects. Typization of research methods is proposed.

**Keywords:** geophysical support, ore mining, underground method, rock properties.

**For citation:** Zaalishvili V.B., Golik V.I. Geophysical support of mining production. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 85-98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

## Введение

Напряженно-деформированное состояние (НДС) массива исследовали В.Д. Слесарев (1948), В.И. Борщ – Компанейца, С.В. Ветров (1975), Г.Н. Кузнецов, Н.П. Влох и др.

Гипотезы управления состоянием массивов сводятся к тому, что эффективность управления массивами зависит от сбалансированности напряженно-деформированных сред, которая обеспечивается повышением несущей способности пород путем заполнения выработанного пространства по завершению добычных работ.

Геофизические методы исследования широко применяются при комплексном анализе генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов [Клюев и др., 2019; Яконовская и др., 2020].

Они составляют основу формирования геоинформационных технологий при решении геоэкологических задач и использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства [Яицкая, Бригида, 2022; Валиев и др., 2017], при прогнозировании геомеханического состояния массива при отработке месторождений полезных ископаемых и решении пространственно-временных задач геоэкологии [Рыбак и др., 2022; Бригида и др., 2020; Zemskov et al., 2021].

Методы геофизического сопровождения процессов горного и обогатительного переделов применяют для обоснования целесообразности применения новых технологий [Валиев и др., 2023; Kongar-Syuryun et al., 2024; Golik et al., 2023].

Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых с использованием возможностей рудничной геофизики предложены в трудах [Дзапаров и др., 2020; Doifode, Matani, 2015; Рыбак и др., 2021; Golik et al., 2023].

Вопросы обеспечения экологической безопасности при внедрении ресурсо-возобновляемых технологий и регламентации процессов производственного характера рассмотрены в трудах [Хайрутдинов и др., 2022; Петров и др., 2020; Löw et al., 2019].

Целью работы является рассмотрение и анализ геофизических методов исследования пород и слагаемых ими массивов для совершенствования их возможностей при добыче руд подземным способом.

Разнообразие геофизических методов сопровождения технологических процессов горного производства позволяет обосновать направления совершенствования и модернизации применяемых технологий при комплексном использовании геофизических методов исследования пород и слагаемых ими массивов для прогнозирования их свойств при технологическом воздействии на недра [Клюев и др., 2020; Рыбак и др., 2022; Lovchikov, 2020].

Геофизическая аппаратура и оборудование обеспечивают получение, передачу и хранение информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического цикла и являются неотъемлемой частью динамически развивающегося производства минерального сырья для удовлетворения потребностей промышленности.

## Методика

Разработка месторождений полезных ископаемых осуществляется с использованием геофизических средств контроля технологических процессов на всех этапах производства.

Структурную неоднородность массива определяют с использованием ультразвукового, электрического и магнитного каротажа. Напряжения в массиве измеряют методами полной разгрузки, параллельных скважин, регистрации деформаций отверстия в керне и низкочастотных модификаций сейсмического и электрометрического методов.

При подземной разработке рудных месторождений применяют методы акустической эмиссии, сейсмоакустический, сейсмический и электрометрический.

## Результаты

Свойства пород в массиве по выходу керна при бурении скважин оценивают методом Ханзаги И. На рис. 1. приведен принцип оценки прочности пород по выходу керна, отобранного в зоне влияния выработки с дифференциацией по толщине дисков.

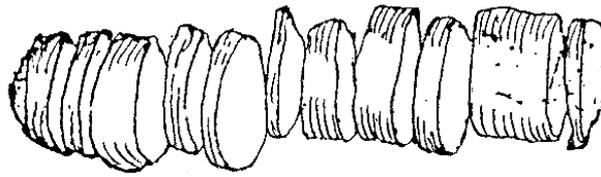


Рис. 1. Оценка прочности пород по выходу керна /

Fig. 1. Estimation of rock strength from core yields

По результатам исследования керна из скважин рассчитывается коэффициент ослабления пород в массиве ( $K_o$ ) (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Коэффициент ослабления некоторых пород / Weakening factor of some rocks**

Типы пород / Rock types	Сильно Нарушенные / Heavily disturbed	Средне Нарушенные / Average disturbed
Базальтовые порфириды / Basaltic porphyrites	0,086-0,127	0,314-0,328
Габбро-диориты / Gabbro-diorites	0,190	0,230
Диориты измененные / Altered diorites	0,142	0,298
Диоритовые порфириды массивные / Dioritic porphyrites massive	0,120	0,274-0,359
Граниты с ксенолитами оруденелые / Granites with xenoliths are mineralized	0,120	0,280
Плагипорфиры (дайки) / Plagioporphyries (dikes)	0,255	0,300-0,311
Известняки / Limestones	0,095-0,240	0,230-0,480
Прослаивание известняков и сланцев / Limestone and shale saturation	0,131	0,181
Песчаники с прослоями сланцев и известняков / Sandstones with interlayers of shale and limestone	0,100-0,165	0,210-0,282
Алевролиты, алевропесчаники / Siltstones, silty sandstones	0,111-0,220	0,228-0,378
Алевролиты, алевропесчаники оруденелые / Ore-bearing siltstones, silt-sandstones	0,145	0,250-0,303
Аргиллиты кремнистые / Siliceous argillites	0,170	0,230
Сланцы глинистые, углисто-глинистые / Clay shale, clayey-coal shale	0,082	0,144

Для выявления неоднородностей использован метод межскважинного акустического прозвучивания по схеме (рис. 2).

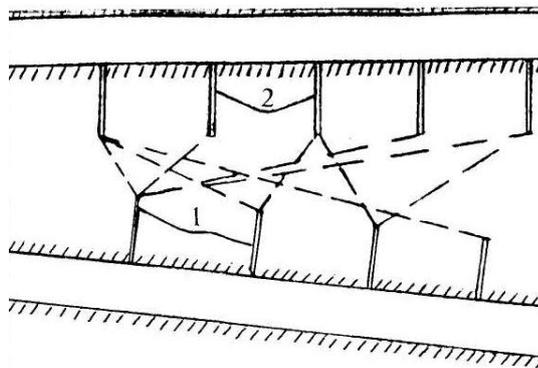


Рис. 2. Схема исследования массива: 1 и 2 – скважины /

Fig. 2. Scheme of massif research: 1 and 2 – boreholes

Излучатель помещали в скважинах, пробуренных с одной стороны массива (1), а звукоприёмник – в скважинах, пробуренных с другой стороны (2). Расстояние между скважинами – 5 м. Глубина скважин – 2,5 м. Скважины заполняли водой.

Для прошедшего из точки излучения сигнала в точку его приема луча коэффициент кажущегося звукопоглощения  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = \frac{L_o - L_n - 20 \lg r_i}{8,68 r_i},$$

где  $L_o$  - начальный уровень сигнала в точке излучения, дБ;

$L_n$  - наблюдательный уровень сигнала, дБ;

$r_i$  - расстояние от точки излучения до точки приема, м.

В зависимости от состояния массива, фиксировали процессы, предшествующие обрушению и определяли количественное значение устойчивости рудовмещающих массивов (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Характеристика устойчивости горных массивов /  
Characterization of stability of rock massifs**

Регион / Region	Породы / Rocks	Число импульсов в минуту, имп. / мин <sup>-1</sup> / Number of pulses per minute, imp. / min <sup>-1</sup>		
		Категория устойчивости / Sustainability category		
		Устойчивая / Sustainable	Переходная / Transient	Неустойчивая / Non-sustainable
Урал / Ural	Порфириты / Porphyrites	0-25	25-40	40
	Магнетиты / Magnetites	0-30	30-40	40
	Скарны / Skarns	0-40	40-60	60
Криворожье / Krivorozhye	Слабые руды / Weak ores	0-5	5-10	10
	Средние руды / Medium ores	0-10	10-25	25
	Крепкие руды / Strong ores	0-20	20-40	40
Горная Шория / Gornaya Shoria	Диориты / Diorites	0-15	15-30	30
	Известняки / Limestones	0-30	30-60	60
	Скарны / Skarns	0-40	40-60	60
Хакассия / Khakassia	Роговики / Hornblende	0-15	15-30	30
	Сланцы, туфы / Shales, tuffs	0-30	30-60	60
Хайдаркан / Khaidarkan	Известняки / Limestones	0-10	10-20	20
Джезказган / Dzhezkazgan	Алевриты / Siltstones	0-10	10-25	25
Миргалимсай / Mirgalimsay	Доломиты / Dolomites	0-16	16-25	25
СУБР / SUBR	Сланцы / Shales	0-10	10-20	20

На основе результатов натуральных испытаний построены зависимости частоты звуков разрушения от величины напряжений  $\sigma$ :

$$\sigma = a \cdot N_H^b,$$

где  $N_H$  – количество импульсов в минуту;

$a$  – коэффициент, характеризующий структуру горного массива;

$b$  – коэффициент, характеризующий прочность горного массива.

Сдвигения массива пород и руд при подземной разработке определяются результатами наблюдений на земной поверхности, в горных выработках и скважинах с применением глубинных реперов по профильным линиям по простиранию и вкрест простирания рудных тел (рис. 3).

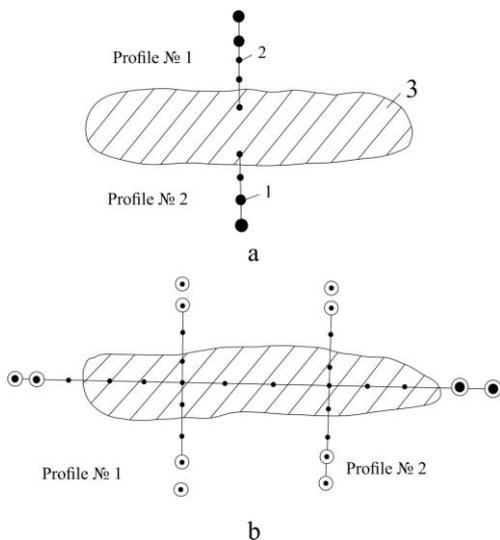


Рис. 3. Профили наблюдательной станции:  
а – односторонний; б – двухсторонний;  
1 – опорные реперы; 2 – рабочие реперы; 3 – рудное тело /  
Fig. 3. Profiles of the observation station:  
а – one-sided; б – two-sided; 1 – reference repers;  
2 – working repers; 3 – ore body

Для контроля нарушенности массива электрические цепи из параллельно подключенных сопротивлений размещают в скважинах (рис. 4). При обрушении пород цементированная с породой часть скважины с сопротивлениями обрушается, сигнализируя о деформировании.

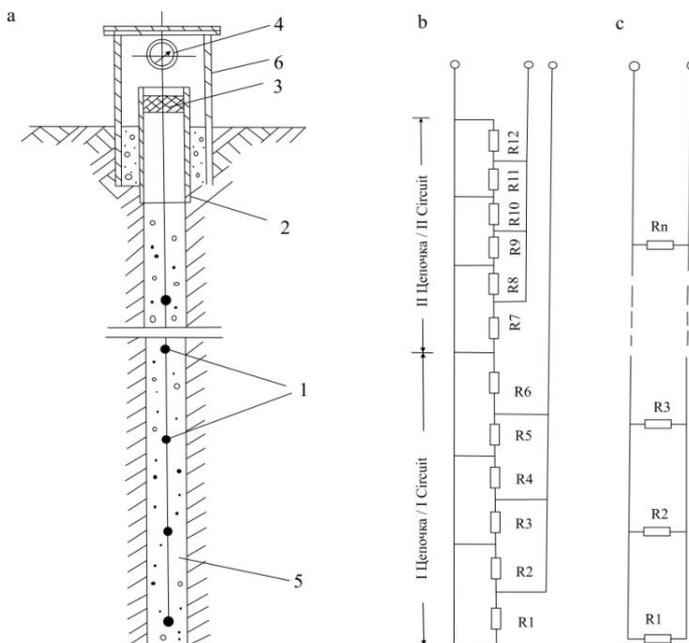


Рис. 4. Наблюдательная станция:  
а – общий вид: 1 – сопротивление электрической цепи; 2 – обсадная труба; 3 – резиновая пробка; 4 – измерительный прибор; 5 – цементный раствор; 6 – защитный колпак; б – схема измерения сопротивлений в цепи; в – схема по измерению силы тока в цепи /  
Fig. 4. Observation station: а – general view: 1 – electrical circuit resistance; 2 – casing pipe; 3 – rubber plug; 4 – measuring device; 5 – cement mortar; 6 – protective cap; б – scheme for measuring resistance in the circuit; в – scheme for measuring current in the circuit

При изучении устойчивости кровли используются модели из эквивалентных материалов, а в качестве регистрирующей аппаратуры датчики и осциллографы.

Подбор эквивалентных материалов производится по условию:

$$s_n = a_e (g_n / g_m) s_m,$$

где  $S_n$  – предел прочности пород природы, МПа;

$S_m$  – предел прочности пород модели, МПа;

$g_n$  – плотность пород природы, г/см<sup>3</sup>;

$g_m$  – плотность пород модели, г/см<sup>3</sup>;

$a_e$  – масштаб модели.

Для определения влияния нарушенности пород на устойчивость выработок отработывают модели, различающиеся плотностью трещин (рис. 5).

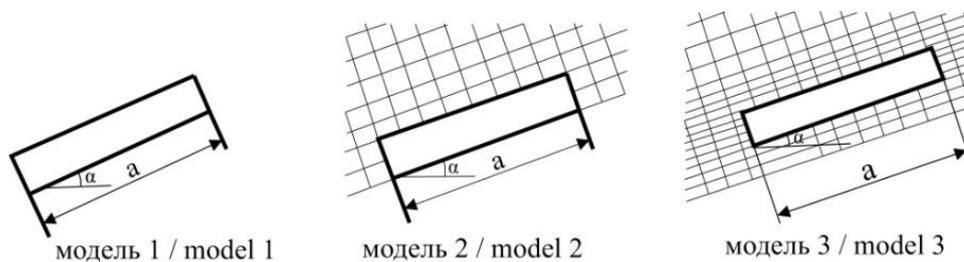


Рис. 5. Модель 1 – нетронутый массив; модель 2 – массив нарушен тремя системами трещин, образующими блоки размерами 1x2x2 м; модель 3 – массив нарушен послойной зоной из трех слоев общей мощностью 6 м /

Fig. 5. Model 1 – intact massif; model 2 – massif disturbed by three fracture systems forming 1x2x2 m blocks; model 3 – massif disturbed by a layer-by-layer zone of three layers with a total thickness of 6 m

Условие подобия:  $g_m = E_m H g_n / h_1 E_n$ ,

где  $E_n$  – модуль упругости пород;

$E_m$  – модуль упругости модели;

$H$  – размер пород;

$h_1$  – размер модели.

Нагруженные модели исследуют в поляризованном свете. Напряжение  $t_{max}$  определяют по картинам полос, а разность главных нормальных напряжений из выражения:

$$d_1 - d_2 = 2 t_{max},$$

где  $d_1$  – главные горизонтальные напряжения, МПа;

$d_2$  – главные вертикальные напряжения, МПа.

Главные нормальные напряжения в отдельных точках модели определяют измерением поперечных деформаций:

$$d_1 + d_2 = (t_0 - t_1) E_m^t / t_0 m,$$

где  $t_0$  – толщина модели до нагружения, мм;

$t_1$  – толщина модели после нагружения, мм;

$E_m^t$  – модуль упругости материала модели при температуре замораживания;

$m$  – коэффициент Пуассона материала модели.

Напряжения  $t_{\max}$  определяют по окраске материала модели в зависимости от касательных напряжений:

$$d_n = d_m E_n / E_m$$

Для решения задачи изготовлено 5 моделей шириной 15 м, высотой 2, 4, 6, 8 и 10 м и углом падения  $20^\circ$  в сплошной зоне и 5 моделей аналогичных размеров в слоистой среде. Глубина работ 200 м. Модуль упругости пород  $E_n = 5,2 \times 10^5$  кг/см<sup>2</sup>, модуль упругости послойной зоны  $E_{з.п.} = 2,08 \times 10^5$  кг/см<sup>2</sup>. Плотность пород 2,8 т/м<sup>3</sup>. Вмещающие породы моделировались эпоксималом с модулем упругости  $E_{з.п.} = 270$  кг/см<sup>2</sup> при температуре «замораживания» напряжений, а послойная рудная зона  $E_{п.з.} = 110$  кг/см<sup>2</sup>.

При отсутствии сцепления между основной и непосредственной кровлей в кровле выработок возникают растягивающие напряжения, величина которых возрастает при увеличении неоднородности материала (рис. 6).

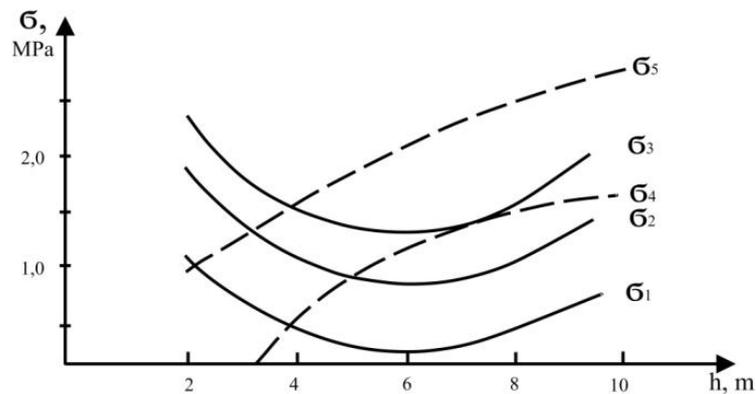


Рис. 6. Изменение напряжений в кровле:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – послойная зона;  $\sigma_4, \sigma_5$  – однородная зона /  
Fig. 6. Change of stresses in the roof:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – layer-by-layer zone;  $\sigma_4, \sigma_5$  – homogeneous zone

Разломы увеличивают и перераспределяют напряжения (рис. 7).

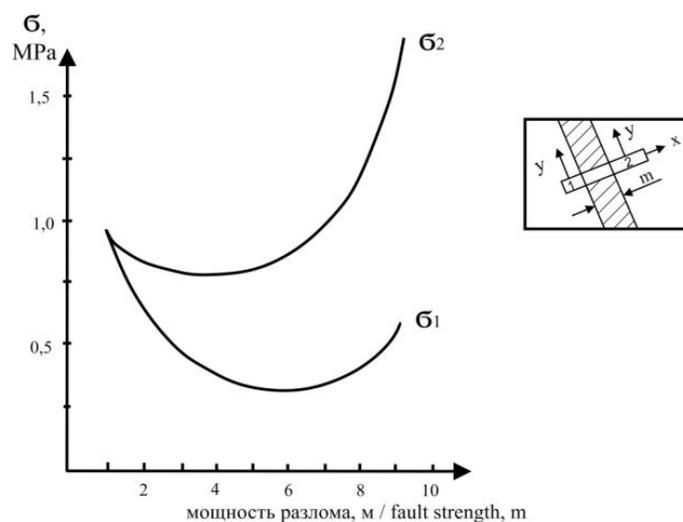


Рис. 7. Влияние мощности разломов на величину напряжений /  
Fig. 7. Effect of fault power on the magnitude of stresses

Оценка состояния напряженно-деформированного массива пород и прогнозирование его поведения осуществляется комплексным методом, включающим физическое и математическое моделирование, а также ретро- и перспективный прогноз состояния. Наложением измеренных элементов на геолого-структурную карту устанавливают систему нарушенности.

После математического анализа результатов исследований формируют инженерно-геологическую модель массива, определяют расстояния между макротрещинами, строят геолого-структурные проекции, оценивают роль трещин и вычисляют коэффициент структурного ослабления как функцию нарушенности массива.

Установлено, что наличие разноориентированных трещин искажает геомеханическую ситуацию в массиве за счет разгрузки пород в зонах разлома. Висячем боку тектонических трещин преобладают послынные трещины, увеличивающие деформации пород под влиянием напряжений.

Среди макротрещин выделяют трещины по-разному ориентированные к разлому: трещины расщепления в висячем крыле разлома мощностью до 1–2 м и расстоянием между макротрещинами около 0,5 м, трещины сгущения мощностью до 15–20 м и расстоянием около 2 м, и трещины слабого нарушения массива со средним расстоянием более 5 м.

Применяемые в горном деле методы исследований можно подразделить по основным признакам (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3



При решении геомеханических задач разработки месторождений полезных ископаемых используются методы с применением геофизики (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Геофизические методы обеспечения горных работ /  
Geophysical methods to support mining operations**

Вид / Type	Параметр / Parameter	Принцип / Principle	Оборудование / Equipment
Дискование керна / Core disking	Прочность пород / Rock strength	Выход керна при бурении скважин / Core yield during well drilling	Буровой станок / Drilling machine
Межскважин- ное акустиче- ское прозвучи- вание / Interwell acous- tic sounding	Однородность массива / Massif homogeneity	Параметры упругих колебаний / Elastic vibration parameters	Излучатель, звукприемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Ультразвуковой каротаж / Ultrasonic logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Электрическое сопротивление / Electrical resistivity	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Электрический каротаж / Electrical logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Диэлектрическая проницаемость / Dielectric permittivity	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Магнитный каротаж / Magnetic logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Магнитная проницаемость / Magnetic permeability	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Полная разгрузка / Full unloading	Напряженность / Tension	Упругие деформации / Elastic deformations	Буровой станок, датчики, приемник, анализатор спектра / Drilling machine, transducers, receiver, spectrum analyzer
Акустическая эмиссия / Acoustic emission	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Акустическая проницаемость / Acoustic permeability	Излучатель частот 10–100 кГц, приемник, анализатор спектра / Frequency transmitter 10-100 kHz, receiver, spectrum analyzer
Сейсмоакусти- ческий / Seismoacoustic	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Акустическая проницаемость / Acoustic permeability	Излучатель частот 30–500 кГц, приемник, анализатор спектра / Frequency transmitter 30-500 kHz, receiver, spectrum analyzer
Электрометри- ческий / Electrometric	Напряженность / Voltage	Электрическое сопротивление / Electrical resistance	Излучатель тока, приемник, анализатор спектра / Current transmitter, receiver, spectrum analyzer
Вдавливание пуансонов / Punch indentation	Напряженность / Tension	Сопротивление внедрению жесткого штампа / Resistance to rigid die insertion	Буровой станок, гидравлический прибор БП18 / Drilling machine, hydraulic device BP18

Деформация скважин / Well deformation	Деформированность / Deformation	Изменение диаметра скважин / Change of well diameter	Буровой станок, деформометры / Drilling machine, deformometers
Геомагнитный / Geomagnetic	Напряженность / Tension	Импульсно-электромагнитное излучение / Pulse-electromagnetic radiation	Излучатель сигнала, приемник, анализатор спектра / Signal transmitter, receiver, spectrum analyzer
Глубинные реперы / Depth gauges	Деформированность / Deformability	Размеры трещин / Fracture sizes	Системы связи (проволока или штанги), реперы / Communication systems (wire or rods), gauges
Электрические цепи в скважинах / Electrical circuits in boreholes	Деформированность / Deformation	Сопротивление цепи / Circuit resistance	Датчики, анализатор спектра / Sensors, spectrum analyzer
Моделирование на эквивалентных материалах / Modeling on equivalent materials	Деформированность / Deformation	Напряженность / Tension	Форма, материалы, датчики, анализатор / Shape, materials, sensors, analyzer
Моделирование на оптически активных материалах / Modeling on optically active materials	Деформированность / Deformation	Напряженность / Tension	Форма, материалы, датчики, анализатор / Shape, materials, sensors, analyzer
Математическое моделирование / Mathematical modeling	Деформированность / Deformation	Напряженность / Tension	Закономерности, средства математического анализа / Regularities, tools of mathematical analysis

## Выводы

Использование геофизических методов сопровождения процессов подземной разработки месторождений повышает безопасность горных работ и улучшает качество добываемого минерального сырья при минимизации ущерба окружающей среде.

Эффективность управления рудовмещающими массивами зависит от сбалансированности напряженно-деформированных породных сред, путем оперативной корректировки на основании данных геофизического сопровождения.

Состояние природных и естественных массивов характеризуется путем реализации на практике данных геофизического сопровождения.

## Литература

1. Бригада В.С., Кожиев Х.Х., Сарян А.А., Джиоева А.К. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 20–32.
2. Валиев Н.Г., Головырин С.С., Макаров В.В. К вопросу об использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства (проблематика решения задач современного горного производства с использованием мульти-агентных систем). // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S23. – С. 134–139.
3. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Абрамкин Н.И., Камболов Д.А. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд. // Горный информационный аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 17–30.
4. Дзапаров В.Х., Харебов Г.З., Стась В.П., Стась П.П. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства. // Сухие строительные смеси. – 2020. – № 1. – С. 35–38.
5. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А. В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283–290.
6. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. Комплексный анализ генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов Джеб-казганского месторождения. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – № 3. – С. 321–330.
7. Петров Ю.С., Хадзарагова Е.А., Соколов А.А., Шарипзянова Г.Х., Таскин А.В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия. // Горный информационно-аналитический. – 2020. – № 11-1. – С. 178–188.
8. 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. 406–415.
9. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Бобырь Н.В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой. // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 61–70.
10. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсо-возобновляемых технологий. // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 57–62.
11. Яицкая Н.А., Бригада В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 162–173.
12. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Яконовский П.А. Оценка использования геофизического метода VLF для определения мощности торфяного месторождения. – Горные науки и технологии. – 2020. – Т. 5. № 3. – С. 224–234.
13. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. // International Journal of Chemical and Physical Sciences. – 2015. – Vol. 4. Special Issue. NCSC. – pp. 536–540.
14. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. // Metallurgist. – 2023. – Vol. 66. Nos. 11-12. – pp. 1476–1480.
15. 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. – 2023. – Vol. 12. Issue 113. DOI: 10.3390/resources12100113.

16. Kongar-Syuryun, C., Klyuev R.V., Golik V.I., Oganesyanyan A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability. // *Urban Science*. – 2024. – Vol. 8. Issue 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.

17. Löow J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2019. – Vol. 36. Issue 4. – pp. 701–707.

18. Lovchikov A.V. A New Concept of the Mechanism of Rock-Tectonic Bursts and Other Dynamic Phenomena in Conditions of Ore Deposits. // *Mining Science and Technology*. – 2020. – Vol. 5. No. 1. – pp. 30–38.

19. Zemskov A.N., Liskova M.Yu., Sharipzyanova G.Kh. Regularities of changes in the gas-dynamic and geomechanical situation at potash mines. // *Sustainable development of mountain territories*. – 2021. – Vol. 13. No. 3. – pp. 426–432.

## References

1. Brigida V.S., Kozhiev Kh.Kh., Saryan A.A., Dzhioeva A.K. Spatiotemporal problems in geocology: an inter-disciplinary approach. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020. No. 4. pp. 20–32. (In Russ.)

2. Valiyev N.G., Golovyryn S.S., Makarov V.V. To a question of use of systems of artificial intelligence in procedures of audit of modern mining (a perspective of the solution of tasks of modern mining with use the multiagentny of systems). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017. No. S23. pp. 134–139. (In Russ.)

3. Valiev N.G., Propp V.D., Abramkin N.I., Kambolov D.A. The practice of leaching metals from substandard raw materials and ore dressing waste. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023. No. 12-1. pp. 17–30. (In Russ.)

4. Dzaparov B.Kh., Kharebov G.Z., Stas V.P., Stas P.P. Research of drymixtures based on production waste for underground construction. *Dry construction mixtures*. 2020. No. 1. pp. 35–38. (In Russ.)

5. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable development of mountain territories*. 2020. No. 2. pp. 283–290. (In Russ.)

6. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V. Complex analysis of genetic features of mineral substance and technological properties of useful components of Dzhezkazgan deposit. *Sustainable development of mountain territories*. 2019. No. 3. pp. 321–330. (In Russ.)

7. Petrov Yu.S., Khadzaragova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.Kh., Taskin A.V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy. *Mining informational and Analytical Bulletin*. 2020. No. 11-1. pp. 178–188. (In Russ.)

8. Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable development of mountain territories*. 2021. Vol. 13. No. 3. Issue 49. pp. 406–415. (In Russ.)

9. Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Syuryun Ch.B., Babyr N.V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of mining institute*. 2022. Vol. 253. pp. 61–70. (In Russ.)

10. Khayrutdinov M.M., Kaung P.A., Chzho Z.Ya., Tyulyaeva Yu.S. Ensuring environmental safety in the implementation of the resource-renewable technologies. *Occupational safety in industry*. 2022. No. 5. pp. 57–62. (In Russ.)

11. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems. spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 162–173. (In Russ.)

12. Yakonovskaya T.B., Zhigul'skaya A.I., Yakonovsky P.A. Assessment of applying VLF geophysical method to determine the peat deposit thickness. *Mining science and Technology*. 2020. – Vol. 5. No. 3. pp. 224–234. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-224-234. (In Russ.)

13. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015. Vol. 4. Special Issue. NCSC. pp. 536–540.
14. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyshev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. Nos. 11-12. pp. 1476–1480.
15. 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*. 2023. Vol. 12. Issue 113. DOI: 10.3390/resources12100113.
16. Kongar-Syuryun, C., Klyuev R.V., Golik V.I., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability. *Urban Science*. 2024. Vol. 8. Issue 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.
17. Lööw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019. Vol. 36. Issue 4. pp. 701–707.
18. Lovchikov A.V. A New Concept of the Mechanism of Rock-Tectonic Bursts and Other Dynamic Phenomena in Conditions of Ore Deposits. *Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 5. No. 1. pp. 30–38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38.
19. Zemskov A.N., Liskova M.Yu., Sharipzyanova G.Kh. Regularities of changes in the gas-dynamic and geomechanical situation at potash mines. Sustainable development of mountain territories. 2021. Vol. 13. No. 3. pp. 426–432.

DOI: 10.46698/i4023-5828-1369-h

Original paper

## Featural analysis, protective capacity and potential of shallow hydro-geological layers of densely populated residential area, Akwa Ibom State, Southern Nigeria

K.R. Ekanem , U.U. Inyang , N.N. Okonna 

Department of Science Technology, School of Applied Sciences, Akwa Ibom State Polytechnic, Ikot Osurua, Nigeria, e-mail: ekanemkufre03@gmail.com, udemeinyang655@gmail.com

Received: 22.06.2024, revised: 15.09.2024, accepted: 17.09.2024

**Abstract: Relevance.** Geoelectrical resistivity technology (GRT), together with geological data, was employed to delineate the hydrokinetic characteristics, protective capacity, and groundwater potential of a sought-after housing development in Southern Nigeria. **Aim.** The GRT utilized Schlumberger's 1-D vertical electrical resistivity sounding (VES) and 2-D electrical resistivity tomography (ERT) techniques. **Methods.** The primary and secondary geoelectric indices were combined with existing geological data to calculate hydrodynamic parameter maps of the shallowest aquifer unit. These maps are crucial for effectively managing the unconfined aquifer system beneath, which is extensively utilized in the area. The study area's saturation dynamics were determined by analyzing total porosity (ranging from 0.282 to 0.691), specific yield (ranging from 0.040 to 0.107), field capacity/specific retention (ranging from 0.242 to 0.623), and storage-dependent drainability efficiency (ranging from 7.6% to 40.5%). **The results** indicated that the area experiences the most effective release of pore water when the drainability efficiency, which is reliant on storage, exceeds 21%. The range of potential index parameters, including transmissivity (57.4–4339.2 m<sup>2</sup>/day), transverse resistance/aquifer potential scale (453.6–152,756.5 Ωm<sup>2</sup>), permeability (91.7–7269.7 mD), and hydraulic conductivity (57.4–4339.2 m/day), exhibited favorable potential but limited to moderate protection, as indicated by the longitudinal conductance index (0.004–0.6218 Siemens). Given the strong preference of many people to live in this rapidly growing and competitive housing estate, it is important to establish effective waste disposal systems to prevent the leakage and infiltration of harmful substances, such as leachates and other organic/inorganic waste, into the vulnerable underground water sources that provide water for various purposes.

**Keywords:** GRT, VES, hydrokinetic properties, parametric characterization, leachates.

**Acknowledgments:** This work was financially supported by the TETFUND.

**For citation:** Ekanem K.R., Inyang U.U., Okonna N.N. Featural analysis, protective capacity and potential of shallow hydro-geological layers of densely populated residential area, Akwa Ibom State, Southern Nigeria. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 99-111. DOI: 10.46698/i4023-5828-1369-h

УДК 550.837:550.3

DOI: 10.46698/i4023-5828-1369-h

Оригинальная статья

## Анализ характеристик, защитная способность и потенциал неглубоких гидрогеологических слоев густонаселенного жилого района, штат Аква-Ибом, Южная Нигерия

К.Р. Еканем , У.У. Иньян , Н.Н. Оконна 

Факультет научных технологий, Школа прикладных наук, Государственный политехнический институт Аква Ибом, Икот Осуруа, штат Аква Ибом, Нигерия, e-mail ekanemkufre03@gmail.com, udemeinyang655@gmail.com

Статья поступила: 22.06.2024, доработана: 15.09.2024, принята к публикации: 17.09.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Технология геоэлектрического сопротивления (GRT) вместе с геологическими данными была использована для определения гидрокинетических характеристик, защитной способности и потенциала грунтовых вод востребованной жилой застройки в Южной Нигерии. **Цель.** Технология GRT использовалась в виде способов одномерного вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и двухмерной электрической томографии с помощью установки Schlumberger (ERT). **Методы.** Первичные и вторичные геоэлектрические индексы сопоставлялись с имеющимися геологическими данными для расчета карт гидродинамических параметров наиболее мелкого водоносного горизонта. Указанные карты имеют решающее значение для эффективного управления системой незамкнутого водоносного горизонта под ним, которая широко используется в этом районе. Динамика насыщения исследуемой области определялась путем анализа общей пористости (в диапазоне от 0,282 до 0,691), удельной водоотдачи (в диапазоне от 0,040 до 0,107), полевой влагоемкости/удельного удержания (в диапазоне от 0,242 до 0,623) и эффективности дренируемости, зависящей от хранения (в диапазоне от 7,6% до 40,5%). **Результаты.** Установлено, что наиболее эффективное высвобождение поровой воды происходит, когда дренируемость превышает 21%. Диапазон потенциальных индексных параметров, включая проницаемость (57,4–4339,2 м<sup>2</sup>/день), поперечное сопротивление/шкала потенциала водоносного горизонта (453,6–152756,5 Ом·м<sup>2</sup>), проницаемость (91,7–7269,7 мД) и гидравлическая проводимость (57,4–4339,2 м/день), показывают положительный потенциал, но ограниченный умеренной защитой, на что указывает индекс продольной проводимости (0,004–0,6218 Сименс). Учитывая стремление большинства населения проживать в этом быстрорастущем и конкурентоспособном жилом комплексе, важно создание эффективных систем утилизации отходов для предотвращения утечки и инфильтрации вредных веществ, таких как фильтраты и другие органические/неорганические отходы, в уязвимые подземные источники воды, которые население использует для различных целей.

**Ключевые слова:** GRT, ВЭЗ, гидрокинетические свойства, параметрическая характеристика, фильтраты.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке TETFUND.

**Для цитирования:** Еканем К.Р., Иньян У.У., Оконна Н.Н. Анализ характеристик, защитная способность и потенциал неглубоких гидрогеологических слоев густонаселенного жилого района, штат Аква-Ибом, Южная Нигерия. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 99-111. DOI: 10.46698/i4023-5828-1369-h

## Introduction

Shallow sedimentary hydrogeological units play a crucial role in storing groundwater at both regional and local levels. However, obtaining reliable hydrogeological data to effectively understand their distribution and hydraulic properties can be challenging, costly, and time-consuming. Accurate knowledge of hydraulic parameters, including porosity, hydraulic conductivity, permeability tortuosity, specific yield, and specific retention, is essential for assessing the resources of a groundwater system. These parameters help evaluate the potential, protectivity, and vulnerability of the system to contamination, which are all crucial factors in targeted integrated water management [Bhatt, 1993; Tizro et al., 2012; Frind, Molson, 2018]. Porosity is a hydrokinetic feature of a hydrogeological unit that represents the ratio of the void space in a particular volume of soil or rock sample to its total volume. It is typically stated as a percentage [Hilberts et al., 2005; George et al., 2011]. Voids, pore spaces, and cracks play a crucial role in hydrodynamic investigations and parametric characterization in the fields of hydrogeology and hydrogeophysics. According to Fetter (1988), soil moisture and groundwater are found in the empty spaces within the solid earth. This dictates how pollutant plumes are spread in interconnected pore networks. The hydrodynamic properties of rocks and soils on Earth, such as total porosity ( $\phi$ ), depend on factors such as the geometry, extent of voids, arrangement of grain sizes, and interconnectedness of the pores. These properties determine how water accumulates and passes through the material [Karanath, 1994; George et al., 2011]. According to Mazac et al. (1985), the size of grains does not affect the overall porosity in sediments of the same size. The effective porosity encompasses both specific yield and specific retention. Specific retention refers to the amount of water that is retained within a hydrogeological unit due to capillary forces and adhesion when it is emptied. The specific yield refers to the substantial quantity of water that is readily accessible for groundwater extraction when the water table is lowered, resulting in the drainage of porous materials [Ikpe et al., 2022]. The soil water retention curve is a tool that quantifies the relationship between the water content of the soil and the capillary pressure it exerts. This relationship is influenced by both climatic conditions and the velocity of water flow at the pore scale, which is determined by the specific yield and specific retention capacity [Nielsen, Perrochet, 2000]. These factors are valuable for calculating the capacity of water pumps for various aquifer units using the storage-dependent drainability efficiency tool, which is the ratio of specific yield to specific retention. The methods commonly employed to investigate specific yield, as outlined by Todd [1980], include pumping, field saturation, recharge analysis, particle density measurement, and sampling following water table decline. Nevertheless, as stated by George et al. [2011], these methods require a significant investment of resources, including equipment, borehole data, and a substantial workforce, due to the complex and labor-intensive nature of each methodology. From an economic standpoint, the geo-sounding technique has been demonstrated to be an effective method for assessing the structure, vulnerability, and potential of underground hydrogeological units in both large and medium-sized study areas [Zohdy et al., 1974; Zohdy, 1989; George, 2021]. Geo-sounding technologies operate under the assumption that the rock/soil matrix is primarily an insulating material. This means that it can conduct electric current when there is water or moisture present in its pores [Ibuot et al., 2013, 2019]. The skillful application of geo-sounding techniques by numerous researchers has enabled the

production of reliable evidence that revealed both qualitative and quantitative estimates of transmitting variables of hydrogeological units [Obianwu et al., 2011; Obiora et al., 2015; Ibuot et al., 2019] The effectiveness of studying the parametric characteristics, protective nature, and potential of hydrogeological units can be enhanced by analyzing the spatial distribution of aquifer system indices on maps. This approach has been explored in many studies conducted by Aweto (2011) and Shamsudduha et al. (2012). This paper aims to investigate the estimates of primary and secondary geo-electrical attributes obtained through geo-electrical resistivity technology, along with other hydro-geological variables such as specific yield and retentive retention. The goal is to characterize a medium-sized housing estate and assess the protectivity, vulnerability, and potential of shallow groundwater resources that are heavily abstracted by the residents of the estate.

## Description of the Study Area

### Site Location

Shelter Afrique, a moderately-sized housing development, is situated in the mid-western region of Akwa Ibom State, located in Southern Nigeria. The majority of its land area is in Ibesikpo County, with a smaller section in Uyo County (fig. 2). The occupied territory spans from latitudes  $4.958^{\circ}$  to  $4.9917^{\circ}$ N and longitudes  $7.9417^{\circ}$  to  $7.9750^{\circ}$  E, with an approximate area of 30.8 square kilometers. The region is characterized by a flat terrain, with altitudes ranging from a low point of 54 meters to a high point of 68 meters above sea level. The average elevation is 59 meters, as shown in figure 1. The study area is a recently constructed and quickly growing residential area in the Uyo Senatorial District. It is home to past and current governors, deputy governors, members of the political class, and other influential individuals from Akwa Ibom State, as well as other states in Nigeria and those living abroad. The area is characterized by a high population density of individuals and physical infrastructure due to its medium size. The region experiences a semi-temperate climate characterized by distinct dry and wet seasons. The dry season lasts from April to September, while the wet season occurs from October to March. The entire catchment area is affected by the tributaries of the Enyiong River, which is the primary source of perennial surface water in Itu County. The temperature range spans from 26 to 32 °C, while the annual rainfall varies from 200 to 250 cm [George, 2021].

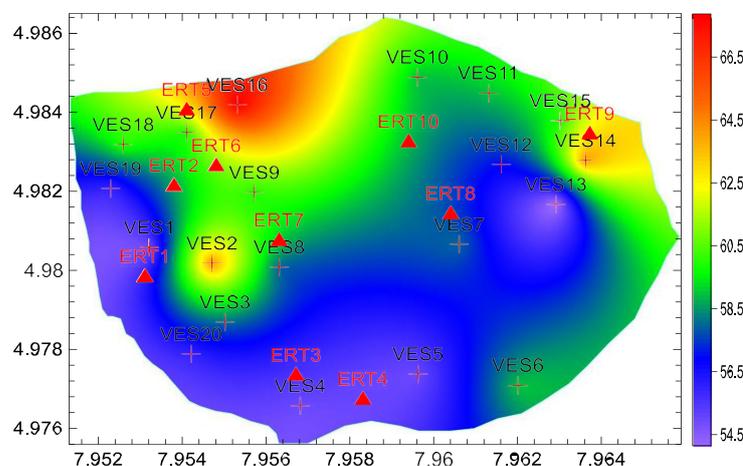


Fig. 1. Elevation map of the study area showing the topography of the study area

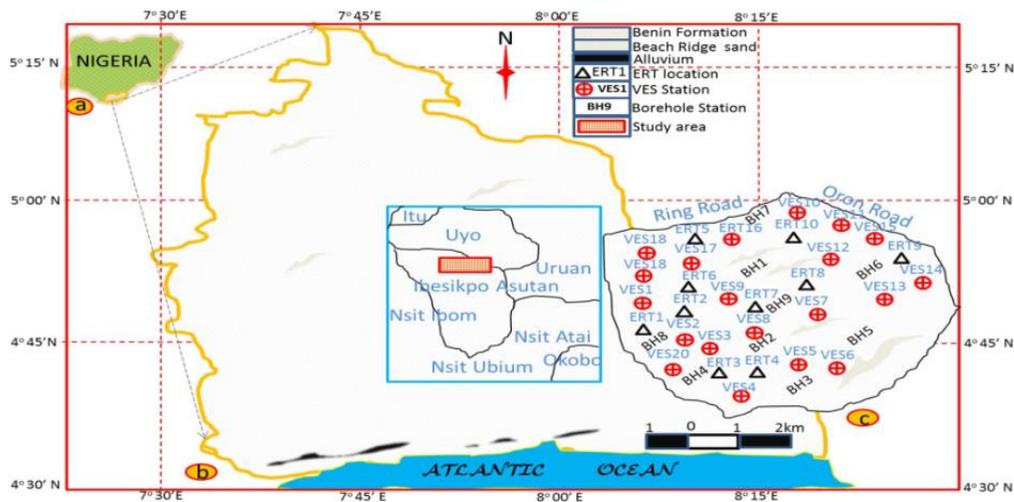


Fig. 2. Schematic map of Nigeria.

- (a) geographic location of Akwa Ibom State in Southern Nigeria;
- (b) map of Akwa Ibom State showing Atlantic Ocean and the geographical settings of the study area;
- (c) geographic and model domain map showing geology, VES points and Boreholes

### Geology of the Study Area

The groundwater extraction in the studied region occurs within the Youngest Continental Plain sand/Benin Formation of the Niger Delta in Southern Nigeria. The Benin Formation, which consists of alternating layers of sandstones and small amounts of claystones, is located above the Agbada Formation and Akata Formation in a specific order of burial depth [Petters, 1982, 1989]. The research region is located in Southern Nigeria, as indicated by the Geological Survey Map series of Nigeria on sheets 79 for Umuahia and 82 for Calabar, with a scale of 1:250,000.

Benin Formation, often referred to as Coastal Plain Sand [GSN, 1962]. Specifically, the area is predominantly located within the Benin Formation and partially within the Beach Ridge Complex and Alluvium of the Quaternary Period, as seen in figure 2. The composition of alluvial sands ranges from fine to coarse grained sands (fig. 3), whereas the light grey argillites are relatively little in quantity and scattered irregularly. Following rainfall, it is occasionally observed that sedimentation, erosion, and morphological differences occur in the surface layers. The alluvial sediments consistently occur at lower elevations and are attracted by gravity. The alluvial grains, characterized by a greyish hue, exhibit a characteristic texture that varies from fine to coarse, with alternating intercalations, as described by Short and Stauble in 1967. The presence of groundwater in the area is influenced by various geological factors, including the structure, disturbances in the stratigraphy, and the arrangement of hydrogeological units [Tizro, 2002; Akpan et al., 2013]. The hydraulic interconnections between the seasonal reduction in water levels and the groundwater level or the topography of groundwater conduits determine the depth and shape of wells and water bodies.

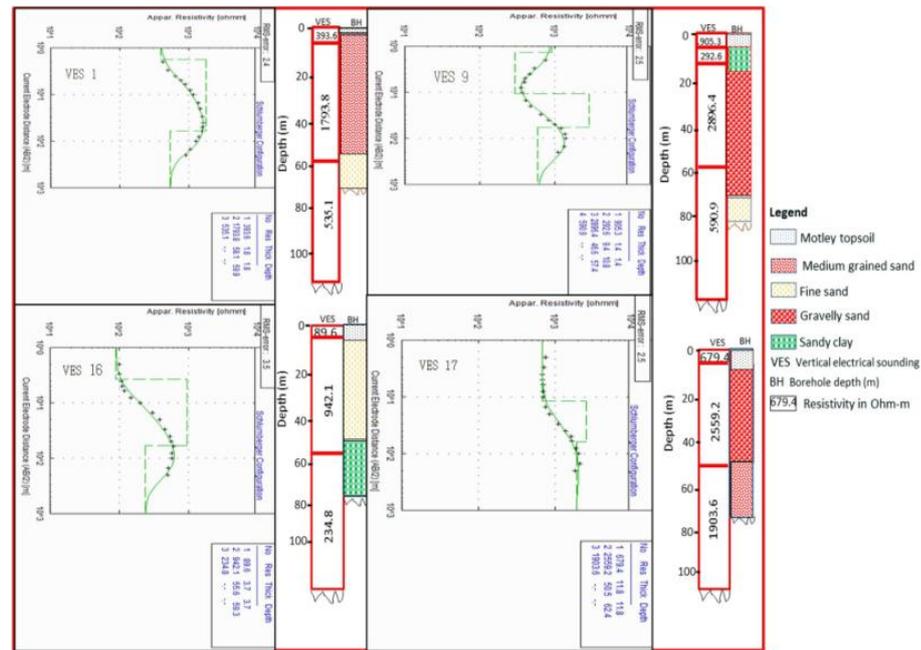


Fig. 3. Sampled correlations of VES 1, 9, 16 and 17 curves with their adjoining lithological log in the study area

## Materials and Method

The research region employed the geo-sounding resistivity technology, which consisted of a 1-D vertical electrical sounding (VES) and 2-D electrical tomography (ERT). The IGIS signal enhancement resistivity meter SSP-MP-ATS and its accessories were used in close proximity to water wells for the execution of this technology. Twenty VES stations and ten ERT stations were selected based on the existing infrastructure in the area (fig. 2). The VES process utilized the Schlumberger array, with a maximum spread (AB) of 400 m for the current electrodes. On the other hand, the 2-D technique employed the Wenner electrode configuration, with a spread length of 105 m, taken at 5 m intervals or separations [Thomas et al., 2020]. Earth apparent resistance,  $R_{as}$  and  $R_{aw}$ , were measured in each VES and ERT technique, following the recommended precautions outlined by Zohdy et al. [1974] and Akpan et al. [2013]. The apparent resistivities  $\rho_{as}$  and  $\rho_{aw}$  for VES and ERT methods were determined using the equations provided in Eqs. 1 and 2, respectively.

$$\rho_{as} = n \cdot \frac{(AB/2)^2 - (MN/2)^2}{MN} \cdot R_{as} \quad (1)$$

$$P_{aw} = 2JraR_{aw}, \quad (2)$$

where  $AB$ ,  $MN$  and  $a$  are, respectively, current electrode separation, potential electrode separation and Wenner electrode separations. The entire term multiplied by  $R_{as}$  and  $R_{aw}$  in Schlumberger and Wenner electrode configurations, respectively, in order to obtain the apparent resistivities  $P_{as}$ .

The apparent resistivities were graphed manually on a logarithmic scale, using half of the current electrode separations. This was done to eliminate any noisy data points (outliers) that deviate from the overall trend of the curve. Subsequently, the curves were analyzed using a computer program called WINRESIST, which utilizes 1-D least square computer-assisted forward modeling. This software, developed by Vander Velpen and Sporry in 1993, quantitatively interprets the data electronically. The analysis takes into account the restrictions provided by adjacent logged borehole information. The software program provided data on the interpreted curve by determining the main geo-electric parameters such as layer resistivity, layer thickness, and layer depth. It also calculated the root-mean square (usually less than 10%), which measures the accuracy of the fit between the theoretical curve and the actual field data (refer to figure 2). The ERT images were modeled by inverting the apparent resistivities obtained from Eq. 2. This was done by preparing the separation and apparent resistivity values together with the RES2DINVER 3.59 Geotomo software code, which was developed by Loke and Barker [1996], Loke and Dalhin [2002], and Loke et al. [2003]. The program constructs a resistivity model of the shallow subsurface using an iterative smoothness-constrained least squares method, as seen in the resulting electrical resistivity tomography (fig. 4). Table 1 presents the geographic information, as well as the measured and predicted hydrokinetic parameters, of the shallowest aquifer that lies above the other deeper aquifers in the unconfined aquifer system.

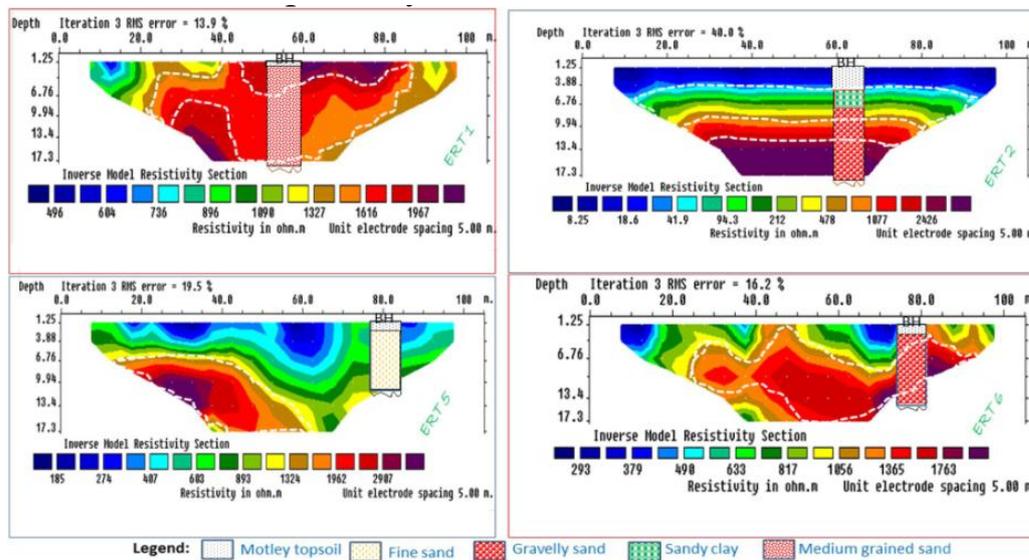


Fig. 4. Representatives of ERTs 1, 2, 5 and 6 with their adjoining lithological log in the study area

$a_w$ : water electrical conductivity (S/m),  $p_w$ : water resistivity ( $\Omega$  m),  $F$ : formation factor,  $k_p$ : permeability mD),  $kh$ : hydraulic conductivity (m/day),  $p_b$ : bulk resistivity of the topmost aquifer ( $\Omega$  m),  $p_{sat}$ : resistivity of saturated part of aquifer ( $\Omega$  m),  $p_{unsat}$ : resistivity of unsaturated part of aquifer ( $\Omega$  m),  $S_y$ : Specific yield,  $\phi_f$ : specific retention and  $h$ : thickness (m) of shallowest aquifer considered.

Table 1

## Measured and estimated hydrokinetic properties associated with the aquifer system

VES/ ERT No	Location	Long. (deg.)	Lat. (deg.)	$a_w$ (S/m)	$p_w$	$p_b$	$P_{sat}$	$F$	$P_{unsat}$	$\phi$	$s_y$	$\epsilon_f$	$kh$	$k_p$	h
1/1	Imoh ita	7.9492	4.9791	0.000711	1406.9	1793.8	386.9	1.27	393.6	0.641	0.063	58.1	58.1	58.1	58.1
2	murray Avenue	7.9522	4.9790	0.000587	1702.9	2051.9	349.0	1.20	351.8	0.660	0.046	52.6	52.6	52.6	52.6
3/2	Ambasador ubok udom	7.9506	4.9778	0.00496	201.6	779.9	578.3	3.87	1234.4	0.368	0.062	7.8	7.8	7.8	7.8
4/3	kufre ekanem Crescent	7.9517	4.9750	0.00061	1639.6	2591.8	952.2	1.58	996.3	0.576	0.052	23.4	23.4	23.4	23.4
5/4	godswill akpabio Crescent 4	7.9594	4.9745	0.009434	106.0	411.9	305.9	3.89	1464.2	0.367	0.106	19.3	19.3	19.3	19.3
6	Udo udoma street	7.9606	4.9786	0.00052	1923.0	2109.9	186.9	1.10	187.6	0.691	0.058	72.4	72.4	72.4	72.4
7	Alison attach	7.9619	4.9815	0.010989	91.0	301.1	210.1	3.31	560.5	0.398	0.107	16.6	16.6	16.6	16.6
8/7	godswill akpabio Crescent 1	7.9531	4.9800	0.009174	109.0	427.1	318.1	3.92	1121.1	0.366	0.090	15.0	15.0	15.0	15.0
9	godswill akpabio Crescent 2	7.9556	4.9862	0.013699	73.0	292.6	219.6	4.01	905.3	0.362	0.093	9.4	9.4	9.4	9.4
10	Godswill akpabio Crescent 3	7.9597	4.9878	0.059524	16.8	71.2	54.4	4.24	361.1	0.352	0.100	29.5	29.5	29.5	29.5
11/10	shelter Afrique Entrance	7.9614	4.9855	0.001617	618.3	1131.4	513.1	1.83	562.2	0.535	0.060	69.9	69.9	69.9	69.9
12/8	chris Ekpenyong	7.9639	4.9830	0.000558	1793.4	2085.8	292.4	1.16	294.2	0.672	0.050	50.2	50.2	50.2	50.2
13	sunday Mbang street	7.9644	4.9820	0.052356	19.1	81.0	61.9	4.24	348.3	0.352	0.094	5.6	5.6	5.6	5.6
14	aniekan Umana street	7.9658	4.9835	0.071429	14.0	53.0	39.0	3.79	110.5	0.372	0.084	18.3	18.3	18.3	18.3
15/9	godswill akpabio crescent 5	7.9675	4.9838	0.1	10.0	43.7	33.7	4.37	208.3	0.346	0.092	77.7	77.7	77.7	77.7
16	Akpan hogan ekpo avenue	7.9550	4.9878	0.001172	852.9	942.1	89.2	1.10	89.6	0.689	0.073	55.6	55.6	55.6	55.6
17	Justice edet robert	7.9539	4.9877	0.000526	1900.0	2559.2	659.2	1.35	679.4	0.624	0.077	50.5	50.5	50.5	50.5
18/5	Engr atauyo Ekwerre	7.9525	4.9867	0.000956	1045.9	1255.5	209.6	1.20	211.8	0.661	0.062	73.0	73.0	73.0	73.0
19/6	Dan udofia avenue	7.9522	4.9853	0.000662	1510.0	1938.8	428.8	1.28	436.5	0.639	0.062	56.1	56.1	56.1	56.1
20	uduak udoudoh avenue	7.9494	4.9755	0.021322	46.9	308.3	261.4	6.57	1409.0	0.282	0.040	5.0	5.0	5.0	5.0
Mean	0.144	754.0	81,918.1	307.5	2.38	596.3	0.470	0.075	0.395	21.4	2445.2	38.3			
Range	0.004–0.6218	10.0– 1923.0	43.7– 2591.8												
	33.7–952.2	1.1–6.57	89.6– 1464.2	0.282–0.691	0.040– 0.107	0.242– 0.623	57.4– 4339.2	91.7– 7269.7	5.0–77.7						

## Protectivity and potentiality of shallow unconfined hydrogeological units assessed

The assessment of the protective capacity and potential of the unconfined/open aquifers in the medium-sized housing estate in Shelter Afrique was conducted using the Dar Zarrouk parameters. The longitudinal conductance (S) was estimated as  $h/p$  in Siemens, while the transverse resistance (TR) was expressed as  $(h \cdot p)$  in  $\Omega m^2$ . Additionally, the transmissivity (T) was estimated as  $(k \cdot h)$  in  $m^2 s^{-1}$ . The protection of an aquifer system relies on the characteristics of the lithological unit that covers and surrounds it. The level of protection and susceptibility to surface contamination is directly related to its longitudinal conductance S. Longitudinal conductance values below 1.0 Siemens suggest that the overburden medium has a negligible amount of impermeable argillites above the aquifer system, indicating a high rate of infiltration for surface contaminants.

### Result and Discussion

The geoelectrical resistivity technology was corroborated by mechanical boreholes situated adjacent to the profiles, aiding in the interpretation of VES and ERT data. The primary objective of electrical studies is to accurately determine the subsurface resistivity distribution by conducting measurements on either the surface or a borehole [Braga et al., 2006]. An electrical current is applied to the ground using a set of current electrodes, and the resulting voltage is measured using another set of electrodes. The variability in resistivity was determined by performing inversion, which involves finding the resistivity model that best fits the whole sequence of quadrupole observations. The apparent resistivities were calculated using Equations 1 and 2 [Sri, Muhammed, 2012]. The nonlinear problem of inversion was numerically solved using iterative techniques, as described by Tripp et al. in 1984. In order to avoid any confusion, the actual resistivities were taken into account when discussing the matter.

The interpretation of the geoelectrical resistivity technology data from VES and ERT was corroborated by adjacent mechanical boreholes as shown in Fig. 5, which is a pictorial view of 2-D image map of distribution of (a) topmost aquifer transmissivity ( $m^2/day$ ) (b) topmost aquifer transverse resistance ( $\Omega m^2$ ) (c) topmost aquifer longitudinal conductance (Siemens), and (d) storage-dependent drainability efficiency (%).

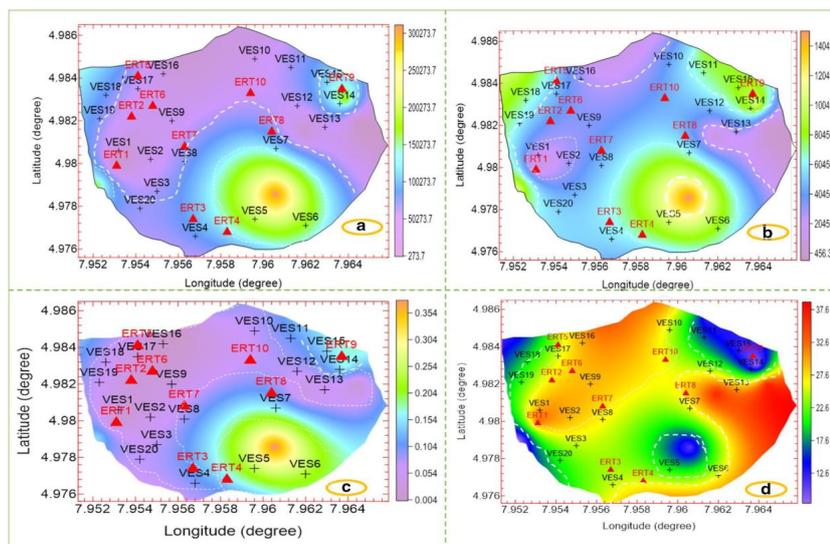


Fig. 5. 2-D image map of distribution of (a) topmost aquifer transmissivity ( $m^2/day$ ) (b) topmost aquifer transverse resistance ( $\Omega m^2$ ) (c) topmost aquifer longitudinal conductance (Siemens), and (d) storage-dependent drainability efficiency (%)

The primary objective of electrical investigations is to accurately determine the sub-surface resistivity distribution in a cost-effective manner, using measurements taken either on the surface or in a borehole [Braga et al., 2006]. An electrical current is applied to the ground using a set of current electrodes, and the resulting voltage is measured using another set of electrodes. The variability of resistivity was assessed by performing inversion, which involves determining the resistivity model that best matches the whole sequence of quadrupole observations. The apparent resistivities were calculated using Equations 1 and 2 [Sri, Muhammed, 2012]). Numerical methods were employed to solve the nonlinear problem of inversion, utilizing iterative techniques [Tripp et al., 1984]. In order to avoid any confusion, the actual resistivities were taken into account when discussing the unknown situation.

Table 2

## Summary of

VES number	ERT number	Location	Transverse resistance R ( $\Omega m^2$ )	Longitudinal conductance S (mhos)	ASPC rating	Transmissivity ( $m^2/day$ )	Comparative aquifer potentials
1	1	Imoh ita	104,219.78	0.148	Weak	149,033.1	Very high
2		Murray avenue	107,929.94	0.150	weak	163,159.5	Very high
3	2	Ambasador ubokudom	6083.22	0.006	Poor	1219.7	High
4	3	Kufre ekanem crescent	60,648.12	0.023	Poor	31,108.0	Very high
5	4	Godswill akpabio crescent 4	7949.67	0.013	Poor	2990.0	High
6		Udo udoma street	152,756.76	0.386	Moderate	314,158.9	Very high
7		Alison attah	4998.26	0.030	Poor	3616.0	High
8	7	Godswill akpabio crescent 1	6406.5	0.013	Weak	2284.0	High
9		Godswill akpabio crescent 2	2750.44	0.010	Poor	1365.6	High
10		Godswill akpabio crescent 3	2100.4	0.082	Poor	3821.7	High
11	10	Shelter afrique entrance	79,084.86	0.124	Weak	62,123.7	Very high
12	8	Chris ekpenyong	104,707.16	0.171	Weak	176,187.6	Very high
13		Sunday mbang street	453.6	0.016	Poor	724.5	Moderate
14		Aniekan umana street	969.9	0.166	Weak	2993.9	High
15	9	Godswill akpabio crescent 5	3395.49	0.373	Moderate	9456.9	High
16		Akpan hogan ekpo avenue	52,380.76	0.621	Moderate	235,294.9	Very high
17		Justice edet robert	129,239.6	0.074	Poor	108,529.9	Very high
18	5	Engr atauyo ekwerre	91,651.5	0.345	Moderate	229,394.0	Very high
19	6	Dan udofia avenue	108,766.68	0.129	Weak	140,625.4	Very high
20		Uduak udoudoh avenue	1541.5	0.004	Poor	273.7	Low
Mean				0.144		81,918.1	
51,401.7							
Range				0.004–0.6218		273.7–314,158.9	
453.6–152,756.5							

## Conclusion

The geoelectrical resistivity technology and geological information have been used to map the shallowest hydrogeological unit of the unconfined aquifer system in a medium-sized housing estate of Shelter Afrique. The findings unveiled the dispersion of several characteristics, as well as the ability to safeguard and the potential of the aquifer system in the highly sought-after residential area in Akwa Ibom State, Southern Nigeria. The findings indicated that the hydrogeological units, consisting of fine- to medium- and medium- to coarse-grained sands, have a high capacity for extracting groundwater. However, they offer only moderate to poor protection, as indicated by the Transmissivity/aquifer potential Scale [Gheorghe, 1978] and the range of values for longitudinal conductance that determine the protective scale [Oladapo et al., 2004]. The hydrokinetic parameters inferred from geological information align with those obtained from similar geological conditions both within and outside the study area. The innovative aspect of this study lies in the determination of the specific yield and field capacity, as well as the SDE, which provide a hydrodynamic explanation for the dynamics of pores and the factors that affect the optimal and effective extraction of pore water through well pumping. An analysis has been conducted to determine the hydrokinetic characteristics, parametric maps, and the potential and protectivity maps of the aquifer system. This analysis is aimed at facilitating the efficient extraction, monitoring, and management of groundwater resources. Given the high demand for living in this newly constructed housing estate, it is crucial to establish effective waste disposal systems to prevent the leakage and contamination of harmful substances such as leachates and other organic/inorganic waste into the underlying hydrogeological units. These units store groundwater that is extracted for various purposes and are naturally susceptible to damage.

## References

1. Akpan A.E., Ugbaja A.N., George N.J. Integrated geophysical, geochemical and hydrogeological investigation of shallow groundwater resources in parts of the Ikom-Mamfe Embayment and the adjoining areas in Cross River State, Nigeria. *Environmental Earth Sciences*. 2013. Vol. 70. Issue 3. pp. 1435–1456. DOI: 10.1007/s12665-013-2232-3.
2. Bhatt K. Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values. *Journal of Hydrology*. 1993. Vol. 149. Nos. 1-4. pp. 1–8.
3. Braga A.C.O., Dourado J.C., Malagutti F.W. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. *Brazilian Journal of Geophysics*. 2006. Vol. 24. No. 4. pp. 573–581.
4. Frind O., Molson J.W. Issues and options in the delineation of well capture zones under uncertainty. *Groundwater*. 2018. Vol. 56. Issue 3. pp. 366–376. DOI: 10.1111/gwat.12644.
5. Gheorghe A. Processing and synthesis of hydrological data. Abacus Press Junebridge Wells, Kent. 1978. pp. 122–136.
6. George N.J. Geo-electrically and hydrogeologically derived vulnerability assessments of aquifer resources in the hinterland of parts of Akwa Ibom State, Nigeria. *Solid Earth Sciences*. 2021. Vol. 6. Issue 2. pp. 70–79. DOI: 10.1016/j.sesci.2021.04.002.
7. George N.J., Obianwu V.I., Obot I.B. Laboratory estimation of aquifer effective porosities from core samples obtained during borehole drilling in parts of the Niger Delta Region, South-eastern Nigeria. *Advances in Applied Science Research*. 2011. Vol. 2. Issue 1. pp. 153–162.
8. GSN. Nigerian geological map series. Sheets 79 (Umuahia) and 82 (Calabar). 1962.
9. Hilberts A., Troch P.A., Paniconi C. Storage-dependent drainable porosity for complex hillslopes. *Water Resources Research*. 2005. Vol. 41. Issue 6. Art. No. 06001. DOI: 10.1029/2004WR003725.

10. Ibuot J.C., Akpabio G.T., George N.J. A survey of the repository of groundwater potential and distribution using geo-electrical resistivity method in Itu Local Government Area (LGA), Akwa Ibom State, southern Nigeria. *Central European Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 5. Issue 4. pp. 538–547.
11. Ibuot J.C., George N.J., Okwesili A.N., Obiora D.N. Investigation of litho-textural characteristics of aquifer in Nkanu West Local Government Area of Enugu state, southeastern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*. 2019. Vol. 153. pp. 197–207. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.03.004.
12. Ikpe E.O., Ekanem A.M., George N.J. Modelling and assessing the protectivity of hydrogeological units using primary and secondary geoelectric indices: a case study of Ikot Ekpene Urban and its environs, southern Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2022. Vol. 8. Issue 4. pp. 4373–4387.
13. Karanath K.R. *Hydrogeology*. Mc Graw-Hill Publishing Co. Ltd. 1994. 458 p.
14. Loke M.H., Acworth I., Dalhin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*. 2003. Vol. 34. Issue 1. pp. 182–187.
15. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*. 1996. Vol. 44. Issue 1. pp. 131–152.
16. Loke M.H., Dalhin T. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*. 2002. Vol. 49. Issue 3. pp. 149–462.
17. Nielsen P., Perrochet P. Watertable dynamics under capillary fringes: experiments and modelling. *Advances in Water Resources*. 2000. Vol. 23. Issue 8. pp. 503–515.
18. Obianwu V.I., George N.J., Udofia K.M. Estimation of aquifer hydraulic conductivity and effective porosity distributions using laboratory measurements on core samples in the Niger Delta, Southern Nigeria. *International Review of Physics*. 2011. Vol. 5. No. 1. pp. 19–24.
19. Obiora D.N., Ibuot J.C., George N.J. Evaluation of aquifer potential, geoelectric and hydraulic parameters in Ezza North, southeaster Nigeria, using geoelectric sounding. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 13. pp. 435–444. DOI: 10.1007/s13762-015-0886-y.
20. Oladapo M.I., Mohammed M.Z., Adeoye O.O., Adetola B.A. Geo-electrical investigation of the Ondo state housing corporation estate Ijapo Akure, Southwestern Nigeria. *Journal of Mining and Geology*. 2004. Vol. 40. Issue 1. pp. 41–48.
21. Petters S.W. Central West African cretaceous–tertiary benthic foraminifera and stratigraphy. *Paleoentograph A*. 1982. Vol. 179. pp. 1–104.
22. Petters S.W. Akwa Ibom State: physical background, soil and landuse and ecological problems. Technical Report for Government of Akwa Ibom State. 1989. 603 p.
23. Sri N., Muhammed C. Equation estimation of porosity and hydraulic conductivity of Ruhrtal aquifer in Germany using near surface geophysics. *Journal of Applied Geophysics*. 2012. Vol. 84. pp. 77–85.
24. Thomas J.E., George N.J., Ekanem A.M., Nsikak E.E. Electrostratigraphy and hydrogeochemistry of hyporheic zone and water-bearing caches in the littoral shorefront of Akwa Ibom State University, Southern Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192. Art. No. 505. DOI: 10.1007/s10661-020-08436-6.
25. Tizro A.T., Voudouris K., Basami Y. Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method—a case study in western Iran. *Journal of Hydrology*. 2012. Vols. 454–455. pp. 160–172. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.009.
26. Tizro A.T. Hydrogeological investigations by surface geoelectrical method in hard rock formation - A case study. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 2002. Vol. 45. pp. 37–41. DOI: 10.7186/bgsm45200206.
27. Todd D.K. *Groundwater Hydrology*. New York. Wiley. 1980. 535 p.
28. Tripp A.C., Hohmann G.W., Swift C.M. Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*. 1984. Vol. 49. Issue 10. pp. 1708–1717.

29. Vander Velpen B.P.A., Sporry R.J. Resist: a computer program to process resistivity sounding data on PC compatibles. *Computers and Geosciences*. 1993. Vol. 19. Issue 5. pp. 691–703.
30. Zohdy A.A.R. A new method for automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*. 1989. Vol. 5. Issue 2. pp. 245–252.
31. Zohdy A.A.R., Eaton G.P., Mabey D.R. Application of surface Geophysics to groundwater investigations. US Geological Survey. *Techniques of Water-Resources Investigations*. Book 2. 1974. 116 p.

УДК 553.41

DOI: 10.46698/k7180-2394-5711-d

Оригинальная статья

## Чернореченское рудопроявление золота (Восточный Донбасс)

С.Г. Парада 

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

Статья поступила: 05.08.2024, доработана: 29.08.2024, принята к публикации: 30.08.2024

**Резюме:** Статья посвящена характеристике Чернореченского рудопроявления, – одного из перспективных золоторудных объектов Восточного Донбасса. **Актуальность** определяется необходимостью выявления промышленных запасов золота в Восточном Донбассе для диверсификации горнодобывающей отрасли. **Цель.** Предоставление научной общественности результатов изучения Чернореченского рудопроявления золота и авторского анализа особенностей его геологического строения на основе современных геодинамических концепций. Исходными данными явились материалы по геологическому строению, магматизму и рудоносности Восточного Донбасса, представленные в производственных отчетах о геологической съемке и поисковых работах на цветные металлы и золото, проведенных в последние пятьдесят лет, а также база цифровых данных результатов современных геофизических среднемасштабных съемок, охватывающих Восточную часть Донецкого бассейна и прилегающие территории. **Методы.** Металлогенический анализ геологических и геофизических данных на основе современных геодинамических концепций, в соответствии с которыми проявление магматизма несветаевского комплекса более всего отвечает обстановке конвергентных окраин, а магматизма миусско-керчикского комплекса – обстановке трансформных окраин. **Результаты.** Чернореченское рудопроявление золота является наиболее изученным в составе Кондаковской рудно-магматической системы (РМС). Здесь установлены золоторудные зоны с содержаниями золота до 6–8 г/т. Рудопроявление приурочено к присдвиговой транстензионной структуре растяжения типа веера сбросов, являющейся структурной основой Кондаковской РМС. Геологическую основу рудопроявления составляют два малых штока андезито-дацитов в центральной части РМС. В составе рудопроявления выявлены четыре рудные зоны северо-западного простирания. Протяженность зон от 550 до 900 м, мощность от 10 до 145 м. Они представлены тектонически нарушенными и метасоматически измененными породами в экзо- и эндоконтактах штоков андезито-дацитов. Золоторудная минерализация представлена сульфидно-прожилково-вкрапленным типом, в составе которого преобладает пирит, а также отмечаются халькопирит, арсенопирит, галенит и сфалерит.

**Ключевые слова:** рудопроявление, золото, интрузивный комплекс, рудно-магматическая система, Восточный Донбасс.

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

**Для цитирования:** Парада С.Г. Чернореченское рудопроявление золота (Восточный Донбасс). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 112-124. DOI: 10.46698/k7180-2394-5711-d

DOI: 10.46698/k7180-2394-5711-d

Original paper

## Chernorechensk gold ore deposit (Eastern Donbass)

S.G. Parada 

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

Received: 05.08.2024, revised: 29.08.2024, accepted: 30.08.2024

**Abstract:** The article is devoted to the characteristics of the Chernorechensk gold ore deposit, one of the promising gold mining facilities in Eastern Donbass. **The relevance** of the proposed study is determined by the need to assess the prospects for identifying industrial reserves of non-ferrous metals and gold in the Eastern Donbas for the diversification of the mining industry in Southern Russia due to highly liquid metallic minerals, in particular gold. **The aim of the study.** Providing the general scientific community with preliminary results of the study of the Chernorechensk gold ore occurrence, as well as the results of the author's analysis of some features of its geological structure and gold content based on modern geodynamic concepts. The initial data for this study are materials on the geological structure, magmatism and ore content of the Eastern Donbass, presented in production reports on geological surveys and prospecting for non-ferrous metals and gold conducted by production geological organizations in the last fifty years, as well as a digital database of the results of modern geophysical medium-scale surveys covering the Eastern part of the Donetsk basin and adjacent territories. **Methods.** Metallogenic analysis of geological and geophysical data based on modern geodynamic concepts, according to which the manifestations of the magmatism of the Nesvetaevsky complex most correspond to the situation of convergent margins, and the magmatism of the Miusko-Kerchiksky complex correspond to the situation of transform margins. **Results.** The Chernorechenskoye gold occurrence is the most studied in the Kondakovskaya ore-magmatic system (RMS). Gold ore zones with gold grades up to 6-8 g/t have been established here. The ore occurrence is confined to a thrust transtensional stretching structure of the fan type, which is the structural basis of the Kondakovskaya RMS. The geological basis of the ore deposit is formed by two small andesite-dacite stems in the central part of the RMS. Four ore zones of northwestern strike are identified within the ore occurrence. The length of the zones is from 550 to 900 meters, thickness from 10 to 145 meters. They are represented by tectonically disturbed and metasomatically altered rocks in exo- and endocontacts of andesite-dacite drifts. Gold mineralization is represented by a sulfide and vein-embedded type, with pyrite predominating, and chalcopyrite, arsenopyrite, galena and sphalerite also occurring.

**Keywords:** ore occurrence, gold, intrusive complex, ore-magmatic system, Eastern Donbass.

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

**For citation:** Parada S.G. Chernorechensk gold ore deposit (Eastern Donbass). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 112-124. DOI: 10.46698/k7180-2394-5711-d

## Введение

В научном плане и в практическом отношении Восточный Донбасс изучался в основном как угольный бассейн. Вместе с тем в пределах его открытой части были установлены рудопроявления цветных, редких и благородных металлов. Однако, все попытки оценить металлогенический потенциал этого уникального структурного элемента литосферы упираются в отсутствие в свободном доступе информации об известных проявлениях золоторудных минерализаций. Вся информация о

таких объектах хранятся в производственных отчетах о поисковых работах, проведенных в последние годы на территории Восточного Донбасса. Опубликованные данные об особенностях строения и металлогении на основе современных теорий касаются, в основном, Западного Донбасса [Артеменко, Юдин, 2003; Юдин, 2003; Saintot et al., 2003; Трощенко, 2009; и др.].

Целью настоящей статьи является предоставление широкой научной общественности предварительных результатов изучения Чернореченского рудопроявления, – одного из перспективных золоторудных объектов Восточного Донбасса, а также результатов авторского анализа некоторых особенностей его геологического строения и золотоносности на основе современных геодинамических концепций.

Актуальность предлагаемого исследования определяется необходимостью оценки перспектив выявления промышленных запасов цветных металлов и золота в Восточном Донбассе для диверсификации горнодобывающей отрасли Юга России за счет высоколиквидных металлических полезных ископаемых, в частности золота.

Одной из особенностей Восточного Донбасса является проявление магматизма в виде узлов, цепочкой вытягивающихся в субширотный пояс и его приуроченность к южному ограничению Донецкой складчатой системы при быстром затухании магматизма к северу. Некоторые исследователи полагают, что наличие протяженного мезозойского вулканно-плутонического пояса связано с интенсивной фазой активизации, завершающей формирование складчатых структур Донбасса, оживления древних тектонических нарушений и заложения молодых, к которым относится Персияновский, Сулино-Константиновский и более мелкие разломы [Granovsky, 2018].

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

Современные представления о природе магматизма и геодинамики Донбасса в мезозое, изложенные нами ранее [Парада, 2023], основаны на современных геодинамических концепциях о развитии складчатых поясов как областей конвергентных и трансформных окраин континентов [Гребенников, Ханчук, 2021]. Неоднократно обосновано, что конвергентные окраины возникают в результате субдукции литосферных плит. В отличие от них, трансформные окраины являются границами литосферных плит, вдоль которых происходит их относительное скольжение в горизонтальной плоскости. Они сменяют собой во времени конвергентные окраины, связанные с субдукцией, вследствие смены направления движения литосферных плит и других причин. Магматизм трансформных окраин обусловлен формированием разрывов в слэбе и апвеллингом подслэбовой астеносферы с сопутствующим адиабатическим декомпрессионным плавлением.

Таким образом, проявление магматизма в Донбассе отличается малыми размерами интрузивных тел и ограниченностью масштабов проявления. При этом, породы несветаевского и миусско-керчикского комплексов по вещественному составу и условиям локализации, заметно различаются. Магматизм несветаевского комплекса более всего отвечает обстановке конвергентных окраин, а магматизм миусско-керчикского комплекса – обстановке трансформных окраин [Парада, 2023].

## Материал и методы

Исходными данными для настоящего исследования являются материалы по геологическому строению, магматизму и рудоносности Восточного Донбасса, представленные в производственных отчетах о геологической съемке и поисковых работах на цветные металлы и золото, проведенных производственными геологическими организациями в последние пятьдесят лет, а также база цифровых данных результатов современных геофизических среднемасштабных съемок, охватывающих Восточную часть Донецкого бассейна и прилегающие территории. Эти геологические и геофизические данные подверглись металлогеническому анализу на основе современных геодинамических концепций.

## Результаты и обсуждение

Чернореченское рудопроявление золота входит в состав Кондаковской рудно-магматической системы (РМС) [Парада, Гамбург, 2023]. Основу РМС составляют Кондаковское тектоническое поднятие и малые интрузивные тела андезитового и андезит-дацитового состава юрского возраста. В пределах Кондаковской РМС установлены многочисленные признаки оруденения цветных металлов и золота в форме вторичных и первичных ореолов рассеяния свинца, цинка, меди, молибдена и золота, а также выявлены кроме Чернореченского рудопроявления, Северное, Центральное и Страховское проявления золоторудных минерализаций [Невалённый, 2005].

Чернореченское рудопроявление является наиболее изученным. В его пределах проведены поисковые работы, буровыми скважинами установлены золоторудные зоны с повышенными содержаниями золота, составляющие в отдельных интервалах до 6–8 г/т, подсчитаны прогнозные ресурсы благородного металла.

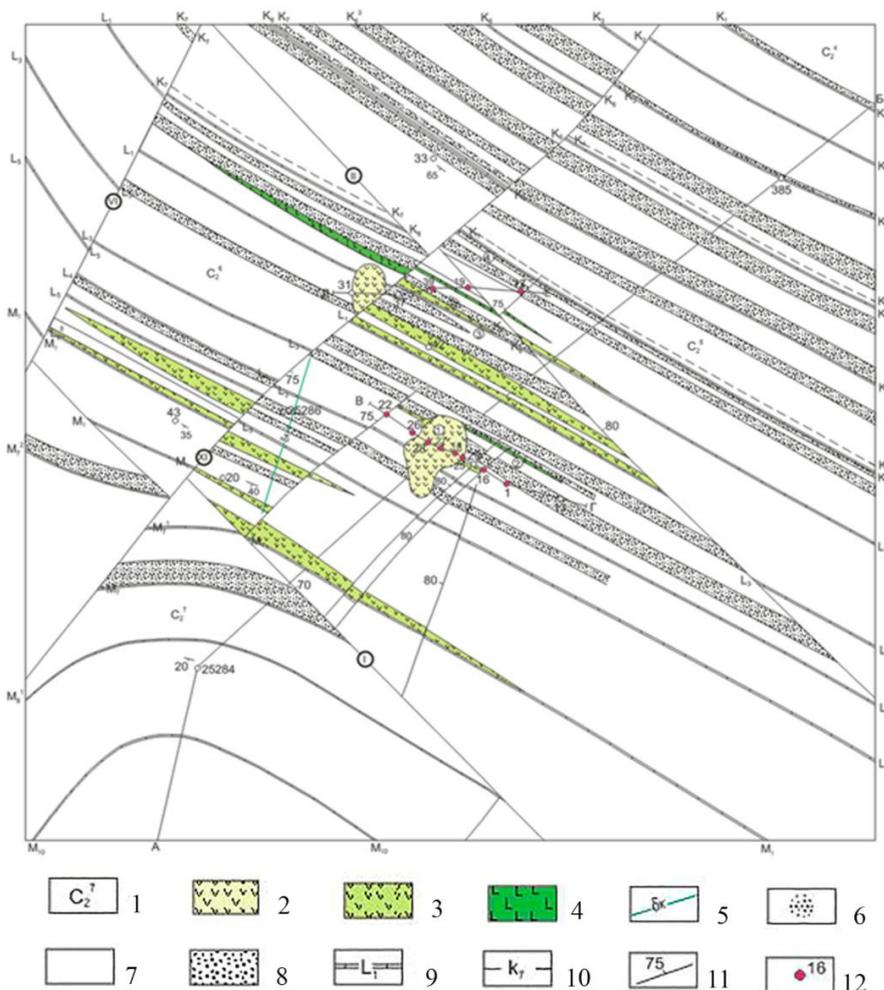
В структурном отношении, площадь Чернореченского рудопроявления приурочена к юго-западному крылу Кондаковской линейной антиклинали и располагается в области, где эта складка осложнена одноименным поперечным поднятием и становится брахиморфной (рис. 1). Кажущийся спокойным структурный план поднятия, в значительной мере осложняется разрывной тектоникой, представленной серией разломов. По своей ориентировке в плане разломы могут быть разделены на две группы – продольные, идущие примерно в направлении простирания вмещающих пород, и поперечные, протягивающиеся в северо-восточных румбах.

К первой группе отнесены Сулино-Константиновский и Северный глубинные разломы. Главной особенностью этих разломов, определяющих размещение и локализацию Кондаковской и других рудно-магматических систем, является правосторонняя кинематика [Троценко, 2019]. Вторая группа разрывов является наиболее многочисленной. Это Кондаковский взбросо-сдвиг и серия сравнительно мелких нарушений, оперяющих Персияновский глубинный разлом со стороны его северного крыла. Эти разломы образуются в зонах свободных изгибов правостороннего сдвига [Woodcock, Fischer, 1986]. На глубине они соединяются между собой и сопрягаются с главным разломом, образуя структуру растяжения в виде системы поперечных относительно глубинного разлома сбросов и сбросо-сдвигов. В соответствии с моделью, изображенной на рис. 2 [Sylvester, 1988], данное сочетание разломов представляет собой присдвиговую транстенсионную структуру растяжения типа веера сбросов, являющуюся структурной основой Кондаковской РМС [Парада, 2023].

Магматические породы на площади Чернореченского рудопроявления пользуются сравнительно широким распространением, залегая в отложениях карбона в форме

штоков, силлов, даек и жил. Представлены они двумя характерными комплексами: несветаевским андезит-трахиандезитовым и миусско-керчикским лампрофировым. Первый представлен субвулканической фацией штоками, дайками и силлами, а второй встречается лишь в форме маломощных даек и жил [Лихачев, 1983].

Геологическую основу рудопроявления составляют два малых штока интрузивных пород (Южный и Северный), которые располагаются в центральной части Кондаковской РМС и, по-видимому, имеют единый очаг.



*Рис. 1. Геологическая карта Чернореченского рудопроявления:*

*1 – отложения каменноугольной системы с индексами свит: глинистые, песчано-глинистые сланцы, песчаники; 2–4 – несветаевский андезит-трахиандезитовый комплекс: 2 – андезито-дациты; 3 – андезиты; 4 – андезито-базальты; 5 – лампрофировый комплекс: спессартиты; 6 – кварцевые и кварц-глауконитовые пески (на разрезе); 7 – глинистые, песчано-глинистые сланцы (на разрезе); 8 – песчаники (на разрезе); 9 – пласты известняков; 10 – угольные пласты; 11 – рудные зоны и их номера; 12 – буровые скважины, вскрывшие рудные зоны с повышенными содержаниями золота, и их номера. Римские цифры в кружках – номера разломов: I – Сулино-Константиновский, II – Северный оперяющий, VI – Кондаковский, VII – Висловский, XI – Короткий /*

*Fig. 1. Geological map of the Chernorechensk ore occurrence:*

*1 – deposits of the carboniferous system with indices of formations: clay, sandy-clay shales, sandstones; 2–4 – Nesvetaevsky andesite-trachyandesite complex: 2 – andesite-dacites; 3 – andesites; 4 – andesite-basalts; 5 – lamprophyry complex: spessartites; 6 – quartz and quartz-glaucanite sands (in the section); 7 – clay, sandy-clay shales (in the section); 8 – sandstones (in the section); 9 – limestone layers; 10 – coal seams; 11 – zones of ore mineralization and their numbers; 12 – drilling wells that have uncovered ore zones with high gold content, and their numbers. The Roman numerals in the circles are the fault numbers: I – Sulino-Konstantinovsky, II – Northern feathering, VI – Kondakovsky, VII – Vislovsk, XI – Korotky*

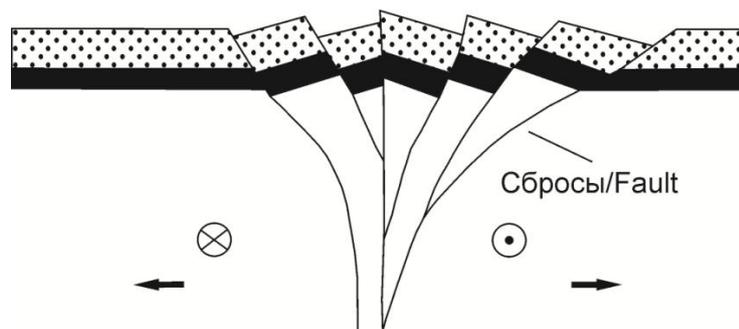


Рис. 2. Модель присдвиговой транстензионной структуры растяжения типа веера сбросов (по [Sylvester, 1988]). Кружок с точкой в центре показывает направление движения крыла на наблюдателя, с крестиком – от наблюдателя /

Fig. 2. A model of a thrust-displacement stretching structure of the discharge fan type (according to [Sylvester, 1988]). A circle with a dot in the center shows the direction of movement of the wing towards the observer, with a cross – from the observer

Этот очаг расположен от поверхности карбона на глубине не более 25 км, судя по отображению их в аномалии магнитного поля и расчетным данным температуры точки Кюри [Парада, 2023], что соответствует данным изучения теплового поля Донбасса в пределах Донецкой и Луганской народных республик [Гордиенко и др., 2015]. Наиболее крупным является Южный шток. Он имеет слегка вытянутую в меридиональном направлении конфигурацию протяженностью до 350 м при максимальной ширине 150–200 метров. Западный и восточный контакты его обладают почти вертикальным падением с едва заметным наклоном на восток; южный же контакт, судя по изолиниям аномального магнитного поля, погружается в южном направлении под более пологими углами, составляющими 60–70°.

Северный шток имеет меньшие размеры (190×130 м) и несколько вытянутую с юга на север форму. По данным буровых скважин, падение контактов его крутое, приближающееся к вертикальному залеганию.

Из других рвущих тел андезито-трахиандезитового комплекса выявлены две дайки, деформирующие не только отложения карбона, но и описанные выше андезито-дациты, вблизи которых они располагаются. Простираение этих даек совпадает с простираением вмещающих пород, падение слабо секущее под острым углом.

Одна из этих даек установлена в районе Южного штока, где прослежена по простираению профилем скважин на расстоянии более 450 м. Мощность ее, достигая 20 м, постепенно уменьшается в восточном направлении, где не превышает 5–6 м. На западном фланге эта дайка прорывает андезито-дациты Южного штока. Вторая дайка фиксируется в районе Северного штока и вскрыта здесь буровой скважиной. Мощность ее не превышает 10 м, протяженность не установлена. Обе дайки сложены андезито-базальтами серого, буровато-серого цвета, плотными и крепкими, с порфиоровыми выделениями плагиоклазов и роговой обманки.

В центральной части рудного поля, в районе штоков, развиты силлы андезитов серого, зеленовато-серого цвета с массивной текстурой, порфиоровой и порфиоровидной структурой. Залегая согласно с вмещающими породами, силлы на поверхности каменноугольных отложений прослеживаются в виде часто выклинивающихся полос различной ширины и протяженности. Мощности силлов достигают по отдельным сечениям 30–40 и даже 60 м. Протяженности их по данным магнитной съемки

колеблются в широких пределах от 200–250 до 1700–2000 и даже более метров. Ширина полосы развития силлов достигает 1400–1500 м.

Миусско-керчикский лампрофировый комплекс интрузивных пород на площади Чернореченского рудопоявления представлен единичными дайками спессартита мощностью около 20 м.

В составе Чернореченского рудопоявления выявлены четыре параллельные рудные зоны северо-западного простирания (рис. 3). Протяженность зон от 550 до 900 м, мощность – от 10 до 145 м. Рудные зоны представлены тектонически нарушенными и метасоматически измененными породами карбона, приуроченными к экзо- и эндоконтактам штоков андезитов-дацитов. Иногда такие зоны пересекают интрузивные штоки.

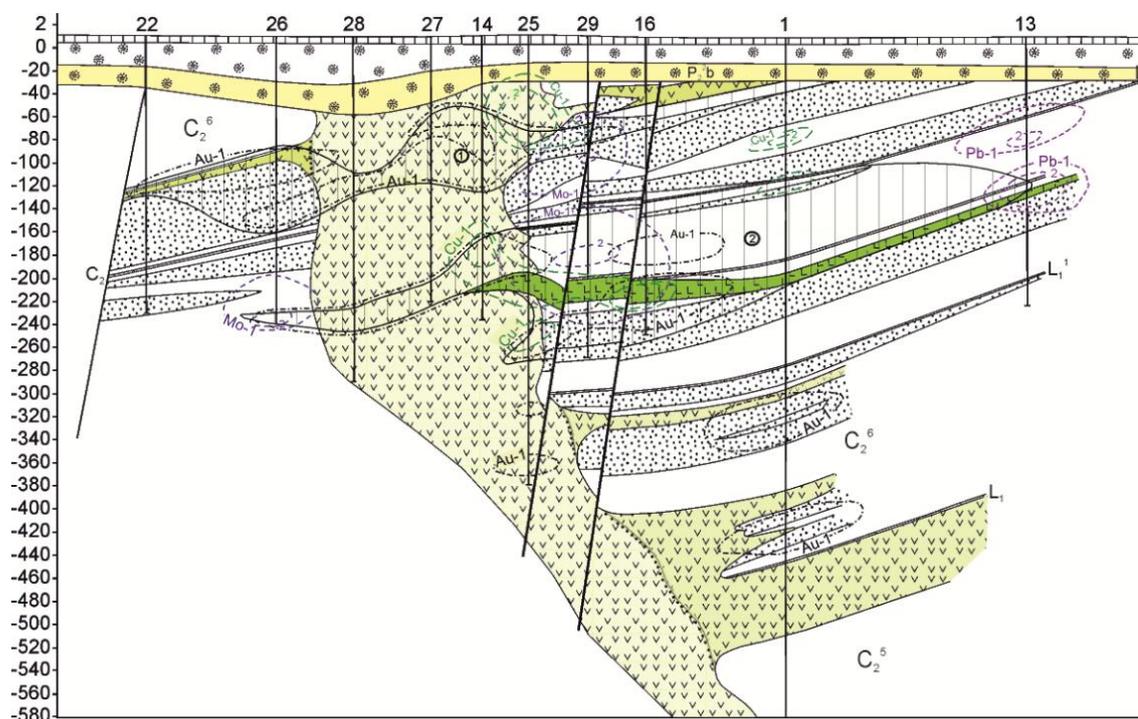


Рис. 3. Положение рудных зон Чернореченского рудопоявления относительно интрузивных пород Южного штока по линии буровых скважин. Условные обозначения приведены на рис. 1 /

Fig. 3. The position of the ore zones of the Chernorechensk ore occurrence relative to the intrusive rocks of the Southern stock along the line of drilling wells. The symbols are shown in Fig. 1.

Золотоносная минерализация представлена прожилками и вкрапленностью преобладающего пирита, а также халькопирита, галенита и сфалерита. Содержания золота в зонах достигают 8 г/т, серебра – 6,6 г/т. Распределение золота крайне неравномерное.

В пределах Чернореченского рудопоявления по результатам документации керн-скважин и изучения прозрачных и полированных шлифов, а также по аналогии с результатами, полученными по другим более изученным золотоносным объектам Донбасса [Лазаренко и др., 1975; Бутурлинов, 1984; Труфанов и др., 1987; Терентенко и др., 1987; Грановская, 1992; и др.] предварительно можно выделить три типа гидротермально-метасоматических преобразований: контактово-метасоматический, метасоматически-гидротермальный и гидротермальный.

Контактово-метасоматический тип, можно отнести к наиболее раннему этапу преобразования пород Чернореченского рудопоявления. Они связаны с внедрением в юрское время ранней фазы малых интрузивов несветаевского андезит-трахиандезитового комплекса. С их внедрением связано образование экзо- и эндоконтактовых скарнов и роговиков, а также высокотемпературной сульфидной минерализации на контактах штоков андезито-дацитов и даек андезито-базальтов. Контактным изменениям подвержены как вмещающие осадочные, так и прорывающие их интрузивные образования, хотя и в гораздо меньшей степени. Мощности экзоконтактовых зон метасоматических изменений достигают первых десятков метров, увеличиваясь или уменьшаясь в зависимости от первичного состава пород. Мощности эндоконтактовых зон измеряются первыми сантиметрами, реже десятками сантиметров.

Характер изменений и состав новообразованных метасоматитов зависит от состава исходных пород. При этом в сланцевых пачках зона изменений шире, чем в песчаниках. По сланцам развиваются кварц-амфибол-слюдистые метасоматиты, по песчаникам – биотитовые роговики, по известнякам – гранатовые и пироксен-гранатовые скарны. Рудные минералы в виде тонкой рассеянной неравномерной вкрапленности являются постоянным компонентом кварц-амфибол-слюдистых метасоматитов и представлены пиритом или сростками пирита и пирротина. В качестве акцессорных минералов здесь обнаруживаются циркон, апатит, сфен, иногда корунд и шеелит. В скарнах присутствуют пирит, пирротин, халькопирит.

Контактово-метасоматический тип изменений представлен относительно небогатым, но специфическим набором минералов. Нерудные минералы представлены кварцем, кальцитом, полевым шпатом, гранатом, пироксеном, хлоритом. Рудные минералы можно объединить в две наиболее устойчивые ассоциации: пирротиновую и молибденитовую, очень близкие по времени образования, часто наложенные одна на другую.

Пирротиновая ассоциация представлена вкрапленностью, реже тонкими извилистыми прожилками халькопирит-пирит-пирротинового состава. Ведущим минералом ассоциации является пирротин, который выделяется в основном в виде вкрапленников, кристаллически-зернистых агрегатов, сплошных колломорфных масс, реже тонких прожилков. Как правило, зерна пирротина замещаются пиритом и более поздним марказитом, приуроченным к краевой части зерен или к сети тонких трещин в них.

В ороговикованных песчаниках и магматических породах пирротин образует густую вкрапленность, обуславливая сидеролитовую структуру. В кварц-амфибол-слюдистых метасоматитах и гранатовых скарнах распределение рудных минералов представляет гнездовой характер в виде кристаллических зернистых агрегатов.

Халькопирит развивается в краевых частях пирротиновых выделений и в основной части породы, где он образует пойкилитовые структуры с нерудными компонентами или участвует в строении сидеронитовой структуры. В последнем случае зерна халькопирита неправильно угловатые, с извилистыми ограничениями, размер выделений 0,02–0,15 мм.

Молибденитовая ассоциация носит прожилковый характер и представлена молибденитом, пиритом, халькопиритом. Ведущим минералом является молибденит.

Основным жильным минералом является кварц, среди второстепенных можно назвать полевой шпат, карбонаты, чаще анкерит, подчиненное значение имеют пироксены, гранаты, хлориты, шеелит.

Прожилки, имеющие незначительную мощность (до 1 см) и различную ориентировку, характеризуются зональным строением. Центральные части прожилков сложены кристаллическим кварцем, который из-за тонкочешуйчатых выделений молибденита приобретает голубоватую окраску. Минеральный состав в зальбандах прожилков зависит от состава вмещающих пород. Так, в андезито-дацитах и ороговикованных песчаниках в роли жильного материала в зальбандах кварцевых прожилков выделяется полевой шпат (ортоклаз-пертит), в скарнах – это карбонаты с примесью амфиболов, пироксенов, гранатов, шеелита. К зальбандам также приурочены рудные минералы: пирит, халькопирит. Наблюдалась и обратная зональность прожилков. Например, в приконтактных частях Южного штока в андезито-дацитах встречены несколько прожилков кварц-полевошпатового состава, где ортоклаз выполняет центральную часть.

Молибденит отмечается в кварце, где он выделяется в форме удлиненных чешуек размером 0,03–0,06 мм, реже достигает 0,2 мм; в скоплениях образует розетковидные агрегаты. Пирит и халькопирит приурочены к зальбандам прожилков и образуют кристаллически-зернистые выделения в карбонатах, полевошпате, причем халькопирит выделялся позже пирита, окаймляя зерна пирита.

Термометрические исследования включений в кварце из кварц-полевошпатовых жил, локализованных в контактово-измененных песчаниках и андезитах, проведенные ранее по Чернореченскому и другим рудопроявлениям Донбасса [Труфанов и др., 1987; Грановская, 1992; и др.], показали, что в кварце помимо обычных двухфазных (газово-жидких) и трехфазных (жидкость-газ-твердая фаза) включений, присутствуют расплавные стекловатые и раскристаллизованные включения, свидетельствующие о магматическом происхождении. При их нагревании наблюдается плавление и, далее, появление газовых пузырей, которые гомогенизируются в стекло при 1100 °С. Температура образования кварцев из этих жил установлена в 650–700 °С.

Метасоматически-гидротермальный этап является вторым этапом преобразования вещественного состава пород Чернореченского рудопроявления и выразился в формировании линейных обособленных зон метасоматитов, развитых как по осадочным, так и по изверженным породам.

Возраст этих образований, судя по данным, полученным на однотипном Керчикском рудопроявлении, укладывается в интервал 165–186 миллионов лет [Зеленщиков и др., 2001] и, следовательно, является юрским, что совпадает со временем становления малых интрузивов, в ореоле влияния которых и располагаются упомянутые выше рудные зоны. Как и в отношении ранее описанного контактово-метасоматического этапа здесь тоже выделяются две стадии – метасоматическая и гидротермальная.

Продукты метасоматической стадии данного этапа имеют широкое распространение в пределах Чернореченского проявления и приурочены к тектоническим зонам повышенной проницаемости. Всего выявлены 4 таких зоны, параметры которых приведены выше. Глинистые и песчано-глинистые сланцы в зонах развития метасоматоза образуют по мере возрастания степени преобразований непрерывный ряд пород: сланцы слабо измененные – кварц-серицитовые метасоматиты – кварц-хлорит-серицитовые метасоматиты.

Слабо измененные сланцы макроскопически почти не отличаются от неизмененных разностей, становясь лишь более плотными, утрачивая четкость признаков

первичной слоистости и сланцеватости. Под микроскопом их отличает частичное преобразование глинистых минералов гидрослюдистого состава в серицит. При наиболее интенсивном метасоматозе сланцы превращаются в кварц-серицитовые и кварц-хлорит-серицитовые образования.

Метасоматически измененные песчаники представляют собой очень крепкие, массивные кварцитовидные породы светло-серого, серого цвета.

Пласты известняков в зонах метасоматоза превращены в пироксен-амфиболовые скарны, представляющие собой плотные, крепкие породы от светло- до темно-серого цвета с зеленоватым оливковым оттенком.

Метасоматическим изменениям в зонах повышенной трещиноватости, помимо осадочных пород, подверглись и магматические образования. Характерной чертой, отличающей Чернореченское рудопроявление от более изученного Керчикского, является слабое развитие процессов метасоматоза в изверженных породах. Метасоматоз здесь носит локальный характер, приурочен к трещинам, мощность около трещинных зон изменения составляет первые десятки сантиметров, редко достигает первых метров.

Гидротермальная стадия является завершающей для гидротермально-метасоматического этапа и привела к образованию низкотемпературных существенно пиритовых и пирит-кварц-карбонатных прожилков, секущих вмещающие кварц-серицитовые и кварц-хлорит-серицитовые метасоматиты и измененные песчаники. Рудные минералы представлены пиритом, халькопиритом, марказитом. Они выделяются в виде вкрапленности в метасоматитах и концентрируются в прожилках, где жильный материал представлен карбонатами (кальцитом и анкеритом), хлоритом, серицитом, реже присутствует кварц.

В процессе рудоотложения образовалось несколько типичных ассоциаций минералов, часто накладывающихся друг на друга или секущих друг друга. Подобное явление объясняется тем, что отложение рудных и жильных минералов происходило на фоне последовательных тектонических подвижек, о чем свидетельствуют структуры пересечения, катаклиз и дробление компонентов ранних ассоциаций с последующей цементацией обломков минералами последующих ассоциаций. Из наиболее достоверных и четких парагенетических ассоциаций выделяются три: арсенопиритовая, полиметаллическая и поздняя пиритовая.

Арсенопиритовая ассоциация приурочена к субвертикально ориентированным прожилкам, пересекающим метасоматически измененные песчаники. Из рудных минералов в данном случае характерны арсенопирит и пирит. Арсенопирит образует удлиненно-призматические кристаллы. Пирит образует взаимные прорастания с арсенопиритом, а также слагает отдельные прожилки сложной морфологии. Из нерудных минералов к данной ассоциации можно отнести кварц и кальцит.

Полиметаллическая ассоциация представлена сфалеритом, галенитом, пиритом и халькопиритом в составе прожилков кварцевого и кварц-кальцитового состава.

Поздняя пиритовая ассоциация представлена пиритом и марказитом в составе субвертикальных существенно сульфидных прожилков, а также в ассоциации с такими низкотемпературными минералами, как кальцит, сидерит, цеолиты, хлорит, тальк, дикцит. Эти прожилки, являясь самыми поздними, секут все другие гидротермально-метасоматические образования.

Температуры кристаллизации кварца из кварц-карбонатных прожилков полиметаллической ассоциации, установленные методом гомогенизации включений, со-

ставляют 290–306 °С и 149–157 °С [Труфанов и др., 1987]. Это свидетельствует в пользу разделения полиметаллической ассоциации на раннюю и позднюю. Температуры минералообразования двух других ассоциаций гидротермального этапа, по аналогии с гидротермалитами Керчического рудопроявления [Грановская, 1992] составляют: арсенопиритовая – 420–500 °С, поздняя пиритовая – 60–120 °С.

### Заключение

1. Чернореченское рудопроявление золота входит в состав Кондаковской рудно-магматической системы, основу которой составляет присдвиговая транстензионная структура растяжения типа веера сбросов, именуемая в геологических отчетах Кондаковским поперечным поднятием, и малые интрузивные тела андезитового и андезит-дацитового состава юрского возраста.

2. В составе рудопроявления выявлены четыре рудные зоны северо-западного простирания протяженностью от 550 до 900 м, мощностью от 10 до 145 м. Рудные зоны представлены тектонически нарушенными и метасоматически измененными породами, приуроченными к экзо- и эндоконтактам штоков андезито-дацитов. Иногда такие зоны пересекают интрузивные штоки.

3. Золотоносная минерализация в рудных зонах представлена прожилками и вкрапленностью пирита (преобладает), а также подчиненными количествами халькопирита, галенита, сфалерита и единичными включениями некоторых других рудных минералов. Содержания золота в зонах достигают 8 г/т, серебра – 6,6 г/т. Распределение золота крайне неравномерное. По указанным признакам рудообразование можно отнести к сульфидно-прожилково-вкрапленному минерально-морфологическому типу.

### Литература

1. Артеменко В.М., Юдин В.В. Особенности геодинамики и металлогении Донецкой складчатой области. // Литосфера. – 2000. – № 13. – С. 80–86.
2. Бутурлинов Н.В. Эволюция магматизма, минеральных ассоциаций и эндогенного рудообразования в Донецком бассейне. // Минералогия рудных месторождений Украины. – Киев: Наукова думка, 1984. – С. 36–44.
3. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. Тепловое поле Донбасса. // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37. № 6. – С. 3–23.
4. Гребенников А.В., Ханчук А.И. Геодинамика и магматизм трансформных окраин тихоокеанского типа: основные теоретические аспекты и дискриминантные диаграммы. // Тихоокеанская геология. – 2021. – Т. 40. № 1. – С. 3–24. DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24.
5. Грановская Н.В. Минералогия и термобарогеохимия золотого рудообразования в Юго-Восточном Донбассе. // Записки всероссийского минералогического общества. – 1992. – Т. 121. № 4. – С. 29–42.
6. Зеленщиков Г.В., Курбанов Н.К., Кучеровский П.Г., Радаева Т.П. Перспективы золотоносности Припятско-Днепровско-Донецкого авлакогена. // Руды и металлы. – 2001. – № 2. – С. 26–35.
7. Лазаренко Е.К., Панов Б.С., Павлишин В.И. Минералогия Донецкого бассейна. Киев: Наукова Думка, 1975. – Ч. II. 500 с.
8. Лихачев В.А. Петрологические особенности магматических пород Восточного Донбасса в связи с вопросами его рудоносности. // Сб. «Геология и полезные ископаемые Нижнего Дона». – 1983. – С. 13–17.

9. Невалённый Ю.В. Ресурсы металлических полезных ископаемых. // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. – С. 71–84.
10. Парада С.Г. Особенности локализации интрузивных пород и рудопроявлений Восточного Донбасса. // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». М.: ИИЕТ РАН, 2023. – С. 141–148. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.18.27.100.
11. Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 95–105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008.
12. Терентенко Н.А., Лихачев В.А., Зеленщиков Г.В. Литолого-структурные условия локализации цветных и благородных металлов на Керчикском рудопроявлении. // Геологическое строение и полезные ископаемые Ростовской области. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1987. – С. 90–95.
13. Трощенко В.В. Анализ морфологии сместителей и кинематики относительных перемещений крыльев тектонических разрывов угленосных толщ. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 8. – С. 277–283.
14. Трощенко В.В. О сдвиговой деформации Донецкого складчатого сооружения. // Труды РАНИМИ. – 2019. – № 8–2 (23). – С. 128–131.
15. Труфанов В.Н., Куршев С.А., Майский Ю.Г., Ушак А.Т. Научные основы генетической информативности природных систем «минерал – флюид». // Известия СКНЦ ВШ. Естественные науки. – 1987. – № 3. – С. 107–115.
16. Юдин В.В. Геодинамика Южного Донбасса. Киев: Укр.ГГРИ, 2003. – 92 с.
17. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. // Geotectonics. – 2018. – Vol. 52. No. 4. – pp. 485–498.
18. Sainot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia). // Tectonophysics. – 2003. – Vol. 373. – pp. 181–207.
19. Sylvester A.G. Strike-slip faults. // Bulletin of Geological Society of America. – 1988. – Vol. 100. No. 11. – pp. 1666–1703.
20. Woodcock N.H., Fischer M. Strike-Slip Duplexes. // Journal of Structural Geology. – 1986. – No. 8. – pp. 725–735. DOI: 10.1016/0191-8141(86)90021-0.

## Reference

1. Artemenko V.M., Yudin V.V. Peculiar features of geodynamics and metallogeny of the Donetsk folded area. Lithosphere. 2000. No. 13. pp. 80–86. (In Russ.)
2. Buturlinov N.V. Evolution of magmatism, mineral associations and endogenous ore formation in the Donetsk basin. Mineralogy of ore deposits of Ukraine. Kiev. Naukova Dumka. 1984. pp. 36–44. (In Russ.)
3. Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnyaya O.V. Thermal field of Donbass. Geophysical Journal. 2015. Vol. 37. No. 6. pp. 3–23. (In Russ.)
4. Grebennikov A.V., Khanchuk A.I. Geodynamics and magmatism of Pacific-type transform margins: the main theoretical aspects and discriminant diagrams. Pacific geology. 2021. Vol. 40. No. 1. pp. 3–24. 10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24. (In Russ.)
5. Granovskaya N.V. Mineralogy and thermobarogeochemistry of gold mineralization in the South-Eastern Donbass. Notes of the All-Russian Mineralogical Society. 1992. Vol. 121. No. 4. pp. 29–42. (In Russ.)
6. Zelenshchikov G.V., Kurbanov N.K., Kucherevsky P.G., Radaeva T.P. Prospects for the gold potential of the Pripyat-Dnieper-Donets aulacogen. Ores and metals. 2001. No. 2. pp. 26–35. (In Russ.)

7. Lazarenko E.K., Panov B.S., Pavlishin V.I. Mineralogy of the Donetsk Basin. Kiev. Naukova Dumka. 1975. P. II. 500 p. (In Russ.)
8. Likhachev V.A. Petrological features of igneous rocks of the Eastern Donbass in connection with the issues of its ore content. In: Proceedings of the Geology and Mineral Resources of the Lower Don. 1983. pp. 13–17. (In Russ.)
9. Nevalenny Yu.V. Metallic Mineral Resources. In: Problems and prospects for the integrated development of mineral resources of Eastern Donbass. Rostov-on-Don. SSC RAS. 2005. pp. 71–84. (In Russ.)
10. Parada S.G. Features of localization of intrusive rocks and ore occurrences of Eastern Donbass. In: Proceedings of the XIII All-Russian scientific and technical conference with international participation "Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus". Moscow. IIET RAS. 2023. pp. 141–148. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.18.27.100. (In Russ.)
11. Parada S.G., Hamburg K.Yu. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 95–105. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.41.008. (In Russ.)
12. Terentenko N.A., Likhachev V.A., Zelenshchikov G.V. Lithological and structural conditions of localization of base and noble metals in the Kerchik ore occurrence. *Geological Structure and Mineral Resources of the Rostov Region*. Rostov-on-Don. RGU. 1987. pp. 90–95. (In Russ.)
13. Troshchenko V.V. Analysis of displacement morphology and kinematics of relative displacements of wings of tectonic fractures of coal-bearing strata. *Mining information-analytical bulletin*. 2009. No. 8. pp. 277–283. (In Russ.)
14. Troshchenko V.V. On the shear deformation of the Donetsk folded structure. In: Proceedings of the RANIMI. 2019. No. 8-2 (23). pp. 128–131. (In Russ.)
15. Trufanov V.N., Kurshev S.A., Maisky Y.G., Ushak A.T. Scientific bases of genetic informativeness of natural systems "mineral - fluid". *Izvestiya SKNTS VS. Natural Sciences*. 1987. No. 3. pp. 107–115. (In Russ.)
16. Yudin V.V. *Geodynamics of Southern Donbass*. Kiev. Ukr.GGRI. 2003. 92 p. (In Russ.)
17. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. *Geotectonics*. 2018. Vol. 52. No. 4. pp. 485–498.
18. Saintot A., Stephenson R., Stovba S., Maistrenko Yu. Structures associated with inversion in the Donbass fold belt (Ukraine and Russia). *Tectonophysics*. 2003. Vol. 373. pp. 181–207.
19. Sylvester A.G. Strike-slip faults. *Bulletin of Geological Society of America*. 1988. Vol. 100. No. 11. pp. 1666–1703.
20. Woodcock N.H., Fischer M. Strike-Slip Duplexes. *Journal of Structural Geology*. 1986. No. 8. pp. 725–735. DOI: 10.1016/0191-8141(86)90021-0.

УДК 622.24:622.276.7

DOI: 10.46698/p4164-3763-3890-x

Оригинальная статья

## Моделирование оптимальных параметров, обеспечивающих эффективное глушение скважин в условиях аномально низких пластовых давлений

**К.С. Ахмедов<sup>1</sup>**, **Я.М. Курбанов<sup>2</sup>**, **А.Е. Верисокин<sup>1</sup>**, **К.М. Саидова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355009, г. Ставрополь, пр. Кулакова 16/1, корп. 16, e-mail: kurban2000@mail.ru;

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38;

<sup>3</sup> Филиал «Газпром ВНИИГАЗ Ставрополь», Россия, 355035, г. Ставрополь, ул. Ленина, 419

Статья поступила: 06.06.2024, доработана: 08.09.2024, принята к публикации: 09.09.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Повышение эффективности капитального ремонта скважин в условиях снижения добычи углеводородов представляет собой актуальную задачу. Объектом исследования является процесс глушения газовых скважин в условиях аномально низких пластовых давлений. Для контроля технологических параметров при проведении ремонтных работ в скважине целесообразно разработать математические модели, количественно описывающие процесс глушения скважины, позволяющие проводить расчет и подбор оптимальных параметров жидкости глушения. Это позволит снизить фильтрацию в пласт технологических жидкостей и загрязнение призабойной зоны пласта, что способствует восстановлению продуктивности на доремонтном уровне и осуществлению быстрого ввода скважины в эксплуатацию. Разработка программы, совмещающей гидродинамическую и фильтрационную модели процессов блокировки призабойной зоны пласта, позволит подбирать оптимальные технико-технологические параметры и обеспечивать эффективное выполнение капитального ремонта скважин в условиях аномально низких пластовых давлений. **Цель исследования.** Повышение эффективности эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений и капитального ремонта скважин в условиях значительного падения пластовых давлений за счет разработки методов управления гидродинамическими процессами в призабойной зоне пласта. **Методы исследования.** Для достижения целей исследования нами проанализированы и систематизированы данные научно-технической и патентной литературы, проведены лабораторные и вычислительные эксперименты, которые позволили подробно изучить модели гидродинамических процессов фильтрации жидкостей в пласт. Разработанные математические модели, описывающие процесс глушения скважины, реализованы как комплекс программ для ЭВМ методом компьютерного моделирования. **Результаты работы.** Разработана и описана математическая модель процесса глушения для газовых скважин с пакером и без пакера. Приведены аналитические зависимости для расчета коэффициента аэрации, учитывающие диаметр штуцера для образования пены, пластовое давление и глубину скважины. На основе математической модели разработан и протестирован комплекс программ по выбору оптимальных технико-технологических параметров, обеспечивающих эффективное глушение скважины в условиях аномально низких пластовых давлений. Разработанная математическая модель является инструментом для расчета и подбора оптимальных технико-технологических параметров, обеспечивающих эффективное проведение ремонтных работ, исключая работу на избыточных репрессиях и поглощение технологических жидкостей.

**Ключевые слова:** капитальный ремонт, аномально низкое пластовое давление, глушение скважины, жидкости глушения, оптимальные технико-технологические параметры, моделирование, программа.

**Для цитирования:** Ахмедов К.С., Курбанов Я.М., Верисокин А.Е., Саидова К.М. Моделирование оптимальных параметров, обеспечивающих эффективное глушение скважин в условиях аномально низких пластовых давлений. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 125-135. DOI: 10.46698/p4164-3763-3890-x

---

---

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

---

---

DOI: 10.46698/p4164-3763-3890-x

Original paper

## Modeling of optimal parameters that ensure the effective performance of well killing in conditions of abnormally low reservoir pressure

K.S. Ahmedov<sup>1</sup>, Ya.M. Kurbanov<sup>2</sup>, A.E. Verisokin<sup>1</sup>, K.M. Saidova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> North-Caucasus Federal University, 16/1 Kulakova Ave., Stavropol 355009, Russian Federation, e-mail: kurban2000@mail.ru;

<sup>2</sup> Tyumen Industrial University, 38 Volodarsky Str., Tyumen 625000, Russian Federation;

<sup>3</sup> Branch "Gazprom VNIIGAZ Stavropol", 419 Lenina Str., Stavropol 355035, Russian Federation

Received: 06.06.2024, revised: 08.09.2024, accepted: 09.09.2024

**Abstract: Relevance.** Improving the efficiency of well-workover operations under conditions of hydrocarbon production is an urgent task. The object of the study is the process of killing gas wells in conditions of abnormally low formation pressure. In order to control technological parameters during well workover operations it is advisable to develop mathematical models that quantitatively describe the process of killing the well, allowing the calculation and selection of optimal parameters of killing fluid. This will reduce filtration of process fluids into the formation and contamination of the bottom-hole formation zone, which contributes to the restoration of productivity at the pre-repair level and rapid well commissioning. Development of a program combining hydrodynamic and filtration models of bottomhole formation zone blocking processes will allow selecting optimal technical and technological parameters and ensuring efficient workover operations under abnormally low formation pressure conditions. **The aim** is to improve the efficiency of gas and gas condensate field operations and the effectiveness of well maintenance in conditions of a significant decrease in reservoir pressure due to the development of methods for managing hydrodynamic processes in bottom-hole formation zone. **Methods.** To achieve the objectives of the study were analyzed and systematized data of scientific, technical and patent literature, conducted laboratory and computational experiments that allowed to study in detail the models of hydrodynamic processes of filtration of liquids into the formation. The developed mathematical models describing the process of well killing were implemented as a set of programs for computers by computer simulation method. **Results.** The mathematical model of killing process for gas wells with and without packer is developed and described. Analytical dependencies for calculation of aeration coefficient, taking into account the diameter of the nozzle for foam formation, formation pressure and well depth are given. A set of programs for selecting optimal technical and technological parameters ensuring effective killing of a well under abnormally low formation pressure conditions was developed on the basis of a mathematical model and tested. The developed mathematical model is a tool for calculation and selection of optimal technical and technological parameters, providing effective repair works, excluding work on excessive repressions and absorption of process fluids.

**Keywords:** workover, abnormally low formation pressure, well killing, killing fluids, optimal technical and technological parameters, modeling, program.

**For citation:** Ahmedov K.S., Kurbanov Ya.M., Verisokin A.E., Saidova K.M. Modeling of optimal parameters that ensure the effective performance of well killing in conditions of abnormally low reservoir pressure. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 125-135. DOI: 10.46698/p4164-3763-3890-x

## Введение

Для завершающей стадии разработки месторождений характерно снижение продуктивности скважин, связанное с падением пластового давления, выработкой запасов углеводородов и повышенной обводненностью продукции.

Традиционно используемые технологические решения капитального ремонта скважин (КРС) в осложненных горно-геологических условиях эксплуатации месторождений в большинстве своем не обеспечивают необходимой эффективности, и, как следствие, требуется поиск новых рецептур жидкостей глушения (ЖГ) и технологий проведения ремонтно-восстановительных работ [Ахметов, 2000; Uliasz, 2020].

Существенным резервом повышения технико-экономических показателей при проведении КРС в условиях аномально низких пластовых давлений (АНПД) является создание совмещенных гидродинамической и фильтрационной моделей [Саидова и др., 2022, Zhang et al., 2022] блокировки призабойной зоны пласта (ПЗП), устранение риска кольматации коллектора, возможных негативных проявлений скважин и неконтролируемого поглощения технологических жидкостей посредством реализации подбора вариантов технологических параметров для осуществления глушения скважин [Mardashov et al., 2021].

Прежде чем начать осуществление ремонтных работ в условиях АНПД необходимо провести наиболее важный этап – глушение газовых и газоконденсатных скважин. Целью глушения является прекращение поступления пластового флюида в скважину путем создания противодействия на пласт жидкостью, обладающей необходимой плотностью, реологическими и блокирующими свойствами [Басарыгин и др., 2002; Zhang et al., 2021; Liu et al., 2023]. В связи с этим определение режима глушения и расчет требуемых параметров жидкости глушения актуальны как для проведения ремонтных работ, так и для длительного ожидания ввода скважины в эксплуатацию [Гасумов и др., 2022].

## Материалы и методы исследований

Исходными данными для исследования основных причин снижения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов и продуктивности скважин после проведения КРС являются параметры поглощения технических жидкостей в условиях низких пластовых давлений и высокой проницаемости пород [Басарыгин и др., 1998; Islamov et al., 2019; Raabe, Jortner, 2021]. В соответствии с нормативными документами при глушении скважины с целью снижения проникновения в пласт жидкости глушения и сохранения продуктивности скважины на доремонтном уровне используется достаточно большой накопленный объем данных по блокированию ПЗП специальными составами [Поп и др., 1990; Баранов и др., 1998; Каракетов, 2020; Mardashov et al., 2022].

Исследования, проведенные на газовых и газоконденсатных месторождениях Западной Сибири и Северного Кавказа в различных геологических условиях, показали, что использование для глушения скважин пенных систем с наполнителями

является оправданным. В результате проведенных опытно-промышленных испытаний (ОПИ) установлено, что временное блокирование пласта пенными системами способствует сохранению его коллекторских свойств и продуктивности, а также сокращает сроки освоения скважины.

Глушению скважины предшествует подготовительный этап – сбор геолого-технических параметров скважины и их анализ. На основе результатов анализа производится обоснование параметров режима закачки, определение структурно-механических свойств жидкости и расчет требуемых объемов химических реагентов с учетом текущих ФЕС пласта. В рамках исследования ингибирующая способность жидкостей глушения оценивалась на тестере линейного набухания LSM 2000 на образцах пород продуктивного пласта.

Анализ публикаций по рассматриваемой теме, представленных в списке литературы, оказал влияние на проведение исследований и результаты работы. Для достижения поставленных целей использованы методы анализа и систематизации геолого-технических данных, корреляционно-регрессионного анализа, статистического анализа, математического и компьютерного моделирования.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результатом исследования является разработанный математический аппарат, который позволяет осуществлять в ПЗП дискретное управление гидродинамическими процессами при проведении КРС в условиях обводнения. Полученные решения позволяют подобрать способ временного блокирования продуктивного пласта и оценить ожидаемые параметры технологического режима закачки блокирующего раствора.

Ниже приведена последовательность проводимых расчетов.

На первом этапе производится расчет физических объемов скважины, зависящих от ее конструкции. При наличии в скважине установленного пакера вычисляется объем подпакерной зоны  $V_{sz}$ , м<sup>3</sup> по формуле:

$$V_{sz} = \frac{\pi \cdot d^{\wedge 2}}{4} (H - H_{pak}) - V_m, \quad (1)$$

где  $d^{\wedge}$  – внутренний диаметр эксплуатационной колонны (ЭК), м;

$H$  – уровень забоя, м;

$H_{pak}$  – уровень установки пакера, м;

$V_m$  – объем металла насосно-компрессорной трубы (НКТ) в подпакерной/продуктивной зоне, м<sup>3</sup>:

$$V_m = \frac{\pi}{4} (D_{NKT}^2 - d_{NKT}^2) (H_{NKT} - H_1), \quad (2)$$

где  $D_{NKT}$  – диаметр НКТ, м;

$d_{NKT}$  – внутренний диаметр НКТ, м;

$H_{NKT}$  – глубина установки НКТ, м;

$H_1$  – уровень установки пакера/кровли продуктивного пласта, м.

При отсутствии пакера вычисляется объем ствола скважины в зоне продуктивного пласта  $V_{pz}$ , м<sup>3</sup> по формуле (3) (СТО Газпром 2–3.3–1085–2016).

$$V_{pz} = \frac{\pi \cdot d^{\wedge 2}}{4} (H - H_t) - V_m, \quad (3)$$

где  $H_t$  – кровля продуктивного пласта, м.

В формулах (1), (3) учитываемый уровень забоя зависит от разницы расположения текущего и искусственного забоев: при разнице, превышающей 10 м – уровень текущего забоя, при разнице менее 10 м – искусственного.

Учитываемый в объеме скважины объем металла НКТ зависит от конструкции скважины: в скважине с пакером рассчитывается объем металла НКТ в подпакерной зоне, в скважине без пакера вычисляется объем металла НКТ в продуктивной зоне пласта. Соответственно, в формуле (2) переменный параметр  $H_1$  в первом случае равен уровню установки пакера, во втором – уровню кровли продуктивного пласта.

На следующем этапе рассчитывается объем демпфирующей жидкости  $V_d$ ,  $m^3$ , который также зависит от конструкции скважины. Объем демпфирующей жидкости для скважины с пакером вычисляется формуле:

$$V_d = V_{cav} + V_{sz}, \quad (4)$$

где  $V_{cav}$  – сумма объема каверн,  $m^3$ :

$$V_{cav} = \frac{\pi \cdot (H_b - H_t) \cdot D^{\wedge 2}}{4} (K_{cav}^4 - 0,7 \cdot K_{cav}^2 - 0,3), \quad (5)$$

где  $H_b$  – подошва продуктивного пласта, м;

$K_{cav}$  – средневзвешенный коэффициент кавернозности;

$D^{\wedge}$  – наружный диаметр ЭК, м.

Для скважины без пакера объем демпфирующей жидкости рассчитывается по формуле

$$V_d = V_{cav} + V_{pz}. \quad (6)$$

При данном способе глушения используется эжектор, что подразумевает определение диаметра штуцера для регулирования объема эжектирующего газа и коэффициента аэрации пены.

Снижение пластового давления до 0,1–0,2 от гидростатического при проведении ремонтных работ на месторождениях, находящихся на завершающей стадии разработки, является основанием для глушения скважины с использованием трехфазных пен [Тагиров и др., 2001; Тагиров и др., 2005; Топольников, 2020]. Определение коэффициента аэрации, который получен из уравнения зависимости пластового давления и глубины скважины, а также диаметра штуцера, устанавливаемого на шлейфе для образования пены с заданным коэффициентом аэрации, является важной задачей. Указанная зависимость в графическом виде представлена на рисунке 1.

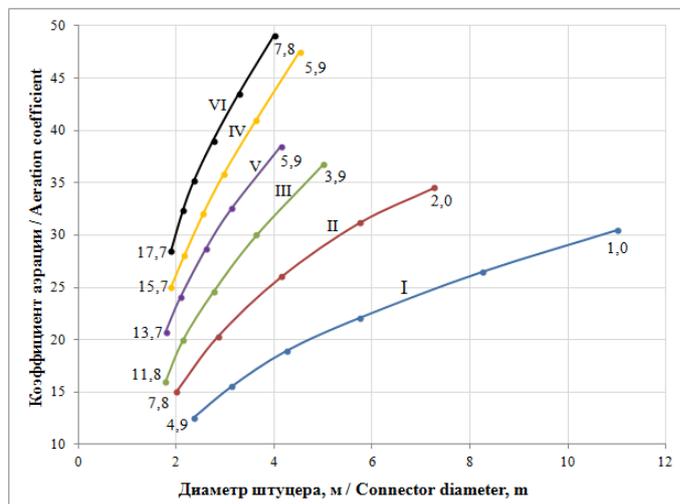


Рис. 1. График зависимости коэффициента аэрации от диаметра штуцера при переменном пластовом давлении (МПа), заданном через равные интервалы, для глубин: I – 1000 м; II – 1500 м; III – 2000 м; IV – 2500 м; V – 3000 м; VI – 3500 м / Fig. 1. Graph of aeration coefficient dependence on the nozzle diameter at variable formation pressure (MPa), set at equal intervals, for the depths: I – 1000 m; II – 1500 m; III – 2000 m; IV – 2500 m; V – 3000 m; VI – 3500 m

Для каждой глубины скважины с интервалом 500 м построена кривая, отражающая изменение коэффициента аэрации с учетом пластового давления.

Для расчета коэффициента аэрации  $\alpha_0$  выведены аналитические зависимости, представленные в таблице 1.

Таблица 1/Table 1

**Уравнения зависимостей коэффициента аэрации от диаметра штуцера /  
Equations of dependence of aeration coefficient on connection diameter**

Глубина, м / Depth, m	Уравнение / Equation	Коэффициент R <sup>2</sup> / Coefficient R <sup>2</sup>
1000	$\alpha_0 = 0,0201x^3 - 0,5321x^2 + 6,1221x + 0,8632$	0,9997
1500	$\alpha_0 = 0,0499x^3 - 1,1381x^2 + 10,6917x - 2,1882$	0,9999
2000	$\alpha_0 = 0,3821x^3 - 4,7233x^2 + 24,2579x - 14,1559$	0,9996
2500	$\alpha_0 = 0,4059x^3 - 4,8615x^2 + 25,0659x - 10,7890$	1,0000
3000	$\alpha_0 = 0,3217x^3 - 3,9446x^2 + 23,3336x - 7,0875$	1,0000
3500	$\alpha_0 = 1,3524x^3 - 13,7847x^2 + 54,1903x - 33,7475$	1,0000

Определение требуемого расхода демпфирующей жидкости для приготовления блокирующего состава  $Q_{df}$ , дм<sup>3</sup>/с производится на основе вычисленного коэффициента аэрации и производительности наземного оборудования (компрессора) по формуле:

$$Q_{df} = \frac{Q_p}{\alpha_0}, \quad (7)$$

где  $Q_p$  – производительность компрессора, дм<sup>3</sup>/с.

Также вычисляется гидравлическое сопротивление пены в пласте  $P_{hri}$ , МПа по формуле:

$$P_{hri} = \frac{r_{ki} \cdot \tau_{0d}}{\sqrt{3 \cdot k_i \cdot \beta_{0i}}} \cdot \ln \left( \frac{r_{ki}}{r_{si}} \right), \quad (8)$$

где  $r_{ki}$  – радиус глубины кольматации продуктивного пласта, м;

$\tau_{0d}$  – динамическое напряжение сдвига демпфирующей жидкости, Па;

$k_i$  – проницаемость, Д;

$\beta_{0i}$  – коэффициент, определяемый в зависимости от числа Сен-Венана;

$r_{si}$  – радиус скважины в интервале продуктивного пласта, м.

Далее производится расчет параметров блокирования пласта: радиуса проникновения блокирующей жидкости  $r_{bi}$ , м и толщины зоны фильтрации  $l_{fi}$ , м по формулам (9), (10) и (11).

$$r_{bi} = K_k \cdot r_{si} \cdot \sqrt{1 + \frac{\alpha_i \cdot \tau_i}{\ln(\tau_i) + 2 \cdot S_0}}, \quad (9)$$

где  $\alpha_i = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \cdot k_i \cdot \Delta P_i}{m_i \cdot \eta_0 \cdot \gamma_i}$ ,  $\tau_i = \frac{1,94 \cdot 10^5 \cdot \gamma_i \cdot 0,0625}{r_{si}^2}$ ,

$K_k$  – коэффициент кольматации жидкости;

$S_0$  – скин-фактор скважины до проведения работ;

$\Delta P_i$  – репрессия на пласт, МПа;

$m_i$  – пористость пропластка, д.ед.;

$\eta_6$  – пластическая вязкость фильтрата блокирующего состава, МПа·с;

$\chi_i$  – пьезопроводность, м<sup>2</sup>/с:

$$\chi_i = \frac{0,001 \cdot k_i \cdot P_{fp}}{m_i \cdot \mu_r}, \quad (10)$$

где  $P_{fp}$  – пластовое давление, МПа;

$\mu_r$  – усредненная вязкость по метану, МПа·с.

$$l_{fi} = r_{bi} - r_{si}. \quad (11)$$

Расчет объема поглощения  $V_{ab}$ , м<sup>3</sup> и общего объема блокирующей жидкости  $V_b$ , м<sup>3</sup> выполняется по формулам (12) и (13) соответственно.

$$V_{ab} = \pi \cdot \varphi \sum_{i=1}^n m_i \cdot (H_{bi} - H_{ti}) \cdot (r_{bi}^2 - r_{si}^2), \quad (12)$$

где  $\varphi$  – коэффициент неоднородности пласта по проницаемости;

$H_{ti}$ ,  $H_{bi}$  – кровля и подошва продуктивного пропластка, м.

$$V_b = \beta V_d + V_{ab}, \quad (13)$$

где  $\beta$  – коэффициент технологических потерь.

Создание необходимого гидростатического давления для продавки блокирующего состава в пласт осуществляется определенным объемом жидкости глушения. Для расчета необходимого объема первоначально вычисляется минимальная высота столба ЖГ над перфорацией  $H_h$ , м по формуле (14) и максимальная плотность рабочей (промывочной) жидкости  $\rho_{wf}$ , кг/м<sup>3</sup> по формуле (15).

$$H_h = \frac{P_{fp} \cdot K \cdot 10^6}{\rho_{df} \cdot g}, \quad (14)$$

где  $K$  – коэффициент превышения забойного давления над пластовым;

$\rho_{df}$  – плотность жидкости глушения, кгс/м<sup>3</sup>.

$$\rho_{wf} = \frac{(P_{fp} + \Delta P_{ba} + \min(P_{hri})) \cdot K \cdot 10^6}{H \cdot g}, \quad (15)$$

где  $\Delta P_{ba}$  – блокирующая способность блокирующего состава, МПа.

Для расчета минимального объема жидкости глушения, способного создать необходимое гидростатическое давление на кровлю пласта в скважине без пакера, суммируются объемы жидкости глушения в трубном  $V_{dft}$ , м<sup>3</sup> и затрубном  $V_{dfa}$ , м<sup>3</sup> пространствах, вычисленные по формулам (16) и (17).

$$V_{dft} = \frac{\pi \cdot d_{\text{НКТ}}^2 \cdot H_h}{4}, \quad (16)$$

$$V_{dfa} = \frac{\pi \cdot H_h}{4} (d^2 - D_{\text{НКТ}}^2). \quad (17)$$

В скважине с пакером учитывается только объем НКТ  $V_{df}$ , м<sup>3</sup>, рассчитанный по формуле:

$$V_{df} = \frac{\pi \cdot d_{\text{НКТ}}^2 \cdot H_h}{4}. \quad (18)$$

Расчет гидростатического давления столба жидкости глушения на кровлю пласта  $P_h$ , МПа приведен в формуле (19).

$$P_h = \frac{\rho_{df} \cdot g \cdot H_t}{K \cdot 10^6}. \quad (19)$$

Согласно действующим нормативным документам для безопасного ведения работ необходимо поддержание гидростатического давления, создаваемого промысловой жидкостью, на 5–10% выше пластового. Однако отличие свойств трехфазных пен от свойств распространенных промысловых жидкостей обуславливает необходимость превышения гидростатического давления столба пены над пластовым в пределах 15–20% [Рябокоть и др., 1989; Рябокоть, 2009; Тагиров и др. 2005, Liu et al., 2024].

Основываясь на известных результатах лабораторных и промысловых исследований, а также учитывая низкую фильтруемость пены через пористую среду, дифференциальное давление на пласт до его уточнения рекомендуется поддерживать в пределах 15–20%, поэтому по графикам средний коэффициент аэрации и необходимый диаметр штуцера рекомендуется подбирать для давления, превышающего текущее пластовое давление на 15–20%.

Превышение давлений гидроразрыва и опрессовки ЭК для каждого пропластка выявляется предварительным расчетом давления на пропласток и проверкой выполнения следующего условия:

$$P_{hi} \geq P_{frpi} \text{ или } P_{hi} \geq P_{ЕК} \text{ или } P_{hi} \geq dP_{frpi} \cdot H_{bi}, \quad (20)$$

где  $P_{hi}$  – гидростатическое давление столба ЖГ на пропласток, МПа;

$P_{frpi}$  – давление гидроразрыва, МПа;

$P_{ЕК}$  – давление опрессовки ЭК, МПа;

$dP_{frpi}$  – градиент давления гидроразрыва, (МПа)/м.

На основе математической модели разработан программный комплекс «Программный комплекс по моделированию и выбору оптимальных технико-технологических параметров, обеспечивающих эффективное выполнение капитального ремонта скважин в условиях сверх АНПД (Кан < 0,2)» (Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2022668787, опубликовано 12.10.2022, Бюл. №10. Правообладатель: ПАО «Газпром»).

Методика выбора оптимальных параметров для эффективного глушения скважин в условиях АНПД заключается в подборе свойств технологических жидкостей, обеспечивающих значение гидростатического давления, не превышающего давление гидроразрыва и опрессовки труб с учетом объема поглощенной в пласт жидкости для рассматриваемых горно-геологических условий.

## Выводы

1. В статье выполнен анализ современного состояния проблемы глушения скважин, из которого можно заключить, что во многих исследованиях для глушения с целью сохранения естественной продуктивности предлагается использовать углеводородные жидкости пониженной плотности и пенные системы различных составов (прежде всего, трёхфазные) с возможностью регулирования плотности и вязкости, а также обладающие пониженной фильтрацией и ингибирующим воздействием.

2. Расчетная модель программы совмещает гидродинамическую и фильтрационную модели процессов блокировки ПЗП, позволяет осуществить выбор технологических параметров проведения ремонтных работ, исключает риск глубокой коль-

матации коллектора и неконтролируемое поглощение технологических жидкостей.

3. Разработаны математическое обеспечение и «Программный комплекс по моделированию и выбору оптимальных технико-технологических параметров, обеспечивающих эффективное выполнение капитального ремонта скважин в условиях сверх АНПД (Кан < 0,2)».

4. В результате расчетов вычислены объемы демпфирующей и блокирующей жидкости, минимальный объем и высота столба жидкости глушения, максимальная плотность рабочей жидкости, гидростатическое давление столба жидкости глушения, оказываемое на кровлю пласта, радиус проникновения в пласт блокирующей жидкости, объем поглощенной блокирующей жидкости, толщина зоны фильтрации, возможные превышения давлений гидроразрыва, опрессовки ЭК или градиента давления.

### Литература

1. Ахметов А.А. Капитальный ремонт скважин на Уренгойском месторождении. Уфа: УГНТУ, 2000. – 219 с.

2. Баранов Ю.В., Зиятдинов И.Х., Валеева Т.Г., Хакимянова М.М., Абдрашитов Ш.М. Разработка и опытно-промысловые испытания модифицированной жидкости СНПХ-3120М для глушения скважин. // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 2. – С. 39–43.

3. Басарыгин Ю.М., Макаренко П.П., Мавромати В.Д. Ремонт газовых скважин. М.: Недра, 1998. – 217 с.

4. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Технология капитального и подземного ремонта нефтяных и газовых скважин. Краснодар: Сов. Кубань, 2002. – 584 с.

5. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Минченко Ю.С., Копченков В.Г., Федоренко В.В. Повышение технологической эффективности глушения скважин с использованием инновационных технологий. // Наука. Инновации. Технологии. – 2022. – № 4. С. – 187–208.

6. Каракетов А.В. Математическое моделирование процесса блокирования продуктивного пласта при проведении капитального ремонта скважин. // Газовая промышленность. – 2020. – № 2. – С. 96–102.

7. Поп Г.С., Барсуков К.А., Ахметов А.А. Новая технология глушения, консервации и освоения скважин. // Газовая промышленность. – 1990. – № 9. – С. 39–40.

8. Рябоконт С.А., Вольтере А.А., Сурков А.Б., Глущенко В.Н. Жидкости глушения для ремонта скважин и их влияние на коллекторские свойства пласта. М.: ВНИИОЭНГ, 1989. – 44 с.

9. Рябоконт С.А. Технологические жидкости для заканчивания и ремонта скважин. 2-е изд. Краснодар, 2009. – 338 с.

10. Саидова К.М., Луценко О.О., Черненко К.И., Рыжковский Т.И. Моделирование сети трещин в объеме природных резервуаров нефтекумских отложений Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения на основе промыслово-линеamentного метода в программном обеспечении Petrel. // Геология и Геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 101–113.

11. Тагиров К.М., Кабанов Н.И., Гасумов Р.А., и др. Временная инструкция по глушению скважин с применением пеноэмульсий с наполнителями в условиях АНПД. Ставрополь: СевКавНИПИГаз, Газпром, 2001. – 36 с.

12. Тагиров К.М., Тагирова А.М., Бахмацкий С.В. Методика приготовления пены с заданными параметрами для глушения газовых скважин в условиях аномально низких пластовых давлений. // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2005. № 2. – С. 47–51.

13. Топольников А.С. Моделирование выноса жидкости глушения после запуска нефтескважины. // Многофазные системы. – 2020. – Т. 15. № 3-4. – С. 167–175.

14. Islamov S.R., Bondarenko A.V., Mardashov D.V. Substantiation of a well killing technology for fractured carbonate reservoirs. *Youth Technical Sessions Proceedings*. – CRC Press, 2019. – pp. 256–264.
15. Liu H., Liu H., Zhang Q., Fan M., Yin B., Wang X., Sun X., Wang Z. Effect of liquid viscosity on the gas–liquid two phase countercurrent flow in the wellbore of bullheading killing. // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 221. – Art. No. 111274. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111274.
16. Liu D., Sun R., Zhang Y., Wang Y., Li G. A low density micro-foam workover fluid for deep and ultra-deep wells with low-pressure coefficient and high inorganic salt. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2024. – Vol. 682. – Art. No. 132870.
17. Mardashov D.V., Bondarenko A.V., Raupov I.R. Technique for calculating technological parameters of non-Newtonian liquids injection into oil well during workover. // *Journal of Mining Institute*. – 2022. – Vol. 258. – pp. 881–894.
18. Mardashov D.V., Rogachev M.K., Zeigman Y.V., Mukhametshin V.V. Well killing technology before workover operation in complicated conditions. // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. No. 3. – 15 p.
19. Raabe G., Jortner C.S. *Universal Well Control*. // Gulf Professional Publishing. – 2021. – 1051 p.
20. Uliasz M. Workover fluid for the reconstruction of wells with reduced reservoir pressure. // *Nafta-Gaz*. – 2020. – Vol. 76. No. 7. – pp. 457–465.
21. Zhang J., Zhao Z., Li X., Zheng Y., Li C., Li Z., Liu X. Research on the mechanism of the influence of flooding on the killing of empty wells. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2021. – Vol. 11. No. 9. – pp. 3571–3598.
22. Zhang Z., Sun B., Wang Z., Pan S., Lou W., Sun D. Intelligent well killing control method driven by coupling multiphase flow simulation and real-time data. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 213. – Art. No. 110337.

## References

1. Akhmetov A.A. Well-workover operations at the Urengoy field. Ufa. USNTU, 2000. 219 p. (In Russ.)
2. Baranov Yu.V., Ziyatdinov I.Kh., Valeeva T.G., Khakimzyanova M.M., Abdrashitov Sh.M. Development and pilot testing of the modified fluid SNPKH-3120M for killing wells. *Oil industry*. 1998. No. 2. pp. 39–43. (In Russ.)
3. Basarygin Yu.M., Makarenko P.P., Mavromati V.D. Repair of gas wells. Moscow. Nedra. 1998. 217 p. (In Russ.)
4. Basarygin Yu.M., Bulatov A.I., Proselkov Yu.M. Technology capital and underground repairs of oil and gas wells. Krasnodar. Sov. Kuban. 2002. 584 p.м
5. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko Y.S., Kopchenkov V.G., Fedorenko V.V. Improving the technological efficiency of well killing using innovative technologies. *Science. Innovation. Technologies*. 2022. No. 4. pp. 187–208. (In Russ.)
6. Karaketov A.V. Mathematical modeling of the process of blocking a productive formation during a well-workover operations. *Gas industry*. 2020. No. 2. pp. 96–102. (In Russ.)
7. Pop G.S., Barsukov K.A., Akhmetov A.A. New technology for killing, conservation and development of wells. *Gas industry*. 1990. No. 9. pp. 39–40. (In Russ.)
8. Ryabokon S.A., Voltere A.A., Surkov A.B., Glushchenko V.N. Killing fluids for well repair and their influence on reservoir properties. Moscow. VNII OENG. 1989. 44 p. (In Russ.)
9. Ryabokon S.A. Technological fluids for well completion and repair. 2nd ed. Krasnodar 2009. 338 p. (In Russ.)
10. Saidova K.M., Lutsenko O.O., Chernenko K.I., Ryzhevsky T.I. Modeling of a network of fractures in the volume of natural reservoirs of Neftekum deposits of the Zimne-Stavkinsko-

Pravoberezhnoe field based on the production-lineament method in Petrel software. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 101–113. (In Russ.)

11. Tagirov K.M., Kabanov N.I., Gasumov R.A., et al. Temporary instructions for killing wells using foam emulsions with fillers in ANPD conditions. *Stavropol. SevKavNIPIgaz. Gazprom*. 2001. 36 p. (In Russ.)

12. Tagirov K.M., Tagirova A.M., Bakhmatsky S.V. Methods for preparing foam with given parameters for killing gas wells under conditions of abnormally low reservoir pressures. In: *Proceedings of the North Caucasus State Technical University*. 2005. No. 2. pp. 47–51. (In Russ.)

13. Topolnikov A.S. Modeling of kill fluid removal after launching an oil production well. *Multiphase systems*. 2020. Vol. 15. Nos. 3-4. pp. 167–175. (In Russ.)

14. Islamov S.R., Bondarenko A.V., Mardashov D.V. Substantiation of a well killing technology for fractured carbonate reservoirs. *Youth Technical Sessions Proceedings. CRC Press*. 2019. pp. 256–264.

15. Liu H., Liu H., Zhang Q., Fan M., Yin B., Wang X., Sun X., Wang Z. Effect of liquid viscosity on the gas–liquid two phase countercurrent flow in the wellbore of bullheading killing. *Geoenergy Science and Engineering*. 2023. Vol. 221. Art. No. 111274. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111274.

16. Liu D., Sun R., Zhang Y., Wang Y., Li G. A low density micro-foam workover fluid for deep and ultra-deep wells with low-pressure coefficient and high inorganic salt. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. Vol. 682. Art. No. 132870.

17. Mardashov D.V., Bondarenko A.V., Raupov I.R., Technique for calculating technological parameters of non-Newtonian liquids injection into oil well during workover. *Journal of Mining Institute*, 2022. Vol. 258. pp. 881–894.

18. Mardashov D.V., Rogachev M.K., Zeigman Y.V., Mukhametshin V.V. Well killing technology before workover operation in complicated conditions. *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 3. 15 p.

19. Raabe G., Jortner C.S. *Universal Well Control*. Gulf Professional Publishing. 2021. 1051 p.

20. Uliasz M. Workover fluid for the reconstruction of wells with reduced reservoir pressure. *Nafta-Gaz*. 2020. Vol. 76. No. 7. pp. 457–465.

21. Zhang J., Zhao Z., Li X., Zheng Y., Li C., Li Z., Liu X. Research on the mechanism of the influence of flooding on the killing of empty wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021. Vol. 11. No. 9. pp. 3571–3598.

22. Zhang Z., Sun B., Wang Z., Pan S., Lou W., Sun D. Intelligent well killing control method driven by coupling multiphase flow simulation and real-time data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 213. Art. No. 110337.

УДК: 551.24

DOI: 10.46698/g9869-6510-8834-x

Оригинальная статья

## Региональные сдвиги и связанные с ними дислокации в осадочном чехле Скифско-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: 29.03.2024, доработана: 31.07.2024, принята к публикации: 01.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В осадочном чехле Скифско-Туранской плиты достаточно широко представлены складчато-надвиговые дислокации, образовавшиеся под воздействием сил бокового сжатия. Горизонтальные тектонические движения обычно сопровождаются латеральным перемещением отдельных блоков земной коры, разделенных сдвигами. В отличие от надвиговых дислокаций информация о наличии сдвигов для Скифско-Туранской плиты крайне ограничена. Приведенные в работе сведения по указанной проблеме позволяют по-новому взглянуть на геодинамическую обстановку формирования платформенных территорий, а также могут способствовать решению некоторых нефтегеологических задач, поскольку в зонах региональных сдвигов часто сосредоточены скопления нефти и газа. **Цель исследований.** Изучение разломной тектоники запада Туранской плиты, присдвиговых складчатых и разрывных нарушений в осадочном чехле с целью определения их морфологии и условий образования. **Методы исследования.** Комплексный анализ геолого-геофизических материалов, включающий в себя данные высокоточной крупномасштабной аэромагнитной съемки, сейсмической разведки методом отраженных волн, глубокого бурения, дистанционных съемок. Произведена интерпретация временных разрезов с целью определения морфологии дислокаций. Проанализированы материалы бурения нефтепоисковых скважин. Выполнены структурные построения с привлечением данных сейсморазведки и бурения. Произведена корреляция разрезов скважин. С целью восстановления истории развития территории в целом и осложняющих ее складчато-разрывных дислокаций произведены палеотектонические построения. Применены методы структурного анализа. **Результаты работы.** На основании анализа материалов крупномасштабной (1:50 000) высокоточной аэромагнитной съемки составлена карта разломной тектоники запада Туранской плиты. Установлена сдвиговая природа региональных разломов северо-восточного простирания, амплитуда горизонтального смещения по которым достигает десятков километров. Многие из сдвигов были активны и в период формирования осадочного чехла платформы, в результате чего были сформированы характерные присдвиговые деформации, содержащие скопления нефти и газа. Проведенные исследования свидетельствуют о важной роли горизонтальных тектонических движений не только в формировании структуры складчатого основания платформы, но и перекрывающего его чехла. Полученные результаты могут быть использованы при изучении геологического строения других слабоизученных районов молодой платформы, а также способствовать выбору рациональной методики геологоразведочных работ на нефть и газ.

**Ключевые слова:** разломная тектоника, сдвиги, присдвиговые дислокации, 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. Региональные сдвиги и связанные с ними дислокации в осадочном чехле Скифско-Туранской плиты. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 136-147. DOI: 10.46698/g9869-6510-8834-x

DOI: 10.46698/g9869-6510-8834-x

Original paper

## Regional shifts and related dislocations in the sedimentary cover of the Scythian-Turanian plate

V.I. Popkov<sup>id</sup>, I.V. Popkov<sup>id</sup>

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

Received: 29.03.2024, revised: 31.07.2024, accepted: 01.08.2024

**Abstract: Relevance.** Folded thrust dislocations formed under the influence of lateral compression forces are quite widely represented in the sedimentary cover of the Scythian-Turanian plate. Horizontal tectonic movements are usually accompanied by lateral movement of individual blocks of the Earth's crust separated by shifts. Unlike thrust dislocations, information on the presence of shifts for the Scythian-Turanian platform is extremely limited. The information provided in this paper on this problem allows us to take a fresh look at the geodynamic situation of the formation of platform territories, and can also contribute to solving some petroleum problems, since accumulations of oil and gas are often concentrated in areas of regional shifts. **Aim.** The study of the fault tectonics of the west of the Turanian plate, near-shear folded and discontinuous faults in the sedimentary cover in order to determine their morphology and conditions of formation. **Research methods.** A comprehensive analysis of geological and geophysical research, including materials from high-precision large-scale aeromagnetic surveys, seismic exploration by reflected waves, deep drilling, and remote surveys. The interpretation of time sections was carried out in order to determine the morphology of dislocations. The materials of drilling oil exploration wells are analyzed. Structural constructions were carried out using seismic and drilling data. The correlation of well sections was made. In order to restore the history of the development of the territory as a whole and the fold-discontinuous dislocations complicating it, paleotectonic constructions were made. The methods of structural analysis are applied. **Results.** Based on the analysis of large-scale (1:50,000) high-precision aeromagnetic survey materials, a map of the fault tectonics of the west of the Turan plate has been compiled. The shear nature of the regional faults of the northeastern strike has been established, the amplitude of horizontal mixing along which reaches tens of kilometers. Many of the shifts were active during the formation of the sedimentary cover of the platform, as a result of which characteristic shear deformations containing accumulations of oil and gas were formed. The results obtained indicate the important role of horizontal tectonic movements not only in the formation of the structure of the folded base of the platform, but also the cover that breaks it. The obtained results can be used in studying the geological structure of other less studied areas of the young platform, as well as contribute to the selection of a rational methodology for geological exploration of oil and gas.

**Keywords:** fault tectonics, shifts, shear dislocations, tangential compression, oil and gas traps.

**Acknowledgements:** *The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-27-00037.*

**For citation:** Popkov V.I., Popkov I.V. Regional shifts and related dislocations in the sedimentary cover of the Scythian-Turanian plate. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(3): 136-147. DOI: 10.46698/g9869-6510-8834-x

## Введение

В результате многолетних исследований тектоники и геодинамики Скифско-Туранской молодой платформы была обоснована важная роль тангенциального сжатия в формировании структуры не только ее складчатого основания, но и перекрывающего осадочного чехла. Были выявлены обширные области, имеющие сложное складчато-надвиговое строение [Попков, Попков, 2023 и др.]. Изучение морфологии дислокаций показало их принципиальное сходство с аналогичными структурами орогенных поясов [Камалетдинов и др., 1981; Jourdon et al., 2020; Sobornov, 1996, 2020], что позволило сделать вывод о едином механизме их образования.

Очевидно, что тангенциальные тектонические напряжения могут обусловить формирование не только складчато-надвиговых дислокаций, но и сдвигов. В отличие от первых информация о наличии сдвигов для Скифско-Туранской платформы крайне ограничена. В связи с этим, приведенная ниже информация имеет не только теоретическое значение, поскольку позволяет по-новому взглянуть на геодинамическую обстановку формирования платформенных территорий, но и может способствовать решению некоторых нефтегеологических задач, поскольку в зонах региональных сдвигов часто сосредоточены крупные скопления нефти и газа [Казанцева, 2021, 2022, 2023; Нассонова, Романчев, 2011; Borderie et al., 2019; Carola et al., 2015; Li et al., 2012; Roeder, 2010; Yu et al., 2014; Xu, 2004].

## Методы исследований

Основным объектом исследований явилась западная часть Туранской плиты, где в конце прошлого века была проведена высокоточная аэромагнитная съемка. Масштаб наблюдений 1:50 000. Съемкой покрыта территория, административно входящая в состав Западного Казахстана, охватывающая Северный Устюрт, Мангышлак и п-ов Бузачи. Масштаб съемки, применение современных методов проведения полевых работ и последующей камеральной обработки полученных материалов позволили получить уникальные по информативности сведения о глубинном строении молодой платформы [Попков и др., 1985]. Одним из итоговых документов, полученных при интерпретации магнитного поля (построения выполнены с сечением в 2 нТл), явилась детальная карта разломной тектоники фундамента региона масштаба 1:500 000.

Главную и наиболее ценную информацию о строении складок и разрывов в перекрывающем фундамент осадочном чехле несут в себе материалы сейсмической разведки методом отраженных волн, которой покрыта вся территория платформы. С целью определения морфологии складчатых и разрывных дислокаций произведена интерпретация временных разрезов, выполнены структурные построения с привлечением данных бурения как по региону в целом, так и по отдельным объектам. В последнем случае привлекались данные сейсморазведки 3Д (площадь Оймаша). Изучен керновый материал. Осуществлена корреляция разрезов скважин, что позволило выявить участки дробления пород, установить факты тектонического сдвигания отдельных секций разреза при пересечении скважинами надвигов и взбросов.

С целью восстановления истории развития территории в целом и осложняющих ее складчато-разрывных дислокаций произведены палеотектонические построения как регионального, так и локального масштабов. С целью определения современной тектонической активности разрывов выполнялось дешифрирование аэро- и космических снимков топографических карт.

Для решения нефтегеологических задач изучены результаты бурения на поисково-разведочных площадях, использованы сведения о коллекторских свойствах продуктивных горизонтов, строении известных присдвиговых месторождений нефти и газа Скифско-Туранской плиты.

Критически проанализирован литературный материал по нефтегазоносности зон разломов различных нефтегазоносных регионов.

### Результаты исследований и их обсуждение

В строении консолидированной земной коры запада Туранской плиты принимают участие докембрийский Северо-Устюртский массив и геоблок эпигерцинско-раннекиммерийской консолидации, охватывающий территорию п-ова Мангышлак. Для Северо-Устюртского массива характерно крупномозаичное геомагнитное поле. Отделен он от Мангышлакского геоблока Кырынско-Токубайским разломом, к юго-западу от которого магнитные аномалии приобретают отчетливо выраженный линейный характер, отражающий внутреннюю складчатую структуру фундамента. Простираение структур субширотное ( $290\text{--}310^\circ$ ). Ограничены они региональными складчатостями разломами той же ориентации (рис. 1).

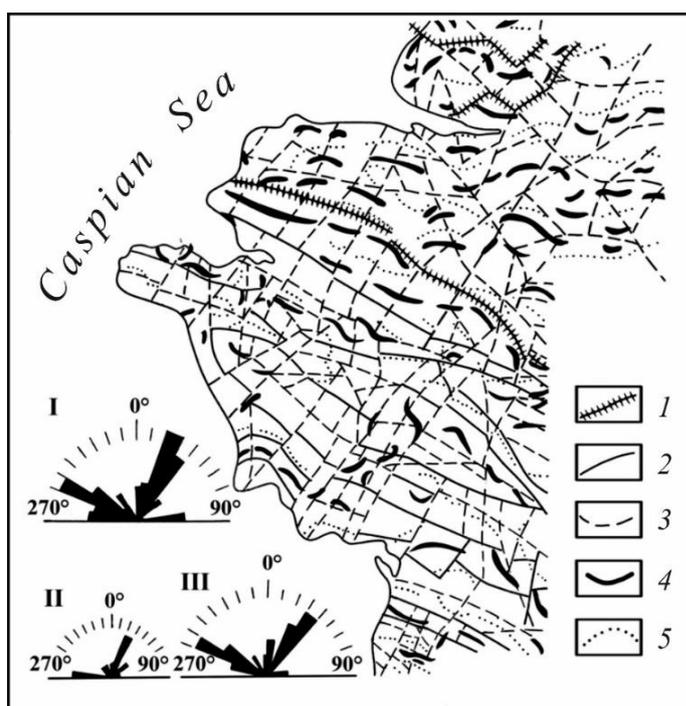


Рис. 1. Карта разломов фундамента запада Туранской плиты по материалам высокоточной аэромагнитной съемки.

1 – крупнейшие разломы – границы разновозрастных блоков фундамента; 2 – разломы – границы структурно-формационных зон в теле фундамента; 3 – прочие разломы; 4 – оси локальных максимумов  $\Delta T_a$ ; 5 – оси локальных минимумов поля  $\Delta T_a$ . Розы-диаграммы простираений разломов: I – для всей исследуемой территории, II – докембрийской части платформы, III – эпипалеозойско-раннекиммерийской части платформы /

Fig. 1. The map of the faults of the foundation of the west of the Turan plate based on the materials of high-precision aeromagnetic survey.

1 – the largest faults are the boundaries of foundation blocks of different ages; 2 – faults are the boundaries of structural and formation zones in the foundation body; 3 – other faults; 4 – axes of local maxima; 5 – axes of local minima of the field. Roses are diagrams of fault stretches: I – for the entire studied area, II – for the Precambrian part of the platform, III – for the Epipaleozoic part of the platform

Поперечные разрывы простираются в север-северо-восточном направлении по азимуту 20–40°, пересекая и смещая в плане структурные элементы фундамента. Латеральные смещения отчетливо фиксируются в региональной структуре магнитного поля. Кроме того, с зонами сдвиговых дислокаций связаны S-образно изогнутые локальные аномалии  $\Delta T_a$ , что является характерным признаком левосторонних движений по разрывам. Амплитуда горизонтального смещения по наиболее крупным сдвигам достигает 35 км.

Примечательно, что сдвиги Мангышлакского блока не проникают в пределы Северо-Устюртского докембрийского массива, утыкаясь в разделяющий их Кырынско-Токубайский разлом.

Наиболее интенсивно раздроблен Центрально-Мангышлакской сегмент раннекиммерийской системы дислокаций. К разломам северо-западного простирания приурочены Z-образно изогнутые локальные магнитные аномалии, что является следствием происходящих по ним правосторонних сдвиговых смещений. Слагающие складчатую систему пермско-триасовые отложения испытали интенсивные деформации на рубеже триаса и юры. Многочисленные надвиги, сдвиги и тектонические покровы можно наблюдать в естественных обнажениях Горного Мангышлака. В районах, где складчатый пермо-триас перекрыт платформенным чехлом, наличие деформаций бокового сжатия подтверждено данными сейсморазведки и глубокого бурения [Попков, Попков, 2023 и др.].

В пределах Южно-Мангышлакского геоблока, заключенного между Мангышлакско-Карашорской и Туаркыр-Карауданской раннекиммерийскими складчатыми зонами, триасовые отложения располагаются на палеозойском складчатом основании. Они имеют пологоволнистое залегание, осложненное региональными сдвигами северо-восточного простирания, сопровождающимися приуроченными к ним локальными поднятиями (рис. 2). Основные триасовые разрывы совпадают в плане с разрывами в подстилающем фундаменте, что указывает на тектоническую активность последних в более позднее время.

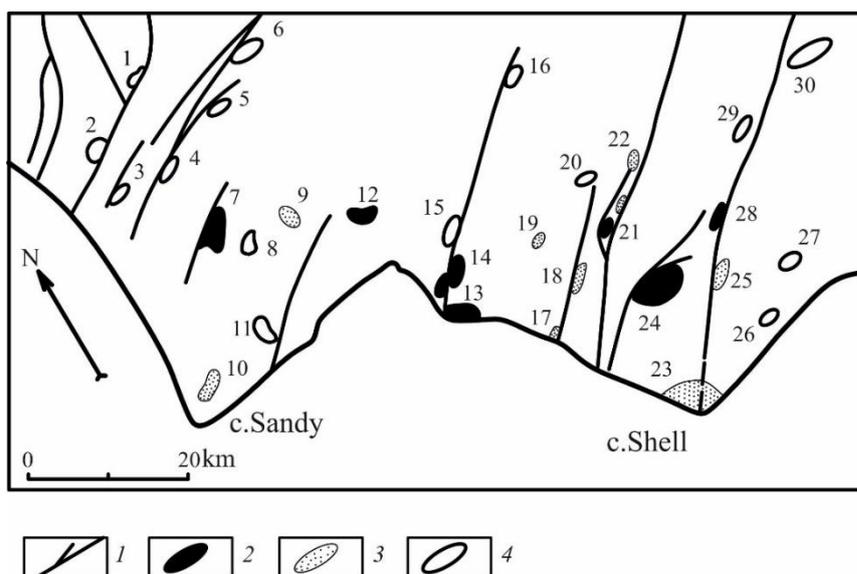


Рис. 2. Тектоническая схема Песчаномысско-Ракушечной зоны поднятий Южного Мангышлака.

1 – разрывы, 2 – месторождения углеводородов, 3 – поднятия, на которых получены притоки нефти и газа, 4 – антиклинали.

Наименование триасовых антиклиналей: 1 – Кожур, 2 – Северное Тастобе, 3 – Северная Жага, 4 – Западный Жантанат, 5 – Жанаорпа, 6 – Жулдыз, 7 – Оймаша, 8 – Северный Ацисор, 9 – Северный Ташкум, 10 – Песчаномысская, 11 – Ацисор, 12 – Ташкум, 13 – Южные Жиланды,

14 – Жиланды, 15 – Южное Карагие, 16 – Тасмурун, 17 – Змеиное, 18 – Западный Уйлюк, 19 – Степное, 20 – Садыр, 21 – Уйлюк, 22 – Полынное, 23 – Ракушечномысская, 24 – Северо-Ракушечная, 25 – Адыр, 26 – Приморская, 27 – Коктас, 28 – Сарсенбай, 29 – Тематическая, 30 – Байрам-Кзыладыр /

Fig. 2. Tectonic scheme of the Sandy-Myss-Shell uplift zone of the Southern Mangyshlak.

1 – ruptures, 2 – hydrocarbon deposits, 3 – uplifts where oil and gas inflows are obtained, 4 – anticlines. The name of the Triassic anticlines: 1 – Kozhur, 2 – Northern Tastobe, 3 – Northern Zhaga, 4 – Western Zhantanat, 5 – Zhanaorpa, 6 – Zhuldyz, 7 – Oymasha, 8 – Northern Aschisor, 9 – Northern Tashkent, 10 – Peschanomysskaya, 11 – Aschisor, 12 – Tashkent, 13 – Southern Zhilands, 14 – Zhilandy, 15 – Southern Karagie, 16 – Tasmurun, 17 – Snake, 18 – Zapadny Uyluk, 19 – Stepnoye, 20 – Sadyr, 21 – Uyluk, 22 – Wormwood, 23 – Rakushechnomysskaya, 24 – Severo-Rakushechnaya, 25 – Adyr, 26 – Primorskaya, 27 – Koktas, 28 – Sarsenbai, 29 – Thematic, 30 – Bayram-Kzyladyr

Дизъюнктивные дислокации уверенно картируются сейсмической разведкой. На некоторых поисково-разведочных площадях скважинами вскрыты тектонически сдвоенные разрезы, что может свидетельствовать о взбросо-сдвиговой природе разрывов. При этом поверхности сместителей, как правило, наклонены в восточном направлении согласно региональному тренду погружения мезозойских толщ. В результате этого приподнятые восточные крылья являются взброшенными относительно западных.

Величину горизонтальных смещений по разрывам в триасовых отложениях установить современными методами крайне сложно. Вертикальная же составляющая по данным сейсморазведки может достигать первых сотен метров.

В зонах сдвигов сформированы локальные складчато-разрывные дислокации разнообразной морфологии. Наглядной иллюстрацией особенностей их строения могут служить хорошо изученные структуры мыса Песчаный, где было открыто Оймашинское месторождение нефти в гранитном массиве фундамента. Для изучения геологического строения этого объекта здесь были проведены детальные геофизические работы, давшие важную информацию о морфологии развитых здесь складчатых и разрывных нарушений (рис. 3–5).

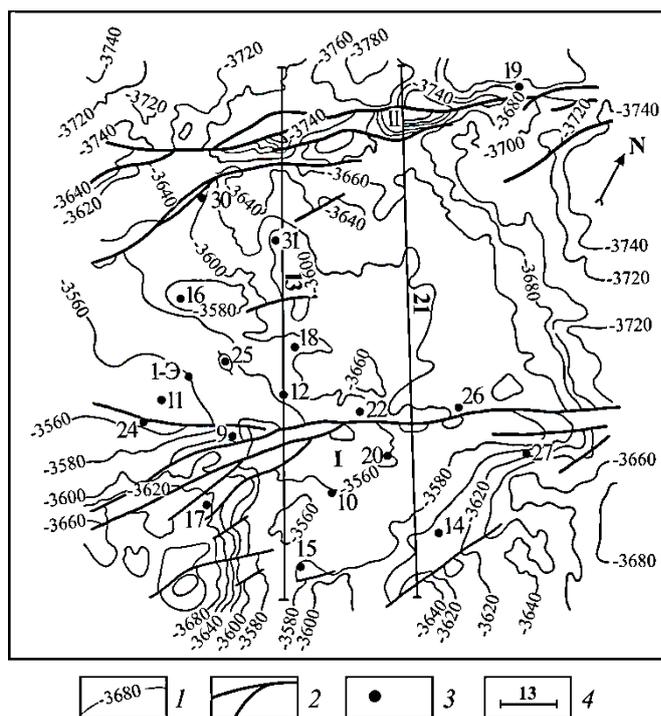


Рис. 3. Оймашинская площадь.

Структурная карта по подошве среднетриасовых отложений.

1 – стратоизогипсы, в м, 2 – разрывы, 3 – скважины, 4 – линии разрезов, приведенных на рис. 4 и 5 /

Fig. 3. Oymashinskaya square. Structural map of the base of the Middle Triassic sediments. 1 – stratoisohypses, in m, 2 – ruptures, 3 – boreholes, 4 – lines of sections shown in Fig. 4 and 5

Закартированные здесь фрагменты региональных сдвигов образуют зоны, состоящие из более мелких близпараллельных разрывов северо-восточного простирания. Непосредственно на Оймашинской площади можно наблюдать характерную для сдвиговых зон структуру типа «конского хвоста». Образована она более мелкими разрывами, веерообразно расходящимися в юго-западном направлении от основного нарушения (см. рис. 3). Одновременно с этим происходит затухание амплитуды смещения по каждому из отдельно взятых разрывов. Расположенные между ними блоки клинообразной формы. Ограничивающие их разрывы образуют характерные для сдвигов «структуры цветка» (см. рис. 4).

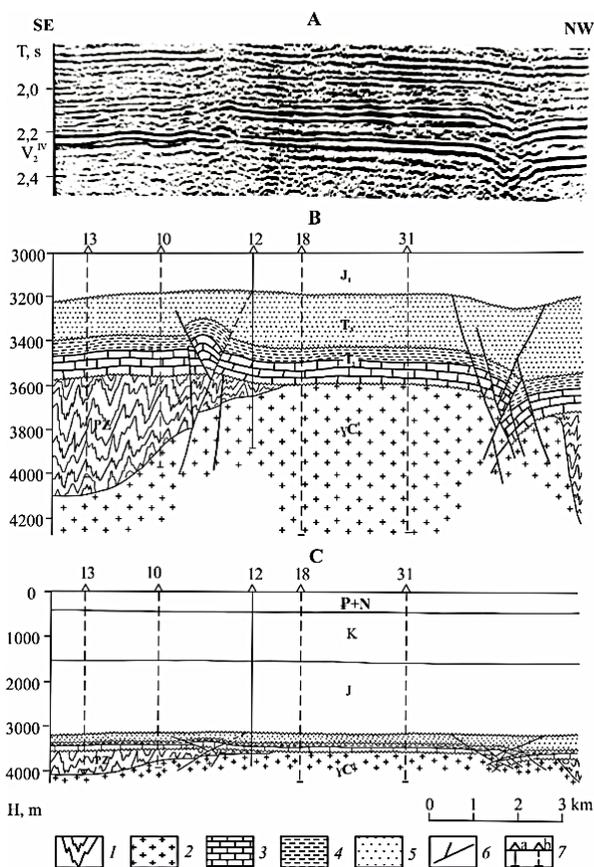


Рис. 4. Оймаша. Фрагмент временного разреза по линии сейсмопрофиля 13 (А) и его геологическая интерпретация (В, С). На рис. В показана доюрская часть разреза, масштаб 1:10.

1 – метаморфические породы фундамента, 2 – гранитоиды, 3 – вулканогенно-карбонатный комплекс, 4 – вулканогенно-аргиллитовая толща, 5 – вулканогенно-терригенный комплекс, 6 – разрывы, 7 – скважины (а – на линии профиля, б – снесенные) /

Fig. 4. Oymasha. A fragment of a time section along the line of seismic profile 13 (A) and its geological interpretation (B, C). In Fig. The pre-Jurassic part of the section is shown, scale 1:10.

1 – metamorphic basement rocks, 2 – granitoids, 3 – volcanogenic-carbonate complex, 4 – volcanogenic-mudstone strata, 5 – volcanogenic-terrigenous complex, 6 – ruptures, 7 – wells (a – on the profile line, b – demolished)

В отдельных случаях в зонах сдвигов сформированы незначительные по размерам складчато-надвиговые дислокации. Примером может служить Западно-Жантанатская складка (см. рис. 5). Размер ее по подошве среднего триаса составляет 2,0x0,7 км, амплитуда – 110 м. Антиклиналь имеет резко асимметричное строение: принадвиговое крыло узкое, крутое, а юго-восточное широкое и пологое. Поверх-

ность сместителя листрической формы, наклонена к юго-востоку под углом 30–35°. Величина горизонтального «нависания» взброшенного крыла над лежащим составляет около 120 м.

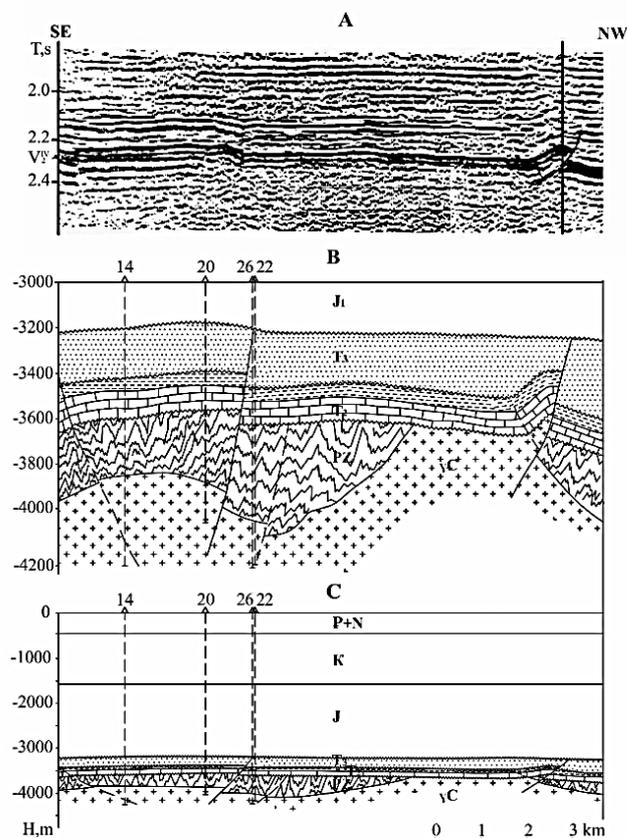


Рис. 5. Оймаша. Фрагмент временного разреза по линии сейсмопрофиля 21 (A) и его геологическая интерпретация (B, C). На рис. B показана доюрская часть разреза, масштаб 1:10. Условные обозначения см. на рис. 4 /

Fig. 5. Oymasha. A fragment of a time section along the line of seismic profile 13 (A) and its geological interpretation (B, C). In Fig. The pre-Jurassic part of the section is shown, scale 1:10. See Figure 4 for the symbols

Тектонические подвижки по сдвигам приводят к образованию в триасовых отложениях зон дробления. Ширина их может достигать 2,5–3,0 км. На сейсмических временных разрезах они отображаются в виде зон потери корреляции отражающих горизонтов. На Оймашинской площади, где проведена сейсморазведка с высоким разрешением, можно видеть внутреннее строение таких зон. Иногда здесь развиты незначительные по масштабу поддвиги (см. рис. 4).

Близкую морфологию имеют и другие присдвиговые дислокации Южно-Мангышлакского геоблока. Так, например, Северо-Ракушечное поднятие было сформировано в месте изгиба взбросо-сдвига с образованием принадвиговой асимметричной антиклинали размером 8x4 км. Амплитуда смещения по разрыву по подошве среднего триаса составляет 300 м. По мере удаления от этого участка надвиг преобразуется во взброс с потерей амплитуды смещения.

Уйлюкской группе поднятий в триасовых отложениях соответствует блок, выжатый по разрывам в виде клина. Протяженность блока достигает 12 км. Ширина его 1,2–1,5 км. Глубоким бурением здесь установлено повторение в разрезе отложе-

ний среднего триаса, что доказывает взбросовый характер разрывных нарушений, обусловивших тектоническое сдвигание отдельных секций разреза.

С течением времени отмечается снижение активности движений по разрывам, что привело к уменьшению их амплитуды от первых сотен метров в триасовых отложениях до десятков метров в юрских отложениях. В меловых и кайнозойских комплексах сейсмическими методами разрывы не фиксируются. Изменение активности подвижек по разрывам отражается и в морфологии присдвиговых дислокаций: если в юрских отложениях они представлены в основном малоамплитудными поднятиями, то в меловых и палеогеновых горизонтах лишь некоторые из них выражены в виде структурных носов и террас.

Региональные сдвиги уверенно диагностируются на аэро- и космофотоснимках, а также в ландшафте дневной поверхности, что указывает на продолжающуюся их жизнь и на новейшем этапе тектонического развития региона.

Многие из рассмотренных присдвиговых дислокаций являются ловушками углеводородов (УВ). В частности, например, промышленные скопления нефти и газа открыты на Оймашинском, Северо-Ракушечном поднятиях, на других площадях получены притоки углеводородов различной интенсивности (см. рис. 2). Нефтегазоносными в основном являются вулканогенно-карбонатные отложения среднего триаса. Небольшие скопления УВ обнаружены в низах юрского разреза, а на Оймашинском поднятии продуктивными оказались и граниты фундамента.

Помимо формирования традиционных антиклинальных ловушек разрывные нарушения и связанные с ними зоны дробления пород сыграли большую роль в образовании участков с улучшенными коллекторскими свойствами в породах фундамента и нижних секций осадочного чехла. В условиях низкопроницаемого разреза мигрирующие по разломам глубинные агрессивные флюиды приводили к растворению и выщелачиванию минералов и горных пород, образуя очаговые участки вторичных коллекторов. Особенно масштабно эти процессы проявились в карбонатных отложениях среднего триаса. Именно с такими зонами деструкции связаны наиболее высокодебитные притоки нефти и газа (скважины 16, 25 Оймаша; 4 – Сарсенбай; 1 – Уйлюк; 19 – Жантанат и др.).

Подобные зоны с улучшенными коллекторскими свойствами в низкопроницаемых толщах не всегда контролируются структурным фактором (наличие антиклинали) и скважины, пробуренные вне зон разуплотнения, даже находясь гипсометрически выше давших продукцию, могут оказаться «сухими». Примером может служить скважина 24 Оймаша, пробуренная в присводовой части триасовой антиклинали, в которой флюид не был получен, в то время как расположенная в менее благоприятных структурных условиях скважина 9 дала фонтанный приток нефти.

Мировой опыт поисковых работ на нефть и газ свидетельствует о том, что в зонах разрывных нарушений в условиях низкопроницаемого разреза за счет тектонической трещиноватости, процессов выщелачивания и метасоматоза образуются специфические ловушки, в которых при наличии благоприятных условий могут быть сформированы жильные залежи УВ [Белкин и др., 1988; Гаврилов и др., 2000; Грамберг, Супруненко, 1995; Трофимов, 2009].

## Выводы

Анализ геолого-геофизических материалов свидетельствует о широком развитии в фундаменте молодой платформы региональных сдвигов. Тектонические дви-

жения по многим из них продолжались и в более позднее время, что привело к формированию в осадочном чехле характерных присдвиговых дислокаций.

В зонах сдвигов и связанных с ними дислокаций образуется широкий спектр потенциальных ловушек, которые при благоприятных условиях могут быть заполнены нефтью и газом. В формировании полезной емкости пород активное участие принимают глубинные агрессивные флюиды, мигрирующие по разрывам. В результате в зонах сдвигов могут быть сформированы сложные по морфологии скопления УВ, которые с полным основанием можно классифицировать как жильные залежи, или даже зоны нефтегазонакопления.

Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на геодинамическую обстановку формирования не только фундамента, но и структур осадочного чехла Скифско-Туранской платформы, а также скоплений УВ в ее пределах. Установленные закономерности строения присдвиговых дислокаций и связанных с ними потенциальных резервуаров нефти и газа могут способствовать выбору более рациональной методики геологоразведочных работ.

### Литература

1. Белкин В.И., Медведский Р.И., Аббасов И.А. Жильный тип ловушек углеводородов. М.: ВНИИОЭНГ. – 1988. – Вып. 12. – 132 с.
2. Гаврилов В.П., Григорьянц Б.В., Дворецкий П.И., Пономарев В.А., Тарханов М.И. Зоны нефтегазонакопления жильного типа. М.: Недра, 2000. – 152 с.
3. Грамберг И.С., Супруненко О.И. Сдвиги как возможные пути миграции нефти и газа. // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 340. №1. – С. 75–77.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Камалетдинов М.А., Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Происхождение складчатости. М.: Наука, 1981. – 135 с.
8. Нассонова Н.В., Романчев М.А. Геодинамический контроль нефтегазоносности сдвиговыми дислокациями на востоке Западной Сибири. // Геология нефти и газа. – 2011. – № 4. – С. 8–14.
9. Попков В.И., Калинин М.И., Сейфулин Ш.М. Глубинное строение запада Туранской плиты. // Доклады АН СССР. – 1985. – Т. 284. № 41. – С. 939–943.
10. 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.
11. Трофимов В.А. Нефтеподводящие каналы и современная подпитка нефтяных месторождений: гипотезы и факты. // Георесурсы. – 2009. – № 1. Вып. 29. – С. 46–48.
12. 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.
13. 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. // International Journal of Earth Sciences. – 2015. – Vol. 104. – pp. 2215–2239. DOI: 10.1007/s00531-015-1177-z.

14. 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. Issue 1 – pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903.
15. Li S., Wang X., Suppe J. Compressional salt tectonics and syn-kinematic strata of the western Kuqa foreland basin, Southern Tian Shan, China. // *Basin Research*. – 2012. – No. 24. – pp. 475–497. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00531.x.
16. 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.
17. Sobornov K.O. Lateral variations in structural styles of tectonic wedging in the Northeastern Caucasus, Russia. // *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. – 1996. – Vol. 44. Issue 2. – pp. 385–399.
18. Sobornov K.O. Structure and development of wedge-shaped thrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. Search and Discovery Article #30654. – 2020. – DOI: 10.1306/30654Sobornov2020.
19. 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.
20. 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. Belkin V.I., Medvedsky R.I., Abbasov I.A. Vein type of hydrocarbon traps. Moscow. VNIIOENG. 1988. Issue. 12. 132 p. (In Russ.)
2. Gavrillov V.P., Grigoryants B.V., Dvoretzky P.I., Ponomarev V.A., Tarkhanov M.I. Zones of oil and gas accumulation of vein type. Moscow. Nedra. 2000. 152 p. (In Russ.)
3. Gramberg I.S., Suprunenko O.I. Shifts as possible ways of oil and gas migration. *Doklady Earth Sciences*. 1995. Vol. 340. No. 1. pp. 75–77. (In Russ.)
4. Kazantseva T.T. 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.)
5. 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.)
6. Kazantseva T.T. Fundamentals of geological processes in the thrust-thrust theory of the formation of the Earth's crust. *Geology*. In: Proc. of the Dep. of Earth Sc. and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan. 2021. No. 28. pp. 21–29. (In Russ.)
7. Kamaletdinov M.A., Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T. The origin of folding. Moscow. Nauka. 1981. 135 p. (In Russ.)
8. Nasonova N.V., Romanchev M.A. Geodynamic control of oil and gas content by shear dislocations in the east of Western Siberia. *Geology of oil and gas*. 2011. No. 4. pp. 8–14. (In Russ.)
9. Popkov V.I., Kalinin M.I., Seifulin Sh.M. The deep structure of the west of the Turanian plate. *Doklady of the USSR Academy of Sciences*. 1985. Vol. 284. No. 41. pp. 939–943. (In Russ.)
10. 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.)
11. Trofimov V.A. Oil supply channels and modern recharge of oil fields: hypotheses and facts. *Georesources*. 2009. No. 1. Issue 29. pp. 46–48. (In Russ.)
12. 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.

13. 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. *International Journal of Earth Sciences*. 2015. Vol. 104. pp. 2215–2239. DOI: 10.1007/s00531-015-1177-z.

14. 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. Issue 1 pp. 45–57. DOI: 10.1029/2019TC005903.

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

16. 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.

17. 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. Issue 2. pp. 385–399.

18. Sobornov K.O. Structure and development of wedged thrusts in the southern flank of the Terek-Caspian Foredeep, Russia. *Search and Discovery Article #30654*. 2020. DOI: 10.1306/30654Sobornov2020.

19. 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.

20. 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 911.6:379.85 (502.3)  
DOI: 10.46698/z6459-3055-9234-e

Оригинальная статья

## Рекреационное районирование Северо-Восточного Кавказа

Х.Ш. Забураева , Ч.Ш. Забураев , М.Б. Седиева 

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,  
Россия, 364051, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а,  
e-mail: eveggne@mail.ru

Статья поступила: 13.05.2024, доработана: 29.06.2024, принята к публикации: 09.07.2024

**Резюме:** Актуальность работы определяется необходимостью анализа пространственной дифференциации туристско-рекреационной деятельности на муниципальном и региональном уровнях в связи с развитием туризма на Северо-Восточном Кавказе. **Цель работы** – рекреационное районирование территории Северо-Восточного Кавказа на основе анализа туристско-рекреационного потенциала, пространственной организации рекреационных сетей, транспортной доступности и рекреационной освоенности. **Методы работы:** анализ и синтез результатов ранее проведенных исследований, контент-анализ, сравнительный, статистический и картографический. Карта-схема предлагаемого районирования составлена с использованием программы CorelDRAW путем синтеза карт Северо-Восточного Кавказа: административной, ландшафтной, геоморфологической, туристской, размещения санаторно-курортных организаций и плотности дорожной сети на муниципальном уровне. **Результаты работы.** Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых, посвященных вопросам рекреационного районирования и зонирования территории, выявил множество подходов к определению критериев районирования, в зависимости от обозначенных целей, масштабов исследуемой территории, локализации ресурсного потенциала и др. Проведенные исследования позволили выделить на Северо-Восточном Кавказе шесть рекреационных районов, различающихся по целому ряду критериев (географическое положение, ландшафтная структура, обеспеченность туристско-рекреационным потенциалом, транспортная доступность, обеспеченность рекреационными учреждениями). Для каждого рекреационного района обоснованы приоритетные направления развития туризма и рекреации. Наиболее широкий набор разновидностей туристско-рекреационной деятельности (как существующих, так и перспективных) обнаружен в высокогорном рекреационном районе, где он в определенной степени лимитируется низким уровнем транспортной доступности, а наименьший – в низменном (полупустынным) районе. Приморский рекреационный район выгодно отличается наибольшей обеспеченностью туристической инфраструктурой, рекреационной освоенностью и возможностями для развития морского и лечебно-оздоровительного туризма. Полученные результаты могут способствовать решению текущих задач развития туристической отрасли, а также найти применение в разработке стратегий развития туризма в регионах Северо-Восточного Кавказа.

**Ключевые слова:** рекреационный район, районирование, туризм, рекреация, туристско-рекреационный потенциал, предпосылки.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00218 «Экологический туризм и рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе»).

**Для цитирования:** Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Рекреационное районирование Северо-Восточного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 148-162. DOI: 10.46698/z6459-3055-9234-e

DOI: 10.46698/z6459-3055-9234-e

Original paper

## Recreational zoning of the North-Eastern Caucasus

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

Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences, 21a V. Alieva Str., Grozny  
364051, Russian Federation, e-mail: eveggne@mail.ru

Received: 13.05.2024, revised: 29.06.2024, accepted: 09.07.2024

**Abstract:** The relevance of the work is determined by the need to analyze the spatial differences of tourism and recreational activities at the municipal and regional levels in connection with the development of tourism in the North-Eastern Caucasus. The aim of the work is recreational zoning of the territory of the North-Eastern Caucasus based on the analysis of tourism and recreational potential, spatial organization of recreational networks, transport accessibility and recreational development. Methods of analysis and synthesis of the results of previously conducted research, content analysis, comparative, statistical and cartographic. The map-scheme of the proposed zoning is made using CorelDRAW program by synthesizing maps of the North-Eastern Caucasus: administrative, landscape, geomorphological, tourist, location of health resort organizations and density of the road network at the municipal level. Results. An analysis of the works of Russian and foreign scientists devoted to the issues of recreational zoning and zoning of the territory has revealed many approaches to determining zoning criteria, depending on the designated goals, the scale of the territory under study, the localization of resource potential etc. The conducted research allowed us to identify six recreational districts in the North-Eastern Caucasus, which differ in many characteristics (geographical location, landscape structure, provision with tourism and recreational potential, transportation accessibility, provision of the population with recreational facilities). Priority directions of tourism and recreation development are justified for each recreational area. The widest set of varieties of tourist and recreational activities (both existing and prospective) is found in the highland recreational district, where it is to some extent limited by the low level of transport accessibility, and the least - in the lowland (semi-desert) district. Primorsky recreational district is favorably distinguished by the greatest provision of tourist infrastructure, recreational development and opportunities for the development of sea and health tourism. The obtained results can contribute to the solution of current problems of tourism industry development, as well as find application in the development of tourism development strategies in the regions of the North-Eastern Caucasus.

**Keywords:** recreational district, zoning, tourism, recreation, tourism and recreational potential, prerequisites.

**Acknowledgments:** The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00218 "Ecological tourism and recreational nature management in the North-East Caucasus").

**For citation:** Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Recreational zoning of the North-Eastern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 148-162. DOI: 10.46698/z6459-3055-9234-e

### Введение

Рекреационное районирование – актуальная задача, имеющая важное научное и прикладное значение для эффективного территориального планирования и управления развитием туристско-рекреационного комплекса региона (страны).

Регионы Северо-Восточного Кавказа демонстрируют успешное формирование имиджа конкурентоспособных туристско-рекреационных территорий, благодаря

наличию богатого природно-рекреационного и культурно-исторического потенциала, выгодных социально-экономических условий, позволяющих осуществлять практически круглогодичную рекреационную деятельность. За последнее десятилетие здесь наблюдается неуклонный рост туристских потоков. К примеру, только за период с 2015 по 2022 гг., по данным Росстата, число туристских поездок в Чечню возросло в 5 раз (306 тыс. чел.), в Дагестан – в 2 раза (680 тыс. чел.), а в Ингушетию – в 3 раза (93 тыс. чел.).

Цель работы – рекреационное районирование территории Северо-Восточного Кавказа на основе анализа туристско-рекреационного потенциала, пространственной организации рекреационных сетей, транспортной доступности и рекреационной освоенности.

Ранее разработанные схемы рекреационного районирования в пределах исследуемой территории выполнены на уровне ландшафтных комплексов и лишь для Республики Дагестан [Атаев, Пайзуллаева, 2017; Большаник, Рамазанов, 2017]. Научная новизна данной работы заключается в том, что впервые проведено районирование территории Северо-Восточного Кавказа на основе анализа системы критериев, учитывающих особенности географического положения, ландшафтной структуры, транспортной доступности, рекреационного освоения, туристско-рекреационного потенциала.

### Изученность вопроса

Теоретико-методологические основы рекреационного районирования (РР) разрабатывались многими отечественными [Нефедова и др., 1973; Мироненко, Твердохлебов, 1981; Веденин, 1982; Зырянов, Гудковских, 2020 и др.] и зарубежными [Casari, 2008; Mason, 2012; Blasco et al., 2014; Li et al., 2024 и др.] исследователями. Данный вид районирования именуют как рекреационным [Худякова и др., 2021], так и туристско-рекреационным [Агакишиева, 2023] и туристским [Большаник, Рамазанов, 2017; Крыстев, 2019]. Следует оговорить, что перечисленные понятия авторами данной работы рассматриваются в качестве синонимов.

Классическое определение рекреационного района дано в трудах Н.С. Мироненко, И.Т. Твердохлебова, Ю.А. Веденина, которые определяют его в качестве территориальной совокупности экономически взаимосвязанных рекреационных учреждений, ориентированных на обслуживание рекреантов, для наилучшего удовлетворения их потребностей, используя природные и культурно-исторические комплексы туристской дестинации [Мироненко, Твердохлебов, 1981]. В современных исследованиях РР трактуется как деление территории на однородные части, различающиеся по характеру рекреационного освоения [Исаченко, 2022].

Впервые в СССР рекреационное районирование проведено под руководством В.С. Преображенского в 1970-е годы. Отечественный опыт демонстрирует разнообразие подходов к РР: ресурсный, отраслевой, медико-географический, рекреационно-ландшафтный (или ландшафтное и физико-географическое районирование), экономический, социально-географический, системно-структурный и др. [Федорова, 2014; Крыстев, 2019].

Несмотря на глубокую теоретико-методологическую проработку обсуждаемых вопросов, единой универсальной системы РР не существует. К настоящему времени разработано множество критериев районирования, в зависимости от характера физико-географических условий, туристско-рекреационного потенциала, степени

освоенности и иных особенностей туристской территории. При этом у разных авторов прослеживается индивидуальный подход к выделению определенного набора критериев (признаков и принципов). В.К. Крыстев видит в этом риск для «необоснованного фаворитизма» одних критериев за счет игнорирования других. В числе важнейших элементов, требующих учета в туристском районировании, он выделяет туристские ресурсы, услуги, материальную базу и инвестиционную деятельность в туристской сфере [Крыстев, 2019].

А.И. Зырянов и М.В. Гудковских (2020) указывают на необходимость учета природной зональности как важнейшей географической закономерности. В работе Е.Г. Кропиновой и А.В. Митрофановой (2022) представлены результаты анализа принципов рекреационного зонирования и районирования территории с акцентом на следующие критерии районирования: уровень обеспеченности туристско-рекреационными ресурсами и освоенности; специализацию района; степень благоприятности природных условий и др.

Зарубежными исследователями приоритет отдается концентрации туристско-рекреационного потенциала [Casari, 2008; Mandić et al., 2018; Seyfi et al., 2019], эстетичности ландшафта и климатической комфортности [Hermes et al., 2018a; Hou et al., 2022], учету рекреационных экосистемных услуг [Hermes et al., 2018b; Ghase-mi et al., 2024] и имиджа туристской территории [Shishito et al., 2022]. Во многих публикациях исследована корреляция между уровнем эстетичности ландшафтов и степенью их рекреационной освоенности [Paracchini et al., 2014; Caglayan et al., 2020; Kalinauskas et al., 2021].

М.А. Саранча [2008] вполне справедливо подметил невозможность разработки универсальных критериев интегрального РР оперируя тем, что данные критерии определяются множеством факторов, включая цели районирования, географические масштабы, иерархическую структуру и др. Критерии РР, существенные для одних территорий, могут оказаться незначимыми для других, с чем авторы данной статьи согласны.

Таким образом, наряду с традиционными общегеографическими принципами и подходами, которыми руководствуются при РР, необходимо учитывать специфику исследуемой территории. Особенно в условиях горных территорий, что подтверждает отечественный и зарубежный опыт районирования [Зеленцов и др., 2021; Mason, 2012; Lukoseviciute et al., 2022; Li et al., 2024]. Необходим также учет возможных геоэкологических рисков в данных зонах [Бурдзиева и др., 2023].

## Материалы и методы исследований

В работе использовались следующие методы исследования: анализ и синтез, контент-анализ, сравнительный, статистический и картографический.

В основе предлагаемого рекреационного районирования Северо-Восточного Кавказа (СВК) лежит комплексный анализ, включающий:

- 1) историко-географический анализ рекреационного освоения исследуемой территории;
- 2) анализ географического положения;
- 3) учет особенностей ландшафтной структуры;
- 4) оценку туристско-рекреационного потенциала;
- 5) анализ обеспеченности транспортной инфраструктурой;
- 6) исследование пространственной организации рекреационных сетей.

Многие из этих показателей нами анализировались в предыдущих исследованиях [Забураева, 2023; Забураева и др., 2023б и др.]. В данной работе выполнено обобщение полученных ранее результатов. Карта-схема предлагаемого районирования разработана с использованием программы CorelDRAW путем синтеза карт Северо-Восточного Кавказа: административной, ландшафтной, геоморфологической, туристской, размещения санаторно-курортных организаций и плотности дорожной сети на муниципальном уровне. Рекреационные районы выделялись с учетом границ муниципальных районов, поскольку статистические данные и все вышеперечисленные характеристики определялись в разрезе административно-территориальных единиц.

### Результаты работы и их обсуждение

Несмотря на сложившееся разнообразие подходов к РР, главным критерием его реализации исследователями признается локализация ресурсного потенциала, который определяет развитие тех или иных видов туризма и рекреации.

Общность районообразующих признаков и характера рекреационного использования местности позволила выделить на Северо-Восточном Кавказе шесть рекреационных районов (рис. 1).

**Низменный (полупустынный) рекреационный район** включает шесть муниципальных районов и занимает около 1/3 части СВК. Большая часть территории района расположена в зоне полупустынь в сочетании с лугово-болотно-степной и степной зонами. Это наименее обеспеченная туристско-рекреационными ресурсами зона (в сравнении с остальными) на СВК, для которой также характерен низкий уровень транспортной доступности и вовлеченности в туристско-рекреационную сферу. Однако нельзя утверждать, что низменный район не представляет туристско-рекреационную ценность. В таблице 1 приведены сведения о наиболее значимых объектах туризма и рекреации в различных рекреационных районах СВК, а также об актуальных и перспективных направлениях туризма. В рассматриваемом районе расположены государственные природные заказники регионального значения (Степной, Парабочевский, Тарумовский и Ногайский) и памятники природы (гидрологические, ботанические и др.). На базе термальных минеральных источников и лечебных пелоидов функционирует санаторий «Терек». Здесь возможны такие направления туризма как научно-познавательный, спортивный (рыболовный и охотничий), оздоровительный и др. Данный район преимущественно привлекает местных креантов – любителей рыболовства, охоты и иных видов досуга.

**Приморский рекреационный район** расположен в прибрежной зоне Республики Дагестан и выгодно отличается возможностями для развития различных видов морского туризма. Здесь сосредоточено около 70% рекреационных учреждений Северо-Восточного Кавказа, включая крупные санатории: Каспий, Талги, Солнечный берег, Одиссей и др., созданы многочисленные базы отдыха и гостиничный фонд, что позволяет развивать в данном районе различные виды лечебного и оздоровительного туризма, включая талассотерапию, бальнеотерапию и др. Наличие особо охраняемых природных территорий (заказники, памятники природы) создает возможности для научно-познавательного туризма. Центром притяжения туристов, как из регионов России, так и других государств здесь является древнейший город России – Дербент, где сконцентрировано множество памятников истории и культуры, включая Цитадель Нарын-Кала, старейшую мечеть страны (Дербентская Джума-мечеть), музей ковра и декоративно-прикладного искусства и др.

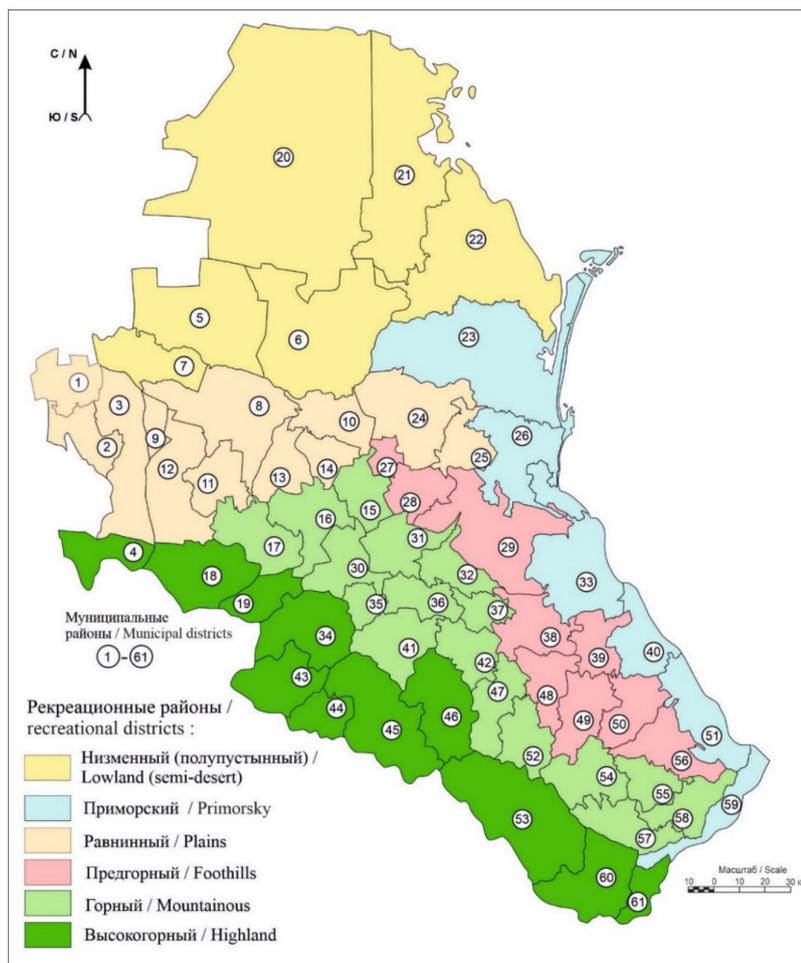


Рис. 1. Рекреационное районирование Северо-Восточного Кавказа

Муниципальные районы: Ингушетия: 1 – Малгобекский, 2 – Назрановский, 3 – Сунженский, 4 – Джейрахский. Чечня: 5 – Наурский, 6 – Шелковской, 7 – Надтеречный, 8 – Грозненский, 9 – Серноводский, 10 – Гудермесский, 11 – Урус – Мартановский, 12 – Ачхой – Мартановский, 13 – Шалинский, 14 – Курчалойский, 15 – Ножай – Юртовский, 16 – Веденский, 17 – Шатойский, 18 – Итум – Калининский, 19 – Шаройский. Дагестан: 20 – Ногайский, 21 – Тарумовский, 22 – Кизлярский, 23 – Бабаюртовский, 24 – Хасавюртовский, 25 – Кизилюртовский, 26 – Кумторкалинский, 27 – Новolakский, 28 – Казбековский, 29 – Буйнакский, 30 – Ботлихский, 31 – Гумбетовский, 32 – Унцукульский, 33 – Карабудахкентский, 34 – Цумадинский, 35 – Ахвахский, 36 – Хунзахский, 37 – Гергебильский, 38 – Левашинский, 39 – Сергокалинский, 40 – Каякентский, 41 – Шамильский, 42 – Гунибский, 43 – Цунтинский, 44 – Бежтинский участок; 45 – Тляратинский, 46 – Чародинский, 47 – Лакский, 48 – Акушинский, 49 – Дахадаевский, 50 – Кайтагский, 51 – Дербентский, 52 – Кулинский, 53 – Рутульский, 54 – Агульский, 55 – Хивский, 56 – Табасаранский, 57 – Курахский, 58 – Сулейман-Стальский, 59 – Магарамкентский, 60 – Ахтынский, 61 – Докузпаринский /

Fig. 1. Recreational zoning of the North-Eastern Caucasus

Municipal districts: Ingushetia: 1 – Malgobeksky, 2 – Nazranovsky, 3 – Sunzhensky, 4 – Dzheyrahsky. Chechnya: 5 – Naursky, 6 – Shelkovsky, 7 – Nadterechny, 8 – Groznensky, 9 – Sernovodsky, 10 – Gudermessky, 11 – Urus – Martanovsky, 12 – Achkhoy – Martanovsky, 13 – Shalinsky, 14 – Kurchaloyky, 15 – Nozhai – Yurtovsky, 16 – Vedensky, 17 – Shatoyky, 18 – Itum – Kalinsky, 19 – Sharoyky. Dagestan: 20 – Nogai, 21 – Tarumovsky, 22 – Kizlyarsky, 23 – Babayurtovsky, 24 – Khasavyurtovsky, 25 – Kizilyurtovsky, 26 – Kumtorkalinsky, 27 – Novolaksky, 28 – Kazbekovsky, 29 – Buynaksky, 30 – Botlikhsky, 31 – Gumbetovsky, 32 – Untsukulsky, 33 – Karabudakhkentky, 34 – Tsumadinsky, 35 – Akhvakhsky, 36 – Khunzakhsky, 37 – Gergebilsky, 38 – Levashinsky, 39 – Sergokalinsky, 40 – Kayakentky, 41 – Shamilsky, 42 – Gunibsky, 43 – Tsuntinsky, 44 – Bezhtinsky section; 45 – Tlaratinsky, 46 – Charodinsky, 47 – Laksky, 48 – Akushinsky, 49 – Dakhadaevsky, 50 – Kaytagky, 51 – Derbentsky, 52 – Kulinsky, 53 – Rutulsky, 54 – Agulsky, 55 – Khivsky, 56 – Tabasaransky, 57 – Kurakhsky, 58 – Suleiman-Stalsky, 59 – Magaramkentky, 60 – Akhtynsky, 61 – Dokuzparinsky

Таблица 1 / Table 1

**Специализация и транспортная доступность рекреационных районов Северо-Восточного Кавказа / Specialization and transport accessibility of recreational areas of the North-Eastern Caucasus**

Название района / Name of district	Транспортная доступность / Transport accessibility	Виды туризма и рекреации / Types of Tourism and Recreation	Объекты туризма и рекреации / Tourism and recreation facilities
Низменный (полупустынный) / Lowland (semi-desert)	Низкая / Low	научно-познавательный, культурно-исторический, спортивный (рыболовный, охотничий), лечебный (бальнеотерапия, фитотерапия) / scientific and educational, cultural and historical, sports (fishing, hunting), therapeutic (balneotherapy, phytotherapy)	Кизлярский участок Дагестанского природного заповедника. Заказники: Парабочевский, Степной, Тарумовский, Ногайский. Памятники природы: Степная жемчужина и Киссык, можжевеловая роща урочища Сосновка; озера: Карьерное, Майорское. Источники минеральных вод, лечебных грязей (пелоиды). Санаторий Терек / Kizlyarsky area of the Dagestan Nature Reserve. Nature reserves: Parabochevsky, Stepnoy, Tarumovsky, Nogaisky. Nature monuments: Steppe Pearl and Kisyk, juniper grove of the Sosnovka tract; lakes: Karyernoye, Mayorskoeye. Sources of mineral water, therapeutic mud (peloids). Sanatorium Terek
Приморский / Primorsky	Высокая / High	морской туризм, научно-познавательный, культурно-исторический, оздоровительный (медицинский), спортивный (яхтинг, морской каякинг), экстремальный (вейкбординг, гидрофлайт), лечебный (талассотерапия, фитотерапия, бальнеотерапия) / marine tourism, scientific and educational, cultural and historical, health (medical), sports (yachting, sea kayaking), extreme (wakeboarding, hydroflight), therapeutic (thalassotherapy, phytotherapy, balneotherapy)	Санатории: Каспий, Каякент, Каякент, Белый медведь, Журавли, Энергетик, Леззет, Парус, Солнечный берег, Талги, Одиссей, Порт-Петровск, центр оздоровления Тарнаир, Журавлик и базы отдыха. Заказники: Хамаматортовский, Аграханский, Каякентский и Самурский. Лиманно-плавневый комплекс «Сулакская лагуна». Памятники природы: гора Тарки-Тав, бархан Сарыкум, платановые деревья у Джума-мечети, Талгинская долина (сероводородные источники). Памятники истории и культуры: Цитадель Нарын-кала, Дербентская Джума-мечеть, музей ковра и декоративно-прикладного искусства / Sanatoriums: Caspian, Kayakent, Polar Bear, Cranes, Energetik, Lezzet, Sail, Sunny Beach, Talgi, Odyssey, Port-Petrovsky, health center Tarnair, Zhuravlik and recreation bases. Nature reserves: Hamamatyurtovskiy, Agrakhansky, Kayakentsky and Samursky. Estuary-silvic complex «Sulaksky Lagoon». Nature monuments: Tarki-Tau mountain, Sarykum barchan, sycamore trees near Juma mosque, Talga valley (hydrogen sulphide springs). Historical and cultural monuments: Naryn-Kala Citadel, Derbent Juma Mosque, Museum of carpet and decorative and applied arts.

<p>Равнинный / Plains</p>	<p>Высокая / High</p>	<p>научно-познавательный, культурно-исторический, этнокультурный, спортивный (водный, охотничий, походный, рыболовный), оздоровительный (медцинский), лечебный (бальнеотерапия, фитотерапия) / scientific and educational, cultural and historical, ethno-cultural, sports (water, hunting, hiking fishing), health-improving (medical), therapeutic (balneotherapy, phytotherapy)</p>	<p>Заказники: Андрейаульский, Янгиртовский, Браунский, Аргунский, Шалинский, Урус-Мартановский, Зеленая зона г. Грозного. Памятники природы: место первой скважины, пробуренной в Грозненском нефтеносном районе, Ахчой-Мартановская сосновая роща, озеро Шайтан-Казак. Санаторий Серноводск-Кавказский, реабилитационные центры, водолечебницы. Назрановская крепость, культурно-религиозный комплекс «Сердце Чечни», «Грозный-Сити», храм Михаила Архангела, Андрейаульское городище, Центр традиционной культуры народов России в г. Хасавюрт, старинные мечети, центры народных промыслов и ремесел (гончарное дело, ковроткачество и др.) / Nature reserves: Andreyaulsky, Yangiyurtovsky, Bragunsky, Argunsky, Shalinsky, Urus-Martanovsky, and the Green Zone of Grozny. Natural monuments: the site of the first well drilled in Grozny oil-bearing region, Akhchoi-Martanovskaya pine grove, Shaitan-Kazak lake. Semovodsk-Kavkazsky sanatorium, rehabilitation centers, water treatment facilities. Nazran Fortress, cultural and religious complex "Heart of Chechnya", "Grozny-City", Mikhail Archangel Temple, Andreyaulskoye ancient settlement, Center of Traditional Culture of the Peoples of Russia in Khasavyurt, ancient mosques, centers of folk crafts and handicrafts (pottery, carpet weaving, etc.)</p>
<p>Предгорный / Foothills</p>	<p>Средняя / Average</p>	<p>научно-познавательный, культурно-исторический, этнокультурный (спелеотуризм, спортивный), походный, фотоохотничий, походный, фотоохотничий, лечебный (терренкур), лечебный (климаготерапия, бальнеотерапия), паломничество / scientific and educational, cultural and historical, ethno-cultural, geological, sports (speleotourism, water, hunting, hiking, photo hunting), Recreational (terrenekur), therapeutic (climatotherapy, balneotherapy), pilgrimage</p>	<p>Заказники: Мелиштинский, Дешлагарский. Природный парк «Ицари». Памятники природы: Казанищенский лес, Сулакский каньон, Алмакский каньон, Турагинский природный мост, Талгинская долина, Ханагский водопад, Пещера Дюрк. Санатории: Чиндирчоро, Республиканский детский туберкулезный санаторий города Буйнакса. Чиркейское водохранилище. Памятники истории и архитектуры, мусульманские и христианские святыни / Nature reserves: Melishtinsky, Deshlagarsky. The nature park "Itzari". Natural monuments: Kazanishchensky forest, Sulak canyon, Almak canyon, natural bridge Turaginsky, Talga valley, Khanag waterfall, Durk cave. Sanatoriums: Chindirchero, Republican Children's Tuberculosis Sanatorium of Buynaksk. Chirkey reservoir. Historical and architectural monuments, Muslim and Christian shrines.</p>

Горный / Mountainous	Ниже средней / Lower than average	<p>научно-познавательный, культурно-исторический, этнокультурный, геологический, экстремальный, спортивный (рафтинг, спелеотуризм, охотничий, рыболовный, походный, фотоохота), оздоровительный (терренкур), лечебный (климатотерапия, фитотерапия), паломничество / scientific and educational, cultural and historical, extreme, ethnocultural, geospeleotourism, hunting, fishing, hiking, photo hunting), recreation-al (terrenekur), therapeutic (climatotherapy, phytotherapy), pilgrimage</p>	<p>Заказники: Веденский, Касумкентский. Природный парк Верхний Гуниб. Памятники природы: теснина Эхо, платаны Ньютога, нефтяной источник в долине р. Большой Ярык-Су, долина Рычал-Су, парк из липы Кавказской, сосновый лес Макажевский, Карадахская теснина; озера: Мочох, Кезеной-Ам; водопады: Хунзахские, Салгинский, Вашингтонский, Харахойский; пещеры: Асатинская, Шеки-Хех. Санатории: Гуниб, Кпул-Ягар, пансионат «РАДДЕ», санаторно-реабилитационный центр имени Кунта-Хаджи Кишиева. Кемпинг Лагерь Гуниб, спортивно-туристический комплекс «Кезеной-Ам», Всесезонный туристско-рекреационный комплекс «Маглас», мусульманские и христианские святыни / Nature reserves: Vedensky, Kasumkentisky. Nature park Verkhny Gunist. Natural monuments: Echo Gorge, plane-trees of Nyutyug, oil source in the valley of Bolshoy Yaryk-Su river, Rychal-Su valley, park of Caucasian linden, Makazhev pine forest, Karadakh gorge; lakes: Mochokh, Kezenoy-Am; waterfalls: Hunzakh, Salta, Vashindaroy, Kharachoi; caves: Asatinskaya, Sheki-Kheh. Sanatoriums: Gunist, Kpulyatar, boarding house "RADDE"; sanatorium-rehabilitation center named after Kunta-Khadji Kishiev. Camp Gunist, sports and tourist complex "Kezenoy-Am". All-season tourist and recreational complex "Maglas", Muslim and Christian shrines.</p>
Высокогорный / Highland	Низкая / Low	<p>научно-познавательный, культурно-исторический, этнокультурный, геологический, экстремальный, спортивный (горнолыжный, спелеотуризм, рафтинг, охотничий, рыболовный, походный, фотоохота), оздоровительный (терренкур), лечебный (климатотерапия, фитотерапия), паломничество / scientific and educational, cultural and historical, ethnocultural, geospeleotourism, extreme, sports (skiing, speleotourism, rafting, hunting, fishing, hiking, photo-hunting), health-improving (terrenekur), therapeutic (climatotherapy, phytotherapy), pilgrimage</p>	<p>Заповедник Эрзи. Заказники: Ингульский, Советский, Тляратинский, Бежтинский, Кособско-Келебский и Чародинский. Памятники природы: роща березы Радде, водопады: Башинкалинский, Квадаринский, Чвахило. Санаторий Ахты. Всесезонные туристско-рекреационные комплексы: Ведучи, Армхи и Цори. Памятники истории и архитектуры: сторожевые башни, древние захоронения и др. Гора Шалбуздаг, «Плакучая» скала, государственные историко-архитектурные и природные музеи-заповедники (Аргунский и Джейрахско-Ассинский), краеведческие музеи в селениях Итум-Кали, Бежта, Ахты, мусульманские и христианские святыни / Natural reserves: Erzi, Ingushsky, Sovetsky, Tlyaratinsky, Bezhtinsky, Kosobsko-Kelebsky and Charodinsky. Natural monuments: Radde birch grove, waterfalls: Bashinkalinsky, Kvadarinsky, Chvakhilo. Sanatorium Akhty. All-season tourist and recreational complexes: Veduchi; Armkhi and Tsori. Historical and architectural monuments: watchtowers, ancient burials, etc. Mount Shalbuздаg, "Weeping" rock, state historical-architectural and natural museum-reserves (Argun and Jeyrakh-Assinsky), local history museums in the villages of Itum-Kali, Bezhta, Akhty, Muslim and Christian shrines</p>

**Равнинный рекреационный район** занимает центральную часть СВК, преимущественно в степной и лесостепной зонах, захватывая горные леса на самом юге и пойменные дельтовые ландшафты в восточной части. Этот район также характеризуется наличием коллективных средств размещения и хорошей транспортной доступностью. Историко-культурное наследие представлено многочисленными объектами (памятники воинам Великой Отечественной войны, обелиски, памятники архитектуры, археологии, религиозного назначения и др.). Значительную туристическую ценность представляют музейные комплексы, дома культуры, школы искусств. Здесь получили развитие познавательный, культурно-исторический, этнографический и другие виды туризма. Наиболее популярные туристические достопримечательности в данном рекреационном районе: Назрановская крепость, мемориал памяти и славы в Ингушетии, культурно-религиозный комплекс «Сердце Чечни», православный храм Михаила Архангела в Чечне, Андрейаульское городище, старинные мечети, центр традиционной культуры народов России в Дагестане и др.

**Предгорный рекреационный район** целиком расположен в пределах Дагестана. Ландшафтную основу формируют степная и лесостепная зоны, охватывая частично горные леса и луга. Характеризуется средним уровнем транспортной доступности, за исключением Сергокалинского и Кайтагского районов, где обнаружена низкая плотность дорожной сети на единицу площади. Туристско-рекреационный потенциал здесь выше, чем в равнинном районе за счет более высокой концентрации объектов историко-культурного наследия, значительного биологического разнообразия, наличия особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Район богат разнообразными достопримечательностями, в их числе один из живописнейших объектов России – Сулакский каньон, который является излюбленным местом посещения туристов. Наряду с вышеперечисленными направлениями туризма здесь перспективны также геологический туризм, оздоровительный (терренкур), паломничество и др.

**Горный рекреационный район** преимущественно занимает зону горных лесов, степей и лугов. Данный район обладает значительным туристско-рекреационным потенциалом для развития широкого спектра туризма и рекреации – от научно-познавательного, геологического до экстремального, лечебного и оздоровительного [Забураева и др., 2023а]. Однако транспортная доступность здесь ниже средней по СВК в целом.

Для **высокогорного рекреационного района** характерны ландшафты горно-лесного и горно-лугового высотных поясов в сочетании с нивальным. Здесь сосредоточена большая часть площадей ООПТ (заповедник Эрзи, заказники: Ингушский, Советский, Тляратинский, Бежтинский, Кособско-Келебский и Чародинский), функционируют всепогодные туристско-рекреационные комплексы, многочисленные памятники истории и культуры (башенные строения, склепы, городища и др.), мусульманские и христианские святыни. Данный район – наиболее труднодоступная территория Северо-Восточного Кавказа.

В качестве рекреационных центров СВК можно выделить города и городские округа (Магас, Гудермес, Махачкала, Каспийск, Избербаш, Дагестанские огни и др.), которые наиболее активно вовлекаются в сферу туризма. Некоторые из них основаны в качестве крепостей с целью обеспечения оборонных функций, в их числе Грозный, Назрань, Дербент.

## Выводы

Рекреационное районирование – сложная и трудоемкая задача, для решения которой отсутствует единый универсальный набор инструментов. Критерии районирования определяются множеством факторов, в зависимости от целей, географических масштабов исследуемой территории, иерархической структуры и др.

Предложенная схема районирования Северо-Восточного Кавказа основана на выделении шести относительно однородных по широкому спектру рекреационных районов. Данные районы отличаются туристско-рекреационным потенциалом, по степени освоенности, транспортной доступности и доминирующим направлениям туризма и рекреации. Наименее обеспеченным и слабо вовлеченным в туристско-рекреационную сферу является низменный (полупустынный) район, который, как и высокогорный рекреационный район характеризуется низким уровнем транспортной доступности. Однако отличительной особенностью последнего является наличие значительного туристско-рекреационного потенциала и возможностей для развития широкого спектра направлений туризма и рекреации (геологический, экстремальный, горнолыжный, спелеотуризм, терренкур и др.). Приморский рекреационный район характеризуется наибольшей обеспеченностью туристической инфраструктурой, рекреационной освоенностью, а также возможностями для развития морского и лечебно-оздоровительного туризма. Здесь обнаружена максимальная концентрация рекреационных учреждений Северо-Восточного Кавказа.

Полученные результаты позволяют оценить современные тенденции территориальной организации, выявить наиболее перспективные районы Северо-Восточного Кавказа для развития туризма и могут быть использованы в разработке стратегий развития туризма.

## Литература

1. Агакишиева Г.Р. Туристско-рекреационное районирование горных регионов Азербайджана (на примере Шеки-Загатальского, Губа-Хачмазского и Горно-Ширванского экономико-географических районов). // *Современные проблемы сервиса и туризма*. – 2023. – Т. 17. № 1. – С. 113–121. DOI: 10.5281/zenodo.7988118.
2. Атаев З.В., Пайзуллаева Г.П. Рекреационный потенциал природных районов Республики Дагестан: оценка и перспективы использования. Махачкала: Алеф, 2014. – 160 с.
3. Большаник П.В., Рамазанов Р.Г. Туристское районирование республики Дагестан. // *Научный альманах*. – 2017. – № 6. – С. 425–428. DOI: 10.17117/na.2017.06.01.425.
4. Бурдиева 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. – Т. 13. № 4. – С. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010.
5. Веденин Ю.А. Динамика территориальных рекреационных систем. М.: Наука, 1982. – 190 с.
6. Забураева Х.Ш. История рекреационного природопользования на Северо-Восточном Кавказе. // *Вестник Академии наук Чеченской Республики*. – 2023. – № 1 (60). – С. 86–92. DOI: 10.25744/vestnik.2023.60.1.011.
7. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Геологический и этнокультурный туризм: перспективы сопряженного развития на Северо-Восточном Кавказе. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023а. – Т. 13. № 2. – С. 149–160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012.
8. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Оценка туристско-рекреационного потенциала регионов Северо-Восточного Кавказа. // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. – 2023б. – Т. 8. № 4. Вып. 34. – С. 32–38. DOI: 10.25744/genb.2023.62.4.006.

9. Зеленцов М.В., Старковская Е.О., Астанин Д.М. Эколого-ориентированное районирование горных туристских территорий: статика, структура, плотность и динамика. // Современное строительство и архитектура. – 2021. – № 3. – С. 26–32. DOI: 10.18454/мса.2021.23.3.
10. Зырянов А.И., Гудковских М.В. Природная зональность как принцип туристского районирования. // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2020. – Т. 30. № 3. – С. 332–339. DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-3-332-339.
11. Исаченко Т.Е. Подходы к оценке пространственной организации рекреации и туризма на различных территориальных уровнях. // Известия Русского географического общества. – 2022. – Т. 154. № 3. – С. 47–65. DOI: 10.31857/S086960712203003X.
12. Кропинова Е.Г., Митрофанова А.В. Актуализация подходов к районированию и зонированию туристских территорий для целей пространственного планирования и проектирования туристской деятельности. // Географический вестник. – 2022. – № 4. Вып. 63. – С. 135–148. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-4-135-148.
13. Крыстев В.К. Туристское районирование: дискурс о методе. // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2019. – № 5. – С. 50–59.
14. Мироненко Н.С., Твердохлебов И.Т. Рекреационная география. М.: Изд. Московского университета, – 1981. 207 с.
15. Нефедова В.Б., Смирнова Е.Д., Упит И.А., Швидченко Л.Г. Методы рекреационного районирования. // Вопросы географии. Сб. 93. География и туризм. М.: Мысль, – 1973. С. 51–61.
16. Саранча М.А. Теоретико-методологические проблемы рекреационного районирования на примере Удмуртской республики. // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2008. – № 2. – С. 61–72.
17. Федорова С.Н. Подходы к рекреационному районированию в современных условиях. // Вестник Поволжского государственного университета сервиса. Серия: Экономика. – 2014. – № 1. Вып. 33. – С. 81–85.
18. Худякова Т.М., Крутских О.А., Рязанцев А.С. Теоретические и методические вопросы рекреационного районирования регионов России. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2021. – № 2. – С. 55–60. DOI: 10.17308/geo.2021.2/3448.
19. Blasco D., Guia J., Prats L. Tourism destination zoning in mountain regions: a consumer-based approach. // Tourism Geographies. – 2014. – Vol. 16. Issue 3. – pp. 512–528. DOI: 10.1080/14616688.2013.851267.
20. Caglayan İ., Yeşil A., Cieszewski C., Gül F.K., Kabak Ö. Mapping of recreation suitability in the Belgrad Forest Stands. // Applied Geography. – 2020. – Vol. 116. 102153. DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102153.
21. Casari M. Geografia e turismo. Elementi per un approccio sistemico sostenibile. Milano: Hoepli, – 2008. 242 p.
22. Ghasemi M., González-García A., Charray Z., Serrao-Neumann S. Utilizing supply-demand bundles in Nature-based Recreation offers insights into specific strategies for sustainable tourism management. // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 922. Art. No. 171185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171185.
23. Hermes J., Albert C., von Haaren C. Assessing the aesthetic quality of landscapes in Germany. // Ecosystem Services. – 2018a. – Vol. 31. – pp. 296–307. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.02.015.
24. Hermes J., Van Berkel D., Burkhard B., Plieninger T., Fagerholm N., Haaren C.V., Albert Ch. Assessment and valuation of recreational ecosystem services of landscapes. // Ecosystem Services. – 2018b. – Vol. 31. – pp. 289–295. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.04.011.
25. Hou Y., Zhao W., Hua T., Pereira P. Mapping and assessment of recreation services in Qinghai-Tibet Plateau. // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 838. Art. No. 156432. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156432.

26. Kalinauskas M., Mikša K., Inácio M., Gomes E., Pereira P. Mapping and assessment of landscape aesthetic quality in Lithuania. // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – Vol. 286. Art. No. 112239. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112239.
27. Li L., Feng R., Hou G., Xi J., Gao P., Jiang X. Integrating tourism supply-demand and environmental sensitivity into the tourism network identification of ecological functional zone. // *Ecological Indicators*. – 2024. – Vol. 158. Art. No. 111505. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111505.
28. Lukoseviciute G., Pereira L.N., Panagopoulos T. The economic impact of recreational trails: a systematic literature review. // *Journal of Ecotourism*. – 2022. – Vol. 21. Issue 4. – pp. 366–393. DOI: 10.1080/14724049.2022.2030745.
29. Mandić A., Mrnjavac Ž., Kordić L. Tourism Infrastructure, Recreational Facilities and Tourism Development. // *Tourism and Hospitality Management*. – 2018. – Vol. 24 No. 1. – pp. 41–62. DOI: 10.20867/thm.24.1.12.
30. Mason P. Zoning, land-use planning and tourism. / Eds. Andrew Holden, David Fennell. London: Routledge, 2012. – 624 p.
31. Paracchini M.L., Zulian G., Kopperoinen L., Maes J. et al. Mapping cultural ecosystem services: A framework to assess the potential for outdoor recreation across the EU. // *Ecological Indicators*. – 2014. – Vol. 45. – pp. 371–385. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.04.018.
32. Seyfi S., Hall C.M., Rasoolimanesh S.M. Exploring memorable cultural tourism experiences. // *Journal of Heritage Tourism*. – 2019. – Vol. 15. No. 3. – pp. 1–17. DOI: 10.1080/1743873X.2019.1639717.
33. Shishito M., Lescura C., Carvalho A.N.de, Knupp M.E.C.G. Image of tourist destination: review and analysis of articles published in Brazil. // *Service and tourism: current challenges*. – 2022. – Vol. 16. No. 3. – pp. 71–85. DOI: 10.5281/zenodo.7423298.

## References

1. Agakishieva G.R. Zoning of the mountain regions of Azerbaijan for tourism and recreation: the case of Sheki-Zagatala, Guba-Khachmaz and Mountain-Shirvan economic and geographical regions. *Modern problems of service and tourism*. 2023. Vol. 17. No. 1. pp. 113–121. DOI: 10.5281/zenodo.7988118 (In Russ.)
2. Ataev Z.V., Payzullaeva G.P. Recreational potential of natural areas of the Republic of Dagestan: assessment and prospects of use. *Makhachkala. Alef*. 2014. 160 p. (In Russ.)
3. Bolshanyk P.V., Ramazanov R.G. Tourist zoning of the republic of Dagestan. *Science Almanac*. 2017. No. 6. pp. 425–428. DOI: 10.17117/na.2017.06.01.425 (In Russ.)
4. 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. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010 (In Russ.)
5. Vedenin Yu.A. The dynamics of territorial recreational systems. Moscow. Nauka. 1982. 190 p. (In Russ.)
6. Zaburaeva Kh.Sh. History of recreational nature management in the North-Eastern Caucasus. *Bulletin of the Academy of Sciences of Chechen Republic*. 2023. No. 1 (60). pp. 86–92. DOI: 10.25744/vestnik.2023.60.1.011 (In Russ.)
7. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Geological and ethnocultural tourism: prospects for interrelated development in the North-Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 149–160. DOI: 10.46698/VNC.2023.14.67.012 (In Russ.)
8. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Assessment of tourist and recreational potential of the regions of the North-Eastern Caucasus. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2023. Vol. 8. Issue 34. pp. 32–38. DOI: 10.25744/genb.2023.62.4.006 (In Russ.)
9. Zelentsov M.V., Starkovskaya E.O., Astanin D.M. Eco-oriented zoning for mountain tourist areas: statics, structure, density and dynamics. *Modern construction and architecture*. 2021. No. 3. pp. 26–32. DOI: 10.18454/mca.2021.23.3 (In Russ.)

10. Zyryanov A.I., Gudkovskikh M.V. Natural zonality as a principle of tourist regionalization. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2020. Vol. 30. No. 3. pp. 332–339. DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-3-332-339 (In Russ.)
11. Isachenko T.E. Approaches to Assessing the Spatial Organization of Recreation and Tourism at various territorial levels. *Bulletin of the Russian Geographical Society*. 2022. Vol. 154. No. 3. pp. 47–65. DOI: 10.31857/S086960712203003X (In Russ.)
12. Kropinova E.G., Mitrofanova A.V. Updated approaches to zoning and division into tourist districts for the purposes of spatial planning and design of tourist activities. *Geographical Bulletin*. 2022. No. 4. Issue 63. pp. 135–148. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-4-135-148 (In Russ.)
13. Krystev V.K. Touristic zoning: discourse on the method. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*. 2019. No. 5. pp. 50–59. (In Russ.)
14. Mironenko N.S., Tverdokhlebov I.T. *Recreational Geography*. Moscow. Moscow University Press. 1981. 207 p. (In Russ.)
15. Nefedova V.B., Smirnova E.D., Upit I.A., Shvidchenko L.G. Methods of recreational zoning. *Issues of geography. Collection 93. Geography and tourism*. Moscow. Mysl. 1973. pp. 51–61. (In Russ.)
16. Sarancha M.A. Theoretical and Methodological Issues of Recreational Division into Districts (exemplified with the Udmurt Republic). *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2008. No. 2. pp. 61–72. (In Russ.)
17. Fedorova S.N. Approaches to recreational zoning in current conditions. *Bulletin of the Volga State University of Service. Series: Economy*. 2014. No. 1. Issue 33. pp. 81–85. (In Russ.)
18. Khudyakova T.M., Krutskikh O.A., Ryazantsev A.S. Theoretical and methodological issues of recreational zoning of Russian regions. In: *Proceedings of Voronezh state university. Series: Geography. Geoecology*. 2021. No. 2. pp. 55–60. DOI: 10.17308/geo.2021.2/3448 (In Russ.)
19. Blasco D., Guia J., Prats L. Tourism destination zoning in mountain regions: a consumer-based approach. *Tourism Geographies*. 2014. Vol. 16. Issue 3. pp. 512–528. DOI: 10.1080/14616688.2013.851267.
20. Caglayan İ., Yeşil A., Cieszewski C., Gül F.K., Kabak Ö. Mapping of recreation suitability in the Belgrad Forest Stands. *Applied Geography*. 2020. Vol. 116. 102153. DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102153.
21. Casari M. *Geografia e turismo. Elementi per un approccio sistemico sostenibile*. Milano. Hoepli. 2008. 242 p.
22. Ghasemi M., González-García A., Charrahy Z., Serrao-Neumann S. Utilizing supply-demand bundles in Nature-based Recreation offers insights into specific strategies for sustainable tourism management. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 922. Art. No. 171185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171185.
23. Hermes J., Albert C., von Haaren C. Assessing the aesthetic quality of landscapes in Germany. *Ecosystem Services*. 2018a. Vol. 31. pp. 296–307. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.02.015.
24. Hermes J., Van Berkel D., Burkhard B., Plieninger T., Fagerholm N., Haaren C.V., Albert Ch. Assessment and valuation of recreational ecosystem services of landscapes. *Ecosystem Services*. 2018b. Vol. 31. pp. 289–295. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.04.011.
25. Hou Y., Zhao W., Hua T., Pereira P. Mapping and assessment of recreation services in Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 838. Art. No. 156432. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156432.
26. Kalinauskas M., Mikša K., Inácio M., Gomes E., Pereira P. Mapping and assessment of landscape aesthetic quality in Lithuania. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 286. Art. No. 112239. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112239.
27. Li L., Feng R., Hou G., Xi J., Gao P., Jiang X. Integrating tourism supply-demand and environmental sensitivity into the tourism network identification of ecological functional zone. *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 158. Art. No. 111505. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111505.

28. Lukoseviciute G., Pereira L.N., Panagopoulos T. The economic impact of recreational trails: a systematic literature review. *Journal of Ecotourism*. 2022. Vol. 21. Issue 4. pp. 366–393. DOI: 10.1080/14724049.2022.2030745.
29. Mandić A., Mrnjavac Ž., Kordić L. Tourism Infrastructure, Recreational Facilities and Tourism Development. *Tourism and Hospitality Management*. 2018. Vol. 24. No. 1. pp. 41–62. DOI: 10.20867/thm.24.1.12.
30. Mason P. Zoning, land-use planning and tourism. / Eds. Andrew Holden, David Fennell. London. Routledge. 2012. 624 p.
31. Paracchini M.L., Zulian G., Kopperoinen L., Maes J. et al. Mapping cultural ecosystem services: A framework to assess the potential for outdoor recreation across the EU. *Ecological Indicators*. 2014. Vol. 45. pp. 371–385. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.04.018.
32. Seyfi S., Hall C.M., Rasoolimanesh S.M. Exploring memorable cultural tourism experiences. *Journal of Heritage Tourism*. 2019. Vol. 15. No. 3. pp. 1–17. DOI: 10.1080/1743873X.2019.1639717.
33. Shishito M., Lescura C., Carvalho A.N.de, Knupp M.E.C.G. Image of tourist destination: review and analysis of articles published in Brazil. *Service and tourism: current challenges*. 2022. Vol. 16. No. 3. pp. 71–85. DOI: 10.5281/zenodo.7423298.

УДК 556

DOI: 10.46698/o8018-1168-4921-I

Оригинальная статья

## Оценка качества и степени защищённости подземных вод г. Владикавказа

Е.А. Зубков<sup>1,2</sup>, Р.Р. Гогичев<sup>1</sup>, Тигиева З.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а;

<sup>2</sup> Институт водных проблем Российской академии наук,  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3, e-mail: nauka-geo@mail.ru

Статья поступила: 02.04.2024, доработана: 30.05.2024, принята к публикации: 31.05.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В статье представлены результаты комплексных исследований используемых для питьевых целей подземных вод Промышленного района г. Владикавказа, где имеется опасность их техногенного загрязнения в процессе инфильтрации загрязняющих веществ с отвалов предприятия «Электроцинк», а также в результате постоянного увеличения их водоотбора. Полученные в ходе работы данные дадут научно обоснованные предпосылки для разработки фактических рекомендаций, направленных на сохранение естественного качества подземных вод при угрозе внешнего загрязнения. **Целью работы** является получение информации по качеству и степени защищённости подземных вод водозаборных сооружений г. Владикавказа: Заводской участок, участок «Северный», ООО «Дарьял» и ООО «Агрофирма Фат». **Методы.** Исследованы такие параметры гидрохимического состава подземных вод, как общая минерализация, жесткость, водородный показатель, перманганатная окисляемость (ХПК), содержание главных ионов, фтора, нитратов, марганца, железа общего, алюминия, стронция и хрома. Выявлены особенности химического состава и проведена общая оценка качества подземных вод, а также получены данные для определения степени защищённости эксплуатируемого водоносного горизонта от внешних источников загрязнения. **Результат работы.** С 2000-х гг. наблюдается увеличение минерализации, содержания хлорид-ионов и нитрат-ионов, показателя жесткости подземных вод, который в несколько раз превысил нормативы ПДК, что свидетельствует о техногенном влиянии на подземную гидросферу, в результате чего происходит частичное ухудшение качества отбираемой воды. Другие исследуемые компоненты содержатся в подземных водах в допустимых количествах. Как показал анализ имеющихся гидрохимических данных, несмотря на повышенные показатели жесткости, подземные воды характеризуются как условно чистые (1-я категория качества), по степени устойчивости к техногенному воздействию – устойчивое состояние. По степени защищённости, подземные воды эксплуатируемого Акчагыл-Апшеронского водоносного комплекса на территории Промышленного района г. Владикавказа, могут рассматриваться как защищенные (V категория защищённости по В. М. Гольдбергу).

**Ключевые слова:** качество и защищённость подземных вод, водозаборные сооружения, горно-перерабатывающая промышленность, техногенное влияние, гидрохимический состав, Промышленный район г. Владикавказа.

**Для цитирования:** Зубков Е.А., Гогичев Р.Р., Тигиева З.В. Оценка качества и степени защищённости подземных вод г. Владикавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 163-173. DOI: 10.46698/o8018-1168-4921-I

DOI: 10.46698/o8018-1168-4921-I

Original paper

## Assessment of quality and degree of protection for groundwater in Vladikavkaz city

E.A. Zubkov<sup>1,2</sup>, R.R. Gogichev<sup>1</sup>, Tigieva Z.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation;

<sup>2</sup> Water problems Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina Str., Moscow 119333, Russian Federation, e-mail: nauka-geo@mail.ru

Received: 02.04.2024, revised: 30.05.2024, accepted: 31.05.2024

**Abstract: Relevance.** The article presents the results of complex research of groundwater used for drinking purposes in the Promyshlenniy area of Vladikavkaz, where there is a danger of their anthropogenic pollution in the process of infiltration of pollutants from the dumps of the enterprise “Electrozinc”, as well as a constant increase in their water withdrawal. The data obtained in the course of the work will give scientifically grounded prerequisites for the development of actual recommendations aimed at preserving the natural quality of groundwater from external pollution. **Aim** of the work is to obtain information on the quality and degree of protection for groundwater of water intake facilities of Vladikavkaz: Zavodskoy site, site “Severny”, “Daryal” and “Agrofirma Fat”. **Methods.** Such parameters of hydrochemical composition of groundwater as total mineralization, hardness, hydrogen index, permanganate oxidizability (COD), content of major ions, fluorine, nitrates, manganese, total iron, aluminium, strontium and chromium were investigated. Peculiarities of chemical composition were identified and general assessment of groundwater quality was carried out, and data were obtained to determine the degree of protection of the exploited aquifer from external sources of pollution. **Result.** Since the 2000 s, there has been an increase in mineralisation, chloride ions and nitrate ions content, groundwater hardness index, which exceeded MAC standards several times, which indicates the technogenic impact on the underground hydro-sphere, resulting in partial deterioration of the quality of the withdrawn water. Other investigated components are contained in groundwater in permissible quantities. As the analysis of available hydrochemical data has shown, in spite of increased hardness indicators, groundwater is characterised as conditionally clean (1st quality category), in terms of resistance to anthropogenic impact – steady state. According to the degree of protection, groundwater of the exploited Akchagyl-Apsheron aquifer complex in the Promyshlenniy area of Vladikavkaz can be considered as protected (V category of protection according to V.M. Goldberg).

**Keywords:** groundwater quality and protection, water intake facilities, mining and processing industry, technogenic impact, hydrochemical composition, the Promyshlenniy area of Vladikavkaz.

**For citation:** Zubkov E.A., Gogichev R.R., Tigieva Z.V. Assessment of quality and degree of protection for groundwater in Vladikavkaz city. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 163-173. DOI: 10.46698/o8018-1168-4921-I

### Введение

В настоящее время проблема разрушения и восстановления природных и техногенных ландшафтов в районах деятельности предприятий горно-перерабатывающей промышленности остаётся актуальной как в мировом масштабе, так и в России. Изучение закономерностей воздействия техногенных факторов на окружающую среду имеет не только научное, но и практическое значение. Для горно-промышленных районов характерны ухудшение качества как поверхностных, так

и подземных вод, и существенные изменения гидродинамической и гидрохимической обстановки, приводящие к нарушению гидроэкологического равновесия территорий и распространению ареалов техногенного загрязнения. Особое значение приобретают исследования подверженности подземных вод горных ландшафтов различным техногенным воздействиям на территории республики Северная Осетия-Алания, где подземные воды являются единственным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения населения. Занимая одну из наименьших территорий среди республик Северного Кавказа, Северная Осетия является крупнейшим промышленным и транспортным регионом. Добыча цветных металлов в данном регионе имеет более чем 200-летнюю историю. Здесь находятся старейшие на Северном Кавказе предприятия горно-добывающей промышленности и цветной металлургии [Закруткин, 2002]. На территории республики расположено значительное количество отвалов предприятий переработки руд, оставленных и заброшенных рудников и шахт с многочисленными воронками провалов и отвалами пустых пород на террасных участках и в долинах горных рек. Заметное влияние на изменение регионального гидрохимического и гидродинамического баланса подземных вод имеет всевозрастающая их добыча из Акчагыл-Апшеронского водоносного комплекса Осетинского артезианского бассейна. Такое изменение иногда может быть столь выражено, что воды становятся непригодными или малопригодными для использования [Плотников, Алексеев, 1990]. Особенности глубинного строения региона обуславливают активные геодинамические движения, что еще больше осложняет ситуацию [Shempelev et al., 2017]. Поэтому проблема оценки защищенности эксплуатируемых подземных вод республики от истощения и загрязнения становится все актуальнее. Вместе с тем подземные воды выступают в роли источника и переносчика загрязнения поверхностных вод, обуславливая снижение качества последних [Katz et al., 1997]. К сожалению, такой важный аспект, как массоперенос загрязняющих веществ потоком подземных вод, как правило, не учитывается при оценке и прогнозе экологического состояния водоемов и прибрежных областей [Bartsev et al., 2016].

В черте г. Владикавказа значительные объемы отходов горно-перерабатывающей промышленности сконцентрированы на территории завода «Электроцинк». Загрязнение окружающей среды, вызванное заводом, является самой большой экологической проблемой в регионе [Khapsaeva, 2020]. В результате работы цинкового производства за более чем 100 лет на полигонах предприятия скопилось более 2 миллионов тонн отвального клинкера. Этот процесс можно сравнить с формированием техногенного месторождения. По данным [Магометов и др., 2010] технологические процессы на предприятии сопровождаются выбросами вредных веществ 31 наименования. Поэтому в природных водах могут содержаться соли жесткости, ионы тяжелых металлов и другие токсичные вещества [Shaheen et al., 2019]. В настоящее время, встающие вопросы эффективного и целесообразного, с эколого-экономической точки зрения, способа ликвидации накопленного экологического вреда в районах деятельности рудоперерабатывающих предприятий, остаются нерешенными [Kuznetsov, Petrov, 2017; Matveeva et al., 2019]. Ранее проведенные многолетние исследования подтвердили возможность негативного влияния техногенных отвалов предприятия «Электроцинк» и увеличения водоотбора на качество подземных вод в этом районе [Джгамадзе, Заалишвили, 2010; Пашенко, 2014; Гогичев, Дзеранов, 2017; Дзеранов и др., 2017; Зубков и др., 2023].

## Район работ, материалы и методы

Исследуемый водоносный горизонт относится к Акчагыл-Апшеронскому водоносному комплексу напорных вод, приуроченному к терригенным отложениям свиты рухсдзуар Осетинского артезианского бассейна. Комплекс представлен переслаиванием гравийно-галечников и конгломератов с песчанистыми глинами. Пьезометрическая поверхность водоносного комплекса устанавливается на глубине 106 м ниже поверхности.

В соответствии с принятым гидрогеологическим районированием Осетинская наклонная равнина (Владикавказская котловина) расположена на территории Крымско-Кавказской провинции сложных бассейнов пластово-блоковых, жильно-блоковых подземных вод, являющейся структурой I порядка [Заалишвили и др., 2013, 2016; Музаев и др., 2016]. Ресурсы подземных вод формируются в областях выходов водопроницаемых пород на дневную поверхность. Общее направление движения подземных вод совпадает с направлением течения реки Терек. Часть подземного стока из четвертичных отложений надпойменных террас разгружается в реку Терек в виде многочисленных родников [Магометов и др., 2010].

Для определения воздействия накопленных отвалов клинкера предприятия «Электроцинк» на подземные воды г. Владикавказа в качестве основного реперного участка исследований выбран Заводской участок подземных вод. Водозабор располагается на восточной окраине п. Заводского Промышленного муниципального округа г. Владикавказа в 4 км ниже по направлению движения подземных вод от промышленной площадки предприятия ОАО «Электроцинк». Также проанализированы данные химических анализов подземных вод по водозаборам: участок «Северный», ООО «Дарьял», Агрофирма «ФАТ».

На начальном этапе работ выполнен сбор опубликованных и фондовых материалов по объекту исследования в ФГУ «Территориальные фонды геологической информации» и других организациях. Анализ и систематизации подлежали все первичные по изучаемой территории данные, взятые из паспортов буровых скважин, журналов отбора проб, геологических отчетов.

Исследованы такие параметры гидрохимического состава подземных вод, как общая минерализация, жесткость, водородный показатель, перманганатная окисляемость (ХПК), содержание главных ионов, фтора, нитратов, марганца, железа общего, алюминия, стронция и хрома. В связи с тем, что подземные воды республики повсеместно используются в питьевых и хозяйственно-бытовых целях, оценка качества выполнена с применением соответствующих нормативов ПДК согласно Постановлению Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (вместе с «СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные правила и нормы...»).

Для определения степени трансформации гидрохимического состава подземных вод важным является определение степени защищенности водоносного горизонта от внешних загрязнителей, поступающих с поверхности и верхних грунтовых горизонтов. Оценка степени естественной защищенности водоносного горизонта подземных вод северной части г. Владикавказа проводилась по методике В.М. Гольдберга. Данная методика позволяет дать качественную оценку защищенности подземных вод какого-либо региона без учета характеристик техногенных факторов и

физико-химических свойств конкретных загрязнителей. Защищенность подземных вод выражается в баллах, отражающих условия залегания вод, мощности слабопроницаемых отложений и их литологический состав. По сумме баллов выделяют шесть категорий защищенности: I – 0-56, II – 5-106, III – 10-156, IV – 15-206, V – 20-256, VI – >256. Наименьшей защищенностью характеризуются условия, соответствующие категории I, наибольшей – категории VI [Гольдберг, 1987].

### Результаты и обсуждение

Среднемноголетняя минерализация подземных вод Заводского водозабора с 1976 по 2008 гг. составляла около 300 мг/дм<sup>3</sup> и, как правило, не превышала 400 мг/дм<sup>3</sup>, однако с 2008 г. наблюдается значительное увеличение показателя минерализации до 700–1000 мг/дм<sup>3</sup>; на участках водозаборов «Северный» и «Дарьял» минерализация подземных вод составляет 600–800 мг/дм<sup>3</sup>, на участке Агрофирма «ФАТ» превышает нормативные значения ПДК в 1,4–1,5 раза.

Значения показателей рН и окисляемости перманганатной (ХПК), допустимых норм содержания ионов NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup> не превышают норму за весь исследованный период. Режимные наблюдения показали, что амплитуда колебания ионов NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в подземных водах Заводского водозабора до 2003 г. варьирует в пределах 1–3 мг/дм<sup>3</sup>. С 2003–2004 гг. наблюдается скачкообразное увеличение концентрации ионов NO<sub>3</sub><sup>-</sup> с амплитудами до 20 мг/дм<sup>3</sup>. На протяжении всего периода наблюдений фиксируется постоянное увеличение концентрации ионов Cl<sup>-</sup> с 10 до 70 мг/дм<sup>3</sup> с наиболее выраженными пиками с 2008 г. Многолетняя амплитуда колебания содержания ионов NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup> соответствует изменениям показателя общей минерализации, что может свидетельствовать о нарушении геологической обстановки в районе проведения исследований, приведшем к существенному изменению гидрогеохимического баланса подземных вод на данной территории. Концентрации ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, а также суммарно Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> соответствуют нормам. ПДК ионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup> нормативом СанПиН 1.2.3685-21 не установлены. Концентрация ионов Mn<sup>2+</sup> и F<sup>-</sup> находится в пределах допустимых для питьевых вод норм. С конца 1990-х гг. наблюдается снижение содержания фтора в подземных водах с 0,5–0,9 мг/дм<sup>3</sup> до 0,1–0,2 мг/дм<sup>3</sup>. В подземных водах исследованных водозаборов содержания алюминия, стронция, а также хрома, за исключением подземных вод на участке водозабора агрофирмы «ФАТ» (1,2–1,8 ПДК), не превышают норм СанПиН 1.2.3685-21. Превышение содержания железа общего (1,0–2,1 ПДК) отмечено на водозаборах ООО «Дарьял», участок «Северный», Агрофирма «ФАТ».

В работах [Пашенко, 2014; Гогичев, Дзеранов, 2017] отмечено заметное увеличение жесткости подземных вод в северной (промышленной) части города Владикавказа. В северо-восточной части Владикавказа до середины 80-х годов XX века качество подземных вод соответствовало стандартам питьевой воды. Жесткость воды составляла 4–6 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Однако с 2008 года наблюдается значительное увеличение общей жесткости воды с 4–7 до 12–19 мг-экв/дм<sup>3</sup>. В других частях г. Владикавказа таких резких изменений качества подземных вод не отмечалось [Гогичев, Дзеранов, 2017; Зубков и др., 2023].

Ионный состав подземных вод в северной части Владикавказа разнообразен. Для наглядной иллюстрации гидрохимического типа вод и уровня минерализации используется формула Курлова. По характеру минерализации подземные воды можно подразделить на следующие основные типы: сульфатно-гидрокарбонатный,

гидрокарбонатно-сульфатный и гидрокарбонатный тип кальциевого катионного состава [Зубков и др., 2023] (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Гидрохимический тип подземных вод исследованных водозаборов на территории г. Владикавказа / Hydrochemical type of groundwater of the studied water intakes on the territory of Vladikavkaz**

Водозабор / Water intake	Псевдоформула Курлова / Kurlov 's formula	Гидрохимический тип подземных вод / Hydrochemical type of groundwater
Заводской участок / Zavodskoy site	$M_{0,8} = \frac{(HCO_3)_{33}(SO_4)_{14}(Cl)_{6,5}}{(Ca)_{38,3}(Mg)_{6,9}(Na + K)_{5,8}}$	Сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый / Sulfate-bicarbonate calcium
Участок «Северный» / site «Severny»	$M_{0,6} = \frac{(HCO_3)_{38,4}(SO_4)_{6,2}(Cl)_{3,8}}{(Ca)_{37,7}(Mg)_{11}(Na + K)_3}$	Гидрокарбонатный кальциевый / Calcium Bicarbonate
ООО «Дарьял» / LLC «Daryal»	$M_{0,7} = \frac{(HCO_3)_{23,6}(SO_4)_{20,6}(Cl)_{4,9}}{(Ca)_{38,3}(Mg)_{6,9}(Na + K)_{5,7}}$	Сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый / Sulfate-bicarbonate calcium
ООО Агрофирма «ФАТ» / LLC Agrofirma «FAT»	$M_{1,4} = \frac{(SO_4)_{23,5}(HCO_3)_{19,4}(Cl)_{6,2}}{(Ca)_{38,3}(Mg)_{6,9}(Na + K)_{5,8}}$	Гидрокарбонатно-сульфатный кальциевый / Bicarbonate-sulfate calcium

Анионная часть подземных вод в большинстве случаев характеризуется преобладанием гидрокарбонат-ионов ( $HCO_3^-$ ), что является типичным для данного региона. Следующее место по распространённости принадлежит сульфат-ионам ( $SO_4^{2-}$ ). Наибольшие содержания сульфатов обнаружены в подземных водах водозаборных сооружений Агрофирмы «ФАТ». Среди катионов, во всех наблюдаемых точках, преобладает  $Ca^{2+}$ , средние содержания которого превосходят соответствующие количества  $Mg^{2+}$  в 6–9 раз.

Для интегральной оценки качества подземных вод применялась методика, описанная в работах [Белоусова, 2001; Склярченко, Закруткин, 2019]. Она основана на расчёте суммарного коэффициента загрязнения вод исследуемых участков (СКЗ) по формуле:  $СКЗ = \sum Ci/ПДК_i$ , где  $C_i$  – концентрация загрязняющего вещества, а  $ПДК_i$  – предельно допустимая концентрация этого вещества.

Кроме того, в соответствии с данной методикой, классификация степени загрязнения воды может быть переведена в классификацию гидрохимической устойчивости [Белоусова, 2001], что позволяет оценить внутренне присущую системе (подземным водам) способность противостоять техногенным воздействиям.

Как показал анализ имеющихся гидрохимических данных, несмотря на повышенные показатели жесткости, подземные воды всех исследованных водозаборов характеризуются как условно чистые (1-я категория качества), по степени устойчивости – устойчивое состояние [Зубков и др., 2023].

Взаимосвязь подземной части гидросферы и других компонентов окружающей среды и возможность ее загрязнения через них характеризуется степенью защищенности подземных вод от загрязнения [Белоусова и др., 2014]. В силу природных факторов фильтрация загрязняющих веществ с поверхности земли в подземные воды возможна практически всегда. Поэтому подземные воды, как правило, характеризуются невысокой степенью защищенности. Данные лабораторных ис-

следований подземных вод водозаборов, расположенных вблизи отвалов предприятия «Электроцинк» и в направлении движения потока подземных вод, указывают на изменение гидрогеохимической ситуации по ряду макро- и микроэлементов с конца 1990-х годов и начала 2000-х годов.

Защищённость подземных вод определяется природными, техногенными и физико-химическими факторами. Основные из них – это природные факторы, такие как глубина залегания подземных вод, фильтрационные характеристики пород зоны аэрации и наличие слабопроницаемых, трещиноватых пород в разрезе. Качественная оценка условий защищенности подземных вод в общем случае дается на основе четырех показателей зоны аэрации: глубины залегания уровня подземных вод; строения и литологии пород; мощности слабопроницаемых отложений в разрезе; фильтрационных свойств пород и прежде всего слабопроницаемых отложений [Гольдберг, 1987].

По материалам (Отчет о результатах разведки Заводского участка (г. Владикавказ) с подсчетом запасов пресных подземных вод по состоянию на 01.04.2013 г. Исполнитель: ООО «Гидро-плюс», г. Владикавказ, 2013. 96 с.) для определения степени защищенности подземных вод от загрязнения приняты следующие усредненные гидрогеологические параметры эксплуатационного водоносного горизонта по участкам Агрофирма «ФАТ» и Заводского водозабора: мощность зоны аэрации – 114 м (5 баллов), мощность слабопроницаемых пород в зоне аэрации – 40 м, литологический тип пород – б (18 баллов). Основными водовмещающими породами являются: валунно-галечниковые отложения с песчаным и глинистым заполнителем, с прослоями конгломератов, глин песчанистых и глин плотных (рис. 1).

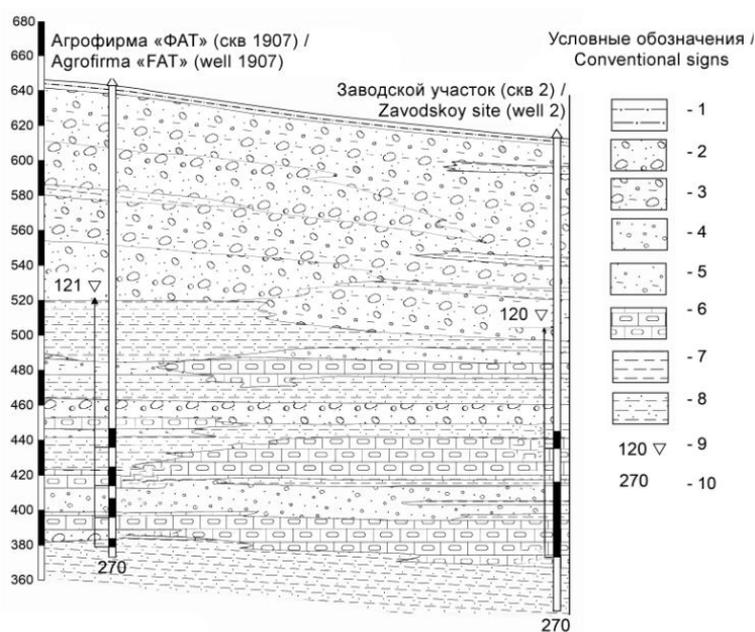


Рис. 1. Геолого-гидрогеологический разрез по линии «Заводской водозабор – Агрофирма «ФАТ»:  
1 – суглинок; 2 – валунно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем; 3 – валунно-галечниковые отложения с песчано-глинистым заполнителем; 4 – гравийно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем; 5 – гравийно-галечниковые отложения с песчано-глинистым заполнителем; 6 – конгломераты; 7 – глина плотная; 8 – глина песчанистая; 9 – пьезометрический уровень подземных вод, м; 10 – глубина скважины, м /

Fig. 1. Geological and hydrogeological section along the line «Zavodskoy vodozabor – Agrofirma «FAT»:  
1 – loam; 2 – boulder-pebble deposits with sandy aggregate; 3 – boulder-pebble deposits with sand-clay aggregate; 4 – gravel-pebble deposits with sand aggregate; 5 – gravel-pebble deposits with sand-clay aggregate; 6 – conglomerates; 7 – dense clay; 8 – sandy clay; 9 – piezometric groundwater level, m; 10 – depth, m

Защищённым водоносным горизонтом считается тот, который набирает в сумме 10 баллов и более, то есть относится к III категории и выше по классификации В. М. Гольдберга. С учётом суммы баллов рассматриваемый водоносный горизонт можно отнести к V категории защищённости. Так как выполняется условие, что сумма баллов составляет не менее 10, этот водоносный горизонт можно считать защищённым.

### Выводы

Наиболее высокие концентрации химических компонентов, в том числе превышающие нормативы ПДК (железо общее, хром), характерны для подземных вод, добываемых на участке водозабора Агрофирмы «ФАТ», расположенном на расстоянии менее 2-х километров по направлению движения потока подземных вод от площадки складирования отвалов предприятия ОАО «Электроцинк».

Для РСО-Алания наибольшую опасность по загрязнённости подземных вод исследуемых водозаборов представляют соединения железа и хрома иона. В то же время качество подземных вод водоносного горизонта Промышленного района г. Владикавказа по основным показателям содержания макро- и микрокомпонентов отвечает требованиям СанПиН 1.2.3685-21 к воде хозяйственно-питьевого назначения.

Таким образом, несмотря на повышенные показатели жесткости, подземные воды всех исследованных водозаборов характеризуются как условно чистые (1-я категория качества), по степени устойчивости – устойчивое состояние.

По степени защищённости, подземные воды эксплуатируемого Акчагыл-Апшеронского водоносного комплекса на территории Промышленного района г. Владикавказа, могут рассматриваться как защищённые (V категория защищённости по В.М. Гольдбергу).

На примере трансформации гидрохимического состава эксплуатируемых подземных вод на территории Промышленного района г. Владикавказа полученные результаты позволят усовершенствовать существующие модели деформации природной геологической среды, связанные с горнопромышленным освоением территорий, а также оптимизировать структуру и содержание природоохранных программ для реабилитации техногенно нарушенных экосистем в условиях постоянно меняющейся техногенной нагрузки.

### Литература

1. Белоусова А.П., Агеева И.В., Руденко Е.Э. Оценка защищённости подземных вод юга европейской части России. // Водные ресурсы. – 2014. – № 2. – С. 131–141.
2. Белоусова А.П. Качество подземных вод: Современные подходы к оценке. М.: Наука, 2001. – 339 с.
3. Гогичев Р.Р., Дзеранов Б.В. Изменение качественных характеристик подземных вод Осетинского артезианского бассейна. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 4. – С. 5–20. DOI: 10.23671/VNC.2017.4.9522.
4. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
5. Джгамадзе А. К., Заалишвили В. Б. Ухудшение качества подземных вод в связи с техногенным воздействием на территории г. Владикавказа. // Вестник МАНЭБ. – 2010. – Т. 15. № 4. – С. 26–31.

6. Дзеранов Б.В., Гогичев Р.Р., Джусоева Н.Г. Использование ГИС-технологий при оценке качества подземных вод республики Северная Осетия-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 3. – С. 40–56. DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9504.

7. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Гогичев Р.Р. Перспективы развития и использования глубинных гидротермальных и петротермальных очагов в горной части Северной Осетии. // Материалы II Международной научно-практической конференции «GEOENERGY». – 2016. – С. 116–130.

8. Заалишвили В.Б., Колесникова А.Ф., Джгамадзе А.К. Геолого-тектонические особенности Моздокской впадины Терско-Кумского прогиба и территории г. Моздока. // В сборнике: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. – 2013. – С. 133–139.

9. Закруткин В.Е. Геохимия ландшафта и техногенез. Ростов-на-Дону: Изд. СКНЦ ВШ, 2002. – 308 с.

10. Зубков Е.А., Бурдзиева О.Г., Гогичев Р.Р., Закс Т.В. // Геоэкологическая оценка качества грунтовых вод водозаборных сооружений г. Владикавказа. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. № 4(34). – С. 39–45.

11. Магомедов А.А., Макоев Х.Х., Кебалова Л.А., Топоркова Т.Н. Проблемы создания санитарно-защитной зоны в районе ОАО «Электроцинк» и ОАО «Победит». Владикавказ: СОГУ, 2010. – 106 с.

12. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическая модель, алгоритм и программа для проектирования селективных водозаборных систем. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2016. – № 1(186). – С. 84–90.

13. Пащенко А.А. Влияние добычи подземных вод из акчагыл-апшеронского водоносного комплекса Осетинского артезианского бассейна на их качество. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2014. – № 6. – С. 117–122.

14. Плотников Н.А., Алексеев В.С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.

15. Складенко Г.Ю., Закруткин В.Е. Подземные воды Ростовской области: факторы загрязнения и оценка качества. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2019. – № 4. – С. 98–103.

16. Khapsaeva D.V. Activity of Industrial Enterprises as a Social Risk Factor (on the Example of JSC Electrozin). // In: Proceedings of the International Session on Factors of Regional Extensive Development (FRED 2019). – 2020. – Vol. 113. – Irkutsk: Atlantis Press. 589 p.

17. Bartsev O.B., Nikanorov A.M., Zubkov E.A., Gar'kusha D.N. Assessment of groundwater impact on water quality in the built-up areas at the Lower Don Russian. // Meteorology and Hydrology. – 2016. – Vol. 41. No. 7. – pp. 504–512.

18. Katz B.G., DeHan R.S., Hirten J.J., Catches J.S. Interactions between groundwater and surface water in the Suwannee river basin, Florida. // Journal of the American water resources association. – 1997. – Vol. 33. No. 6. – pp. 1237–1254.

19. Kuznetsov V.S., Petrov D.S. Assessing the Environmental Condition of Minor Rivers in Urban Areas. // Journal of Ecological Engineering. – 2017. – Vol. 18. Issue 6 – pp. 110–114. DOI: 10.12911/22998993/7622117.

20. Matveeva V.A., Chukaeva M.A., Sverchkov I.P. Low-cost sorption technologies for large-tonnage wastewater treatment in mining industries. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1384. 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012028.

21. Shaheen F.A., Raed H., Nidal H. Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review. // Desalination. – 2019. Vol. 452. – pp. 159–195.

22. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Kukhmazov S.U. Deep Structure of the Western Part of the Central Caucasus from Geophysical Data. // Geotectonics. – 2017. – Vol. 51. No. 5. – pp. 479–488.

## References

1. Belousova A.P., Ageeva I.V., Rudenko E.E. Assessment of groundwater protection in the south of the European part of Russia. *Water Resources*. 2014. No. 2. pp. 131–141. (In Russ.)
2. Belousova A.P. Groundwater quality: Modern approaches to assessment. Moscow. Nauka. 2001. 339 p. (In Russ.)
3. Gogichev R.R., Dzeranov B.V. Changes in the quality characteristics of groundwater of the Ossetian artesian basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 4. pp. 5–20. DOI: 10.23671/VNC.2017.4.9522. (In Russ.)
4. Goldberg V.M. Interrelation of groundwater pollution and natural environment. Leningrad. *Gidrometeoizdat*. 1987. 248 p. (In Russ.)
5. Dzhgamadze A.K., Zaalishvili V.B. Deterioration of groundwater quality in connection with technogenic impact on the territory of Vladikavkaz. *Vestnik of IAELPS*. 2010. Vol. 15. No. 4. pp. 26–31. (In Russ.)
6. Dzeranov B.V., Gogichev R.R., Dzhuseeva N.G. Use of GIS-technologies in the assessment of groundwater quality in the Republic of North Ossetia-Alania. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 3. pp. 40–56. DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9504. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Chotchaev H.O., Burdzieva O.G., Gogichev R.R. Prospects for the development and use of deep hydrothermal and petrothermal sources in the mountainous part of North Ossetia. In: *Proceedings II International Scientific and practical Conference “GEOENERGY”*. 2016. pp. 116–130. (In Russ.)
8. Zaalishvili V.B., Kolesnikova A.F., Dzhgamadze A.K. Geological and tectonic features of the Mozdok depression of the Tersko-Kuma trough and the territory of Mozdok. In: *Proceedings of Seismic hazard and seismic risk management in the Caucasus*. 2013. pp. 133–139. (In Russ.)
9. Zakrutkin V.E. *Geochemistry of landscape and technogenesis*. Rostov-on-Don. SKNTs VS Publishing House. 2002. 308 p. (In Russ.)
10. Zubkov E.A., Burdzieva O.G., Gogichev R.R., Zaks T.V. Geocological assessment of groundwater quality of water intake structures of Vladikavkaz. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2023. Vol. 8. No. 4(34). pp. 39–45. (In Russ.)
11. Magometov A.A., Makoev Kh.Kh., Kebalova L.A., Toporkova T.N. Problems of creating a sanitary protection zone in the area of JSC “Electrozinc” and JSC “Pobedit”. *Vladikavkaz. NOSU*. 2010. 106 p. (In Russ.)
12. Muzayev I.D., Kharebov K.S., Muzayev N.I. Mathematical model, algorithm and program for the design of selective water intake systems. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*. 2016. No. 1(186). pp. 84–90. (In Russ.)
13. Pashchenko A.A. Impact of groundwater extraction from the Akchagyl-Apsheron aquifer complex of the Ossetian artesian basin on their quality. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*. 2014. No. 6. pp. 117–122. (In Russ.)
14. Plotnikov N.A., Alekseev V.S. *Design and operation of groundwater intakes*. Moscow. *Stroyizdat*. 1990. 256 p. (In Russ.)
15. Sklyarenko G.Yu., Zakrutkin V.E. Groundwater of Rostov region: pollution factors and quality assessment. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences*. 2019. No. 4. pp. 98–103. (In Russ.)
16. Khapsaeva D.V. Activity of Industrial Enterprises as a Social Risk Factor (on the Example of JSC ElectroZinc). In: *Proceedings of the International Session on Factors of Regional Extensive Development (FRED 2019)*. 2020. Vol. 113. Irkutsk. Atlantis Press. 589 p.
17. Bartsev O.B., Nikanorov A.M., Zubkov E.A., Gar’kusha D.N. Assessment of groundwater impact on water quality in the built-up areas at the Lower Don Russian. *Meteorology and Hydrology*. 2016. Vol. 41. No. 7. pp. 504–512.
18. Katz B.G., DeHan R.S., Hirten J.J., Catches J.S. Interactions between groundwater and surface water in the Suwannee River basin, Florida. *Journal of the American water resources association*. 1997. Vol. 33. No. 6. pp. 1237–1254.

19. Kuznetsov V.S., Petrov D.S. Assessing the Environmental Condition of Minor Rivers in Urban Areas. *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. Issue 6. pp. 110–114. DOI: 10.12911/22998993/7622117.

20. Matveeva V.A., Chukaeva M.A., Sverchkov I.P. Low-cost sorption technologies for large-tonnage wastewater treatment in mining industries. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1384. 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012028.

21. Shaheen F.A., Raed H., Nidal H. Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review. *Desalination*. 2019. Vol. 452. pp. 159–195.

22. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Kukhmazov S.U. Deep Structure of the Western Part of the Central Caucasus from Geophysical Data. *Geotectonics*. 2017. Vol. 51. No. 5. pp. 479–488.

УДК 911.2, 504.05, 551.582  
DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

Оригинальная статья

## Математическое моделирование аэродинамики идеализированных горных ущелий

Е.С. Каменецкий<sup>id</sup>, А.А. Радионов<sup>id</sup>

Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 53,  
e-mail: aar200772@mail.ru

Статья поступила: 04.06.2024, доработана: 06.09.2024, принята к публикации: 07.09.2024

**Резюме: Актуальность работы.** В горных территориях расположены хвостохранилища, в которых, часто открытым способом, содержатся «хвосты» – отходы деятельности горнодобывающих комбинатов, откуда в летнее время, при солнечном нагреве и заметном ветре в виде мелкой пыли хвосты попадают в атмосферу горных ущелий. Многофакторные течения воздуха и сложные закономерности аэродинамики горных ущелий обуславливают необходимость исследования каждого конкретного ущелья отдельно. Изучение горных ущелий идеализированной формы удобно использовать для подробного анализа атмосферных течений в практически важных прикладных задачах мониторинга аэродинамических характеристик и распространения ЗВ в реальных ущельях. **Методы.** При помощи математического моделирования рассматриваются трехмерные изотермические течения атмосферы в горном ущелье с идеализированной геометрической формой в виде прямоугольной каверны, ориентированной с юга на север. **Целью исследования** является изучение влияния отношения ширины горного ущелья к его высоте и сопоставление результатов модельных расчетов, полученных для Алагирского ущелья, РСО-Алания, РФ. **Результаты.** Показано, что при отношении ширины к его высоте большем трех горное ущелье относится к условно «широким». Анализ аэродинамических свойств Алагирского ущелья позволяет сделать вывод, что в точке нахождения Унальского хвостохранилища это ущелье соответствует широкому ущелью. Такой вывод можно сделать из соответствия роз ветров этих ущелий и из приблизительного соответствия нестационарных режимов течения по направлениям внешнего ветра. Для идеализированных ущелий разной ширины показаны розы ветров, характерные профили скорости ветра в поперечном сечении ущелья, частоты и амплитуды возникающих осцилляций при разных направлениях внешнего ветра, а также распределения концентрации примеси от источника, расположенного на дне ущелья, как маркера режимов течения. Знание закономерностей течения воздуха в идеализированных горных ущельях позволяет проводить более глубокий анализ аэродинамических режимов и основных свойств рассеяния загрязняющих веществ в реальных горных ущельях, а также осуществлять реалистичные прогнозы на основе идеализированных моделей.

**Ключевые слова:** горное ущелье, пыль, хвостохранилище, математическая модель, аэродинамика.

**Для цитирования:** Каменецкий Е.С., Радионов А.А. Математическое моделирование аэродинамики идеализированных горных ущелий. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 174-190. DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

Original paper

# Numerical study of the idealized mountain gorges atmosphere

E.S. Kamenetsky , A.A. Radionoff 

Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
53 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation,  
e-mail: aar200772@mail.ru

Received: 04.06.2024, revised: 06.09.2024, accepted: 07.09.2024

**Abstract: Relevance.** In mountainous areas there are tailing dumps that contain “tailings” – waste from mining plants, from where the tailings enter the atmosphere of mountain gorges in the form of fine dust. Multifactorial air flows and complex patterns of pollutant distribution in mountain gorges determine the need to study each specific gorge separately. The study of mountain gorges of an idealized shape is convenient to use for a detailed analysis of atmospheric flows in practically important applied problems of monitoring aerodynamics and the propagation of pollutants in real gorges. **Methods.** Using mathematical modeling, three-dimensional isothermal atmospheric flows in a mountain gorge with an idealized geometric shape in the form of a rectangular cavern oriented from south to north are considered. **The aim** is to study the influence of the width to height ratio of a mountain gorge and compare the results of model calculations with the model of the Alagir mountain gorge, North Ossetia-Alania, Russian Federation. **Results.** It is shown that when the width to height ratio is greater than three, the mountain gorge belongs to the comparable “wide” gorge. Analysis of the aerodynamic properties of the Alagir mountain gorge allows us to conclude that at the location of the Unal tailings dump this gorge corresponds to wide gorges. This conclusion can be drawn from the correspondence of the wind roses of these gorges and from the approximate correspondence of unsteady flow regimes depending on the direction of the external wind. Wind roses, profiles of wind speed, frequencies and amplitudes of unsteady oscillations, the distribution of dust concentration from the pollutant source as a marker of flow regimes are shown for idealized gorges of different widths. Knowledge of the air flows in idealized mountain gorges allows us to conduct a more in-depth analysis of aerodynamic regimes and the basic properties of pollutant dispersion in real mountain gorges and make realistic forecasts based on idealized models.

**Keywords:** mountain gorge, dust, tailings dump, mathematical model, aerodynamics.

**For citation:** Kamenetsky E.S., Radionoff A.A. Numerical study of the idealized mountain gorges atmosphere. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 174-190. DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

## Введение

В горных территориях существенным климатическим фактором является горно-долинная циркуляция, которая возникает в результате нагрева горных склонов в дневное и охлаждения в ночное время. Горно-долинная циркуляция обусловлена термическими ветрами и в наиболее развитом виде проявляется в антициклонических условиях при чистом небе и в безветренных условиях. Как правило, при горно-долинной циркуляции потоки с равнины на гору происходят в дневное время, а потоки с гор на равнину – в ночное время. При наличии внешнего барического ветра горно-долинная циркуляция существенно усложняется и даже вблизи поверх-

ности характеризуется многофакторными течениями воздуха [Барри, 1984; Шелковников, 1985].

Научное изучение горных ветров и горно-долинной циркуляции решает несколько важных прикладных задач: 1) оперативное прогнозирование погоды в горах; 2) климатологическая характеристика горных территорий (например, для сельскохозяйственных целей); 3) оценка воздействия на горные поселения или инфраструктуру рекреационных центров. Горно-долинная циркуляция влияет на: распределение температуры воздуха над сложной подстилающей поверхностью [Барри, 1984; Lindkvist et al., 2000; Mahrt, 2006]; перенос и распространение дыма и пыли хвостохранилищ [Каменецкий и др., 2020]; образование и рассеивание тумана [Suxart et al., 2011]; морозоустойчивость сельскохозяйственных культур; безопасность наземного транспорта и полетов воздушных судов [Шелковников, 1985]; длительное выветривание; климатические условия; пожарную безопасность [Sharples, 2009].

Получению достоверных результатов в области горной метеорологии препятствует уникальность климатических характеристик каждого конкретного ущелья. Действительно, каждое ущелье характеризуется своей пространственной конфигурацией, свойствами поверхности, увлажненностью и другими параметрами. Следовательно, любое измерение метеорологических полей или проведенный численный эксперимент для конкретной метеорологической ситуации в горном ущелье, не позволяет сделать выводы для ситуаций вне пределов рассмотренного случая. Это препятствие преодолевается двумя путями: 1) объединение реальных случаев в группы по сходным формам рельефа и обобщение аэродинамики этих случаев относительно присущих им важных физических процессов; 2) численное моделирование геометрически простых или идеализированных случаев для исследования основных аэродинамических свойств. Эти подходы позволяют, не прибегая к ресурсоёмкому моделированию, учитывающему детальные свойства поверхности, или дорогостоящим измерениям, делать некоторые выводы в области горной метеорологии.

Для процессов тепло- и массопереноса в идеализированных горных ущельях получено несколько важных результатов. В обзоре [Teixeira et al., 2016] показано, что в атмосфере горного ущелья с неравномерно нагретыми солнечным излучением склонами возникают сложные циркуляционные течения воздуха, содержащие от двух до четырех и более вихрей с горизонтальной осью вращения в поперечном сечении ущелья. Количество вихрей зависит от ширины ущелья и его географической ориентации. Зависимость от ширины ущелья рассматривается в [Wagner et al., 2015a; Serafin, Zardi, 2010], где показана трансформация потока при изменении ширины ущелья. В работе [Wagner et al., 2015b] получено, что при сужении ущелья сила ветра внутри поперечного сечения ущелья увеличивается, что приводит к увеличению вертикального массообмена в 1,8–2,8 раза, а учет наклона вдоль оси ущелья увеличивает вертикальный обмен примерно в 1,2 раза.

В работе [Lang et al., 2015] рассматривается горное ущелье с разновысокими склонами и начальным горизонтальным участком, найдено, что для глубокого внутреннего ущелья режим обратного циркуляционного течения устанавливается на большей части поперечного сечения ущелья. В расположенных не строго с востока на запад горных ущельях, солнечная радиация различается по времени и величине для разных склонов ущелья, что приводит к соответствующим пространственно-

временным изменениям поверхностных тепловых потоков, которые, в свою очередь, приводят к существенным трансформациям структуры потока и переноса загрязняющих веществ (ЗВ) [Matzinger et al., 2003; Rotach et al., 2008; Gohm et al., 2009].

Метеорологические измерения процессов разрушения ночной инверсии в атмосфере глубокого горного ущелья представлены в работе [Whiteman, 1982]. В работах [Leukauf et al., 2015; Leukauf et al., 2017; Lehner et al., 2017] моделируется разрушение ночной инверсии в горных ущельях при солнечном нагреве в утренние и дневные часы и исследуется зависимость этого процесса от параметров солнечного излучения (варьировалась коротковолновая солнечная радиация, соответствующая поверхностному тепловому потоку от 50 до 450 Вт/м<sup>2</sup>). Минимальное значение теплового потока, необходимого для разрушения ночной инверсии, составило порядка 150 Вт/м<sup>2</sup>; зависит от геометрии ущелья и при больших значениях этого параметра атмосфера горного ущелья полностью перестраивается три раза за сутки. Показано, что обмен энергией и массой между долиной и атмосферой сильно зависит от этого параметра. В этих исследованиях предполагалась низкая влажность поверхности склонов, не учитывалось испарение влаги и образование облаков.

Исследование атмосферных процессов в идеализированном Аризонском метеоритном кратере в двумерной [Lehner et al., 2016] и трехмерной [Lehner, Whiteman, 2014] постановке посвящено моделированию возникновения термически-обусловленных ветров, а также их взаимодействия с катататическими склоновыми ветрами. Исследуется модельная зависимость течения от геометрических размеров кратера, показаны сложные картины течений, включающие струйные течения, сложные процессы разрушения температурной инверсии, образования волн над бассейном кратера с одним или двумя гребнями. Более подробный обзор других результатов моделирования горной метеорологии представлен в [Whiteman, 2000; Chow et al., 2013].

В горных территориях расположены хвостохранилища, в которых, часто открытым способом, содержатся «хвосты» – отходы деятельности горнодобывающих комбинатов, откуда в виде мелкой пыли хвосты попадают в атмосферу горных ущелий. В летнее время, при солнечном нагреве и заметном ветре, пыление хвостохранилища протекает активно – при 5 м/с пыление хвостов значительно, а при скорости ветра более 8 м/с этот процесс еще более интенсифицируется (Электронный ресурс EPA. Iron King Mine and Humboldt Smelter. 2010. URL: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>, дата обращения 09.10.2019), [Gillies, 2013; Kok et al., 2014]. Результатом является перемещение химических элементов по склонам горных ущелий, что важно учитывать при оценке ландшафтно-геохимической миграции элементов в природной среде и оценке экологических рисков для данной территории.

Содержание химических элементов и их распределение на склонах горных ущелий изучаются при помощи полевых измерений [Гурбанов и др., 2019, 2020; Лолаев и др., 2017а, 2017б] в горных территориях РСО-Алания. Математическое моделирование применяется для описания распространения пылевого аэрозоля от Унальского хвостохранилища, расположенного в Алагирском ущелье, и Фиагдонского хвостохранилища, расположенного в Куртатинском ущелье, РСО-Алания, РФ [Каменецкий и др., 2020, 2022]. Отмечаются сложные трехмерные течения возду-

ха в Алагирском и Куртатинском ущельях. За горными вершинами возникают нестационарные трехмерные вихри, формируются направленные вдоль оси ущелья струйные течения. ЗВ распространяются преимущественно не вдоль внешнего потока, а увлекаются областями с сильной турбулентностью и уносятся струйными течениями в боковые рукава горных ущелий и там рассеиваются. Сопоставление результатов математической модели с данными измерений наземных метеостанций и спутниковыми данными зондирования атмосферы Земли показывает удовлетворительные результаты.

Если источник ЗВ, расположенный в горном ущелье действует длительное время, несколько десятков лет, суточные изменения аэродинамики горного ущелья при горно-долинной циркуляции частично компенсируются и не являются доминирующим процессом. Это позволяет, используя приближение нейтральной стратификации, упростить постановку задачи и учитывать только основные факторы, влияющие на перенос ЗВ, такие как топография горной местности, турбулентность, роза ветров. В результате, с использованием упрощенных идеализированных моделей, получается удовлетворительный прогноз для реальных задач.

Изучение горных ущелий идеализированной формы удобно использовать для подробного анализа атмосферных течений в практически важных прикладных задачах мониторинга аэродинамических характеристик и распространения ЗВ в реальных ущельях. В данной работе рассматриваются трехмерные изотермические течения атмосферы в горном ущелье с идеализированной геометрической формой в виде прямоугольной каверны, ориентированной с юга на север. Изучается влияние отношения ширины горного ущелья к его высоте, найдено, что этот параметр является одним из определяющих для аэродинамики горного ущелья. Показаны розы ветров, характерные профили скорости ветра в поперечном сечении ущелья, частоты и амплитуды возникающих осцилляций при разных направлениях внешнего ветра, а также распределения концентрации примеси от источника, расположенного на дне ущелья, как маркера режимов течения.

### Математическая модель

Горное ущелье идеализированного профиля выбиралось длиной 40 км (по оси  $Oy$ ) прямоугольного сечения размером  $1 \times 1$  км,  $1,5 \times 1$  км,  $2 \times 1$  км,  $2,5 \times 1$  км,  $3 \times 1$  км,  $4 \times 1$  км (в плоскости  $xz$ ) в виде закрытой со всех сторон каверны. Граничные условия на боковых границах ставились на удалении не менее 15 км от каждого края каверны, что позволяет считать влияние граничных условий на течение внутри каверны не существенным. Верхнее граничное условие ставилось на высоте 4 км над дном каверны, что также позволяет надеяться, что оно не влияет на течение внутри каверны. Перепад давления, под действием которого поддерживается внешний ветер, задавался в виде градиента давления на входной и выходной границах, соответствующего геострофическому балансу. Источник ЗВ располагался вблизи дна каверны, приблизительно посередине поперечного сечения по длине и ширине.

Количество узлов сетки: 100 узлов по направлению  $Ox$ , из них 20 в области каверны; 340 узлов по направлению  $Oy$ , из них 300 в области каверны; 50 узлов по направлению  $Oz$ , из них 25 внутри каверны. Расстояния: длина каверны 40 км, горизонтальные участки вокруг каверны 10 км, высота каверны 1000 м, высота расчетной области над каверной 3000 м. Схематично вычислительную сетку иллюстрирует рис. 1, где показаны направления координатных осей и размеры ущелья.

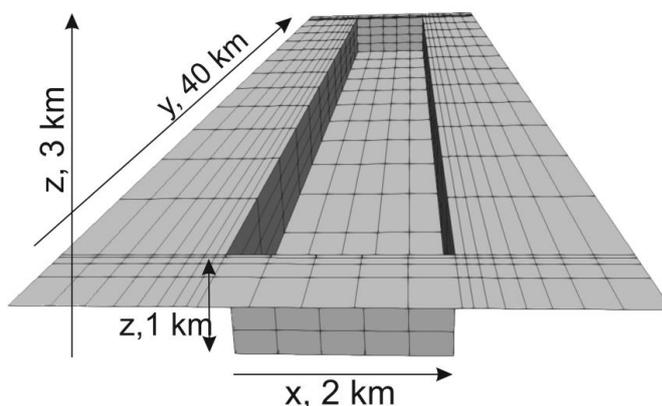


Рис. 1. Схематичное представление вычислительной области для ущелья шириной 2 км /  
 Fig. 1. Schematic representation of the computational domain for the gorge 2 km wide

Использовался солвер « *pisoFoam* » пакета OpenFOAM (<https://openfoam.org/release/7/>), предназначенный для описания нестационарных течений несжимаемой жидкости, в котором реализовано решение уравнений движения. Уравнения движения в приближении Буссинеска:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla(\mu \cdot \nabla \vec{v}) + \vec{f} \times \vec{v}.$$

В правой части уравнений движения добавлено слагаемое  $\vec{f} \times \vec{v}$ , где  $\vec{f} = (0, 0, 2\Omega \sin \varphi)$  – вектор параметра Кориолиса;  $\nabla$  – оператор «набла»;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление, вычисляемое по алгоритму PISO [Issa, 1986];  $\vec{v}$  – вектор скорости ветра,  $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$  1/с – частота вращения Земли,  $\varphi$  – географическая широта. Добавлено уравнение для расчета концентрации ЗВ [Каменецкий и др., 2020]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) c = \nabla(\mu \cdot \nabla c) + S,$$

где  $S=I$  – нормированный источник ЗВ вблизи поверхности ущелья;  $c$  – концентрация ЗВ; координата  $x$  направлена на восток,  $y$  – на север,  $z$  – вверх;  $t$  – время;  $\mu$  – турбулентная вязкость воздуха, рассчитываемая по  $(k-\epsilon)$ -модели, параметры которой принимались согласно работе [Hargreaves, Wright, 2007], использовалось RAS-моделирование турбулентности.

На верхней границе скорость ветра определяется балансом между силой Кориолиса и перепадом давления, связанным с течениями воздуха синоптического масштаба. Граничное условие для скорости на верхней границе задавалось константой, на входных боковых границах согласно решению Экмана. Для выходных боковых границ расчетной области задавались градиенты скорости равные нулю (*fixedGradient*). На нижней границе использовано условие прилипания и нулевой градиент давления. Пыль моделировалась одной фракцией, для пылинок которой характерна скорость осаждения  $w_n \approx 10^{-4}$  м/с, что соответствует размеру частиц от 2 до 10 микрон.

В расчетах геострофический баланс достигается за время 12000 с. Представленные в этой работе результаты расчетов показаны для момента времени 21600 с. Такого времени расчета достаточно для появления нестационарных режимов течения в ущелье с периодической генерацией вихрей и установления поля концентрации ЗВ.

Проведены шесть серий вычислительных экспериментов для шести ущелий, которые различаются шириной, при модуле скорости внешнего ветра, равном 10 м/с. Для ущелья каждой ширины проведено 16 расчетов с различными направлениями ветра на внешней границе, которые отличались поворотом на 22,5 градусов в горизонтальной плоскости при остальных неизменных параметрах. Результаты всех 16-ти расчетов анализировались совместно: строилась модельная роза ветров, строилось осредненное поле концентрации ЗВ, анализировались нестационарные режимы течения, их частоты и амплитуды, исследовались струйные течения.

## Результаты и обсуждение

### *Розы ветров*

Аэродинамика течений в горном ущелье находит свое отражение в розе ветров, удобство моделирования которой в том, что ее можно сравнить с натурными измерениями, поскольку она зачастую измеряется метеостанциями. Роза ветров характеризует наиболее часто повторяющиеся направления ветра в данной точке поверхности ущелья. При измерениях на метеостанциях роза ветров является результатом обработки ежедневных измерений направления ветра за большой промежуток времени практически всегда для одной точки поверхности горного ущелья, в которой располагается метеостанция. При построении из результатов математической модели роза ветров строится по всем точкам вычислительной сетки, принадлежащим некоторой площади поверхности ущелья, для всех 16-ти расчетов с различными направлениями внешнего ветра. Это различие оказывает свое влияние на точность предсказаний модели, найдено удовлетворительное соответствие модельных и измеренных роз ветров для двух точек Алагирского ущелья [Каменецкий и др., 2022].

На рис. 2а-2в показаны модельные розы ветров для идеализированных ущелий разной ширины и соответствующие силы ветров, пунктирной линией приведена измеренная роза ветров в Алагирском ущелье вблизи Унальского хвостохранилища. Область поверхности, по которой строилась модельная роза ветров, выбиралась в центре ущелья (вблизи источника ЗВ), вычислялась по всей ширине идеализированного ущелья (ось  $Ox$ ), вдоль оси  $Oy$  составляла расстояние равное ширине ущелья, а для Алагирского ущелья область поверхности выбиралась вблизи источника ЗВ.

Роза ветров для широких ущелий (рис. 2б, 2с) близка розе ветров, измеренной вблизи Унальского хвостохранилища Садонского СЦК, расположенного в Алагирском ущелье, которое в точке измерения ориентировано практически с юга на север [Каменецкий и др., 2022]. Обе розы ветров напоминают арабскую цифру «8», ориентированную вдоль оси ущелья. В направлении перпендикулярном оси ущелья ветров практически не наблюдается, что показывают и измерения в реальном Алагирском ущелье, и моделирование широкого ущелья идеализированного профиля.

Измеренная в Алагирском ущелье роза ветров демонстрирует общие черты, как с модельной розой ветров для узкого ущелья (рис. 2а) при южных и юго-западных ветрах, так и с розой ветров, построенной для широкого ущелья (рис. 2б) при северных и северо-восточных ветрах. Можно предположить, что форма пунктирной линии на рис. 2 отражает геометрию Алагирского ущелья, которое несколько расширяется на север вблизи точки измерения, а в южном направлении несколько сужается.

В более узких ущельях (рис. 2а) роза ветров также показывает отсутствие ветров в направлении перпендикулярном оси ущелья. Однако форма розы ветров бо-

лее сложная, появляются ветра, направленные под большим углом к оси ущелья и нет ярко выраженных двух преобладающих направлений, как в случае широких ущелий.

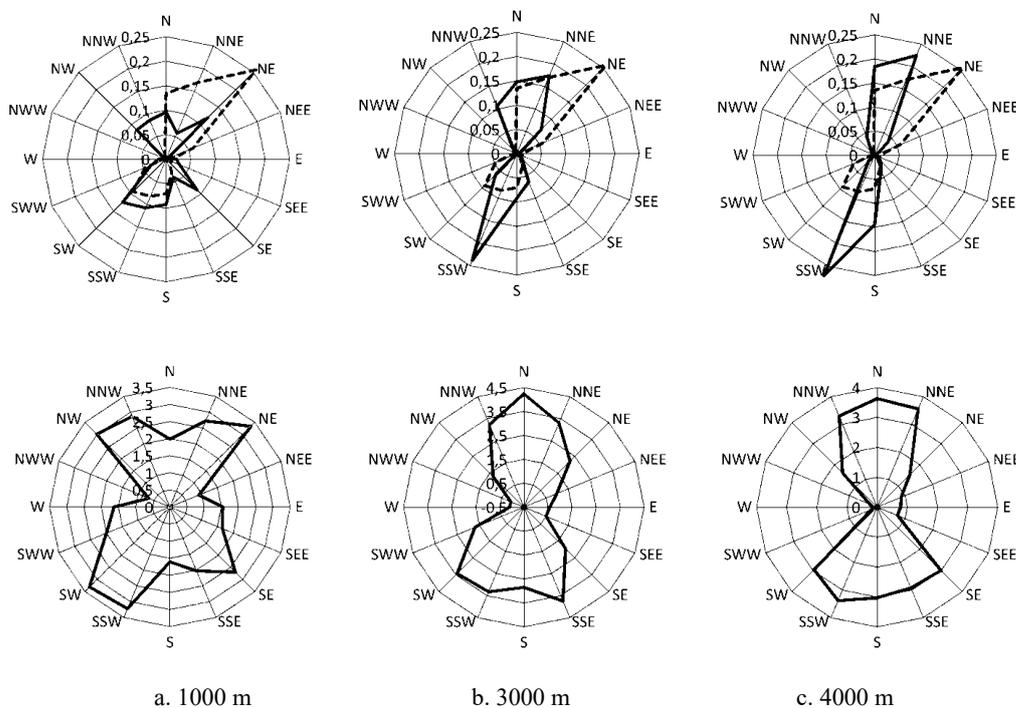


Рис. 2. Приземные розы ветров (сверху) и сила ветров (снизу) в центре ущелья в точке, где расположен источник ЗВ. Ширина ущелья указана на рисунке внизу. Значения получены по серии из 16-ти расчетов для каждого ущелья /

Fig. 2. Surface wind roses (top) and wind strength (bottom) in the center of the gorge at the point where the pollutant source is located. The width of the gorge is indicated at the bottom of each figure. The values are obtained from series of 16 simulations for each gorge

### Струйные течения

В случае если внешний ветер имеет восточную или западную компоненту, внутри горного ущелья формируется струйное течение, которое, при некоторых направлениях внешнего ветра является нестационарным. Спиральный вихревой поток воздуха внутри ущелья усложняется, и периодически появляются вихри, вращающиеся с горизонтальной осью вращения вдоль оси  $Ox$ , тогда как ось основного вихря в ущелье ориентирована вдоль оси  $Oy$ . Характерный размер вдоль оси  $Oy$  таких вихрей составляет 1–2 ширины ущелья. В результате возникает сложная, нестационарная картина течения, в которой крупные вихри движутся внутри ущелья вдоль его оси медленнее внешнего ветра.

Пример нестационарного струйного течения вдоль ущелья иллюстрируется на рис. 3, где показаны профили направленной вдоль оси ущелья северной компоненты скорости ветра, для случая расчета северо-восточно-восточного внешнего ветра. Показаны три профиля, демонстрирующих изменения во времени, которые происходят при прохождении вихря с осью вращения вдоль оси  $Ox$  (восточное направление): штрих-пунктирная кривая – центр вихря, сплошная кривая – край вихря, пунктирная штриховая кривая – приблизительно между вихрями. Сечение взято в середине ущелья.

Видно, что при прохождении вихря профиль скорости ветра существенно меняется в области отрицательных высот – внутри ущелья (рис. 3). Внутри ущелья формируется горизонтально направленная струя, которая в этом расчете пульсирует, с периодом около 260 сек и амплитудой более 2 м/с. Это относительно большие пульсации, которые существенно влияют на перенос ЗВ и приводят к образованию клубов пыли, распространяющихся на заметные расстояния.

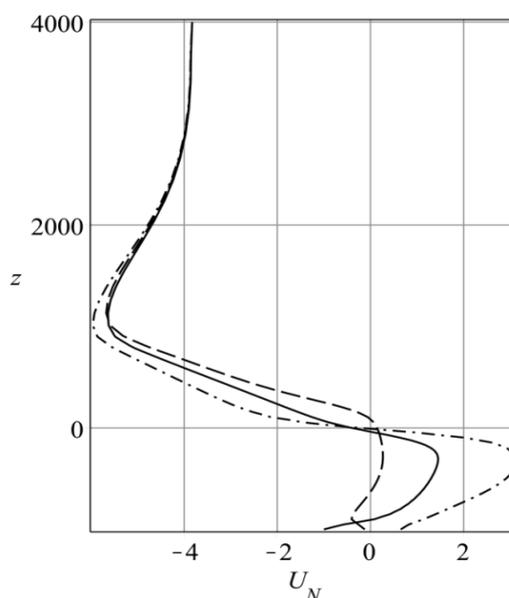


Рис. 3. Профили северной компоненты  $U_N$  скорости ветра в разных сечениях вихря. Расчет при северо-восточно-восточном внешнем ветре, ущелье шириной 1500 м, время 21600 сек /

Fig. 3. Profiles of the northern component  $U_N$  of wind speed in different sections of the vortex. The simulation for the north-east-east external wind, gorge 1500 m wide, time 21600 sec

Нестационарное течение в ущелье формируется не для всех направлений внешнего ветра. Зависимость частоты и амплитуды пульсаций в струйном течении от направления внешнего ветра для разных ущелий показана на рис. 4. На этом же рис. 4 пунктиром приведены частоты и амплитуды пульсаций, вычисленные для Алагирского ущелья в точке, где расположено Унальское хвостохранилище.

Не в каждом расчетном случае легко определяется основная частота пульсации, поскольку зависимость от времени течения зачастую сложная, не всегда строго периодичная. Частота на графиках рис. 4 определялась для каждого расчета на основании анализа временного ряда, в котором выделялись наиболее амплитудные периодические пульсации.

Анализ рис. 4 позволяет полагать, что наилучшее соответствие частот и амплитуд пульсаций для Алагирского ущелья в точке расположения Унальского хвостохранилища достигается для ущелья идеализированного профиля шириной 4000 м. Для более узких ущелий наблюдается два выделенных направления (приблизительно северо-восточное и юго-западное), в которых амплитуды пульсаций значительны. Рис. 3 иллюстрирует осцилляции для идеализированного ущелья шириной 1500 м. Амплитуда пульсаций достигает 2 м/с вблизи поверхности для ущелья шириной 1500 м при направлении внешнего ветра СВВ или ЮЗЗ, при этом период пульсаций составляет 5–6 мин, а средняя приземная скорость ветра – порядка 0,3–0,5 м/с.

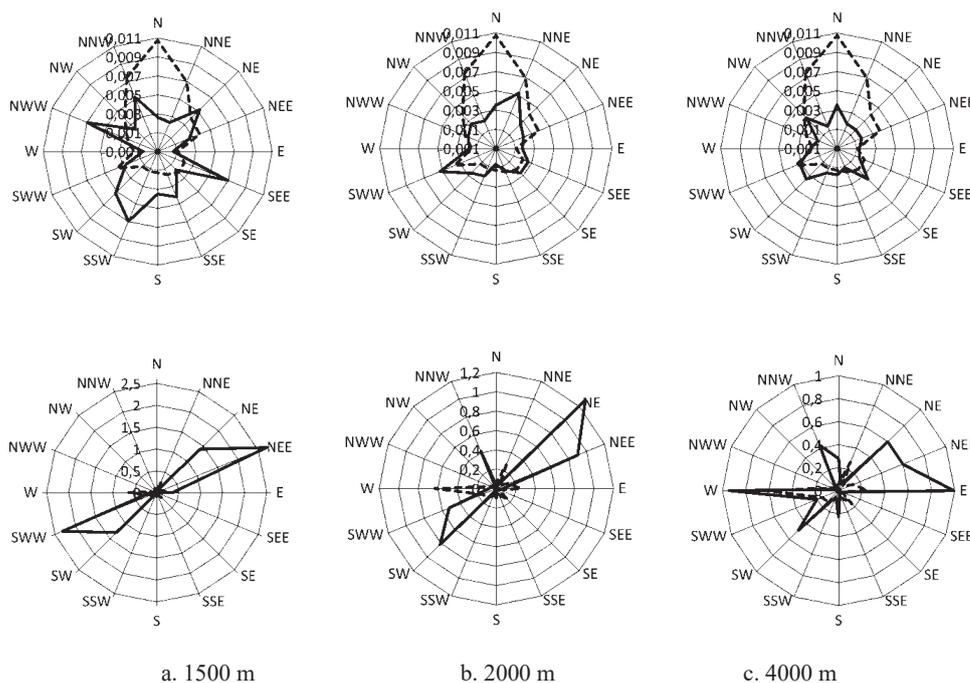


Рис. 4. Зависимость частоты (Гц, сверху) и амплитуды (м/с, внизу) пульсаций струйного течения от направления внешнего ветра. Ширина ущелья указана на рисунке внизу. Значения получены по серии из 16-ти расчетов для каждого ущелья /

Fig. 4. Dependence of the frequency (Hz, top) and amplitude (m/s, bottom) of jet stream pulsations on the direction of the external wind. The width of the gorge is indicated at the bottom of the figure. The values are obtained from series of 16 simulations for each gorge.

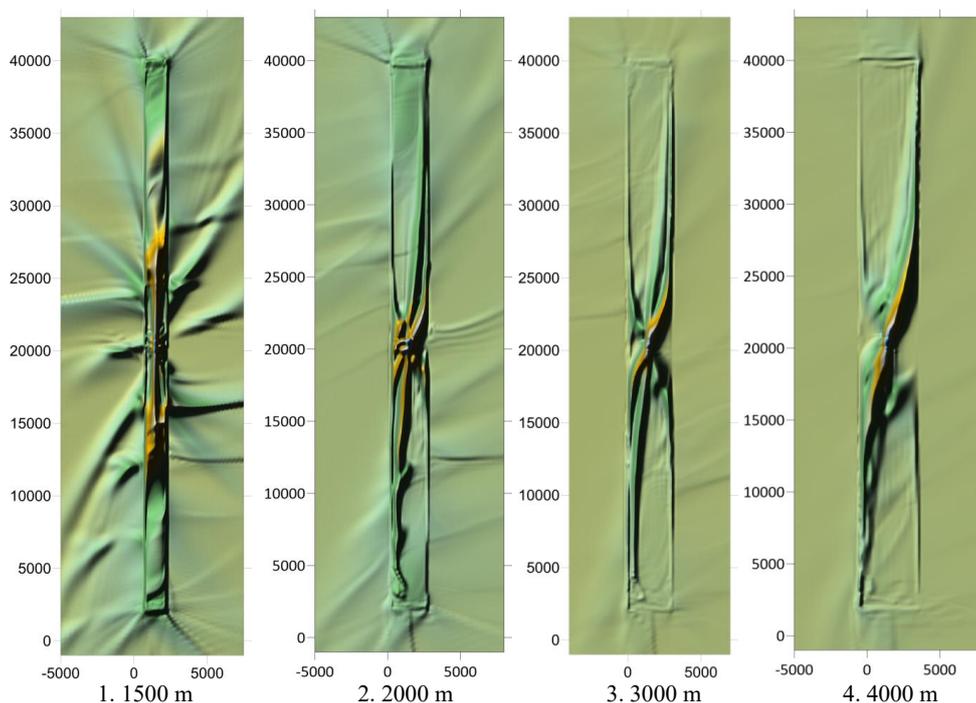
Струйные течения в поперечном сечении ущелья наблюдаются при всех направлениях ветра в ущельях. Их появление связано как с барическим градиентом, вызывающим стационарный внешний ветер, так и с формированием вихря внутри поперечного сечения ущелья с горизонтальной осью вращения. Внутри ущелья сила Кориолиса частично блокируется склонами ущелья, в результате под действием барического градиента внутри ущелья развивается струйное течение, направленное вдоль оси ущелья. При этом поток воздуха движется по спирали в этом вихревом (в поперечном сечении ущелья) и струйном (вдоль оси ущелья) течениях. Чем больше восточная или западная составляющая скорости внешнего ветра (и соответствующий барический градиент), тем более сильное струйное течение формируется вдоль оси ущелья.

Хотя причина формирования струйного течения понятна, но причину потери его устойчивости трудно установить при помощи численного моделирования. Одна из возможных причин – это возникновение сдвиговой неустойчивости струйного течения, однако частоты и амплитуды осцилляций нестационарных режимов зависят от ширины ущелья (рис. 3, 4), осцилляции проявляются только при нескольких направлениях скорости внешнего ветра и их характеристики зависят от значения скорости ветра на внешней границе.

#### *Концентрация ЗВ как маркер режимов течения*

Аэродинамика горного ущелья отражается на процессах переноса ЗВ в атмосфере горного ущелья. Во многих случаях удобно использовать расчетное поле концентрации ЗВ как маркер, отражающий основные режимы течения воздуха.

Серия вычислительных экспериментов показывает зависимость течений воздуха в ущелье идеализированной прямоугольной формы в зависимости от ширины. В узких ущельях рассеяние ЗВ от модельного источника происходит значительно интенсивнее, чем в широких ущельях (рис. 5, 6). Количественное отношение интенсивности рассеяния пыли в узких ущельях к широким, составляет порядка 3 и более, что соответствует результатам работы [Wagner, et al., 2015a]. Ширина горного ущелья, при которой происходит изменение режима интенсивного перемешивания на менее интенсивный, составляет порядка 3000 м. Другими словами, в ущельях с отношением ширины к высоте менее чем 3 наблюдается интенсивное рассеяние ЗВ, в несколько раз большее, чем в относительно широких ущельях с отношением ширины к высоте более 3.



*Рис. 5. Среднее поле ЗВ по серии из 16-ти расчетов для 4-х ущелий /*

*Fig. 5. The average pollutant field for series of 16 calculations for 4 gorges*

Распределение концентрации ЗВ вдоль оси ущелья также отличается для узких и широких ущелий (рис. 5, 6). В узких ущельях ЗВ интенсивнее перемешиваются внутри ущелья, и это перемешивание еще более усиливается с увеличением скорости ветра на внешней границе.

Отмеченные ранее различия в розах ветров для узких и широких ущелий также просматриваются и в распределениях ЗВ по дну ущелья (рис. 5). Для широких ущелий форма распределения ЗВ по поверхности дна, практически симметричная относительно источника, хорошо соответствует форме розы ветров с двумя выделенными направлениями. Для более узких ущелий распределение ЗВ связано с интенсивными вихревыми режимами течения, и подобного соответствия не просматривается.

На рис. 5 показано четыре средних поля приземных концентраций ЗВ, вычисленных для ущелий разной ширины. Каждое изображение является прогнозом значений концентрации ЗВ по склонам модельного ущелья. Поскольку ЗВ переносятся

в основном ветром, то распределение ЗВ по склонам ущелья отражает наиболее часто дующие ветра в точке расположения источника.

Для широких ущелий видно (рис. 5), что повышенные значения ЗВ расположены вдоль оси ущелья с несколько отклоняющейся линией максимальных значений от направления оси ущелья. Это распределение соответствует вычисленным приземным розам ветров на основании 16-ти расчетов для каждого ущелья (рис. 2, 5).

На рис. 6 показано распределение концентрации ЗВ вдоль оси ущелья, полученное для центрального сечения, проходящего через точку, в которой расположен источник ЗВ для ущелий шириной 1500 м и 3000 м, вычисленное для момента времени 21600 с.

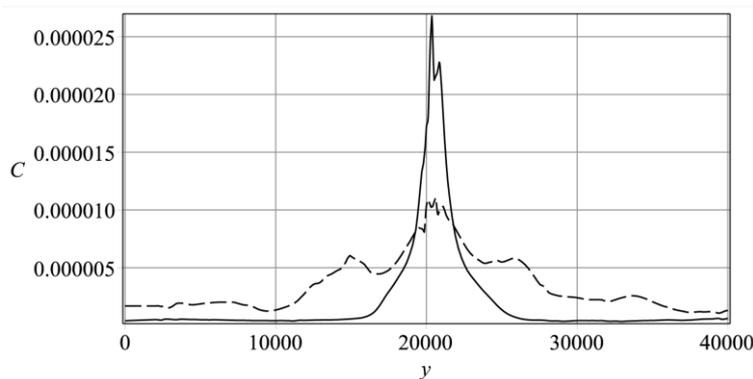


Рис. 6. Распределение ЗВ вдоль оси для ущелья шириной 1500 м (пунктирная линия) и шириной 3000 м (сплошная линия), получено на основании среднего по 16-ти расчетам поля ЗВ, при 10 м/с на внешней границе /

Fig. 6. Distribution of pollutant along the axis for a gorge 1500 m wide (dashed line) and 3000 m wide (solid line), obtained from 16 simulations of the pollutant field, at 10 m/s at the top boundary

Из рис. 6 видно, что концентрация ЗВ на дне узких ущелий заметно выше, чем для широких ущелий. Например, в ущелье 1000 м шириной вблизи южного уступа приземная концентрация ЗВ составляет  $2,5 \times 10^{-6}$ , а для широкого ущелья 4000 м шириной это значение составляет  $3,0 \times 10^{-7}$  при одинаковой длине ущелья. Другими словами, нестационарные режимы течения, возникающие в узких ущельях, переносят ЗВ вдоль ущелья гораздо интенсивнее, чем в широких ущельях. Это связано с более интенсивными явлениями турбулентности и образования крупных вихрей в узких ущельях. При этом пиковое значение концентрации ЗВ вблизи источника в широких ущельях выше, чем в узких ущельях (рис. 6).

С увеличением расстояния от источника вдоль оси ущелья концентрация ЗВ в узких ущельях уменьшается гораздо медленнее, чем это происходит в широких ущельях. Кроме того, уменьшение концентрации ЗВ с увеличением расстояния от источника происходит неравномерно в узких ущельях. На рис. 6 заметны максимумы концентрации ЗВ на сплошной кривой. Эти максимумы связаны с влиянием нестационарных вихрей, возникающих в узких ущельях. Расстояние этих максимумов от источника ЗВ увеличивается с увеличением ширины ущелья. Если для ущелья шириной 1000 м наблюдается несколько таких максимумов, то для ущелья шириной 2000 м наблюдается только два таких максимума. Для более широких ущелий максимумов не наблюдается, максимальные значения концентрации ЗВ располагаются не строго на оси ущелья, а под некоторым углом (рис. 5).

## Выводы

Изучение течений воздуха в идеализированных горных ущельях без учета влияния тепловых процессов и влажности позволяет понять основные закономерности формирования таких течений.

Показано, что структура течения в узких горных ущельях (с небольшим отношением ширины к высоте) заметно отличается от полученной для широких ущелий. В частности, заметно отличаются розы ветров, в узких ущельях в некоторых вариантах расчетов возникает пульсирующее нестационарное течение, причем пульсации не затухают во времени.

ЗВ заполняют все поперечное сечение узкого ущелья, и перенос ЗВ является более интенсивным.

Сравнение результатов расчетов для Алагирского ущелья с результатами для идеализированных горных ущелий показывает, что идеализация формы поперечного сечения ущелья не меняет качественной картины течения воздуха и результаты, полученные для идеализированных ущелий, могут переноситься на реальные ущелья с приемлемой точностью.

## Литература

1. Барри Р.Г. Погода и климат в горах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 311 с.
2. Гурбанов А.Г., Лескин А.Б., Газеев В.М., Гурбанова О.А., Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Дзебоев С.О. Оценка масштабов и степени негативного воздействия Фиагдонского хвостохранилища на экосистему. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2020. – Т. 20. № 2. – 2020. – С. 54–62. DOI: 10.46698/d5387-0147-5683-х.
3. Гурбанов А.Г., Лексин А.Б., Газеев В.М., Гурбанова О.А., Лолаев А. Б., Оганесян А.Х., Дзебоев С.О. Закономерности в характере распределения содержаний макро- и микроэлементов в поверхностном слое (0.6 м) Фиагдонского хвостохранилища. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2019. – Т. 19. № 4. – С. 51–59. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.43324.
4. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С., Свердлик Г.И. Математическое моделирование распределения пыли по склонам горного ущелья от хвостохранилища, расположенного в Алагирском ущелье. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №№ 11-1. – С. 118–134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-118-134.
5. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Математическое моделирование распределения химических веществ и твердой фазы хвостов, осаждающихся на горных склонах в районе Фиагдонского хвостохранилища РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 3. – С. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361.
6. Лолаев А.Б., Бадтиев Б.П., Бутюгин В.В., Бадоев А.С. Определение консолидационных характеристик хвостов намывных техногенных месторождений. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2017а. – Т. 9. № 4. – С. 355–361.
7. Лолаев А.Б., Гурбанов А.Г., Дзебоев С.О., Илаев В.Э. Загрязнение прилегающих территорий в районе деятельности Садонского свинцово-цинкового комбината (Республика Северная Осетия-Алания). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2017б. – Т. 6. № 2. – С. 177–180.
8. Шелковников М. С. Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 208 с.
9. Chow F.K., De Wekker S.F.J., Snyder B.J. Mountain Weather Research and Forecasting. Dordrecht. Springer. 2013. 750 p. DOI: 10.1007/978-94-007-4098-3.

10. Cuxart J., Cunillera J., Jimenez M.A., Martínez D., Molinos F., Palau J.L. Study of mesobeta basin flows by remote sensing. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2011. – Vol. 143. – pp. 143–158. DOI: 10.1007/s10546-011-9655-8.
11. Gillies J.A. Fundamentals of aeolian sediment transport: dust emissions and transport – near surface. *Environmental Science, Geology*. – 2013. – Vol. 11. Issue 4. – pp. 43–63. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00297-9.
12. Gohm A., Harnisch F., Vergeiner J., Obleitner F., Schnitzhofer R., Hansel A., et al. Air pollution transport in an alpine valley: results from airborne and ground-based observations. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2009. – Vol. 131. – pp. 441–463. DOI: 10.1007/s10546-009-9371-9.
13. Hargreaves D.M., Wright N.G. On the use of the k-Epsilon model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. // *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. – 2007. – Vol. 95. Issue 5. – pp. 355–269.
14. Issa R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. // *Journal of Computational Physics*. – 1986. – Vol. 62. Issue 1. – pp. 40–65. DOI: 10.1016/0021-9991(86)90099-9.
15. Kok J.F., Mahowald N.M., Fratini G., Gillies J.A., Ishizuka M., Leys J.F., Mikami M., Park M.-S., Park S.-U., Van Pelt R.S., Zobeck T.M. An improved dust emission model – Part 1: Model description and comparison against measurements. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. Issue 23. – pp. 13023–13041. DOI: 10.5194/acp-14-13023-2014.
16. Lang M.N., Gohm A., Wagner J.S. The impact of embedded valleys on daytime pollution transport over a mountain range. // *Atmospheric chemistry and physics, Discussions*. – 2015. – Vol. 15. – pp. 14315–14356. DOI: 10.5194/acpd-15-14315-2015.
17. Lehner M., Whiteman C.D. Physical mechanisms of the thermally driven cross-basin circulation. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2014. – Vol. 140. Issue 680. – pp. 895–907. DOI: 10.1002/qj.2195.
18. Lehner M., Rotunno R., Whiteman C.D. Flow Regimes over a Basin Induced by Upstream Katabatic Flows-An Idealized Modeling Study. // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2016. – Vol. 73. pp. 3821–3842. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0114.1.
19. Lehner M., Whiteman C.D., Dorninger M. Inversion Build-Up and Cold-Air Outflow in a Small Alpine Sinkhole. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2017. – Vol. 163. – pp. 497–522.
20. Leukauf D., Gohm A., Rotach M.W., Wagner J.S. The impact of the temperature inversion breakup on the exchange of heat and mass in an idealized valley: sensitivity to the radiative forcing. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2015. – Vol. 54. – pp. 2199–2216. DOI: 10.1175/jamc-d-15-0091.1.
21. Leukauf D., Gohm A., Rotach M. Towards generalizing the impact of surface heating, stratification and terrain geometry on the daytime heat export from an idealized valley. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2017. – Vol. 56. Issue 10. – pp. 2711–2727. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0378.1.
22. Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J. A frost assessment method for mountainous areas. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2000. – Vol. 102. – pp. 51–67.
23. Mahrt L. Variation of surface air temperature in complex terrain. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2006. – Vol. 45. – pp. 1481–1493.
24. Matzinger N., Andretta M., van Gorsel E., Vogt R., Ohmura A., Rotach M.W. Surface radiation budget in an Alpine valley. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2003. – Vol. 129. – pp. 877–895. DOI: 10.1256/qj.02.44.
25. Rotach M.W., Andretta M., Calanca P., Weigel A.P., Weiss A. Boundary layer characteristics and turbulent exchange mechanisms in highly complex terrain. // *Acta Geophysicae*. – 2008. – Vol. 56. – pp. 194–219. DOI: 10.2478/s11600-007-0043-1.
26. Serafin S., Zardi D. Daytime heat transfer processes related to slope flows and turbulent convection in an idealized mountain valley. // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2010. – Vol. 67. – pp. 3739–3756. DOI: 10.1175/2010JAS3428.1.

27. Sharples J.J. An overview of mountain meteorological effects relevant to fire behaviour and bushfire risk. // *International Journal of Wildland Fire*. – 2009. – Vol. 18. – pp. 737–754.
28. Teixeira M.A.C., Kirshbaum D.J., Olafsson H., Sheridan P.F., Stiperski, I., et al. The atmosphere over mountainous regions. Switzerland: Frontiers Media SA, 2016. – 162 p.
29. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. The impact of valley geometry on daytime thermally driven flows and vertical transport processes. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2015a. – Vol. 141. Issue 690. – pp. 1780–1794. DOI: 10.1002/qj.2481.
30. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. Influence of along-valley terrain heterogeneity on exchange processes over idealized valleys. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015b. – Vol. 15. Issue 12. – pp. 6589–6603.
31. Whiteman C.D. Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys. Part I: observations. // *Journal of Applied Meteorology*. – 1982. – Vol. 21. – pp. 270–289.
32. Whiteman C.D. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. NY: Oxford University Press, 2000. – 376 p.

## References

1. Barry R.G. *Weather and climate in the mountains*. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1984. 311 p. (In Russ.)
2. Gurbanov A.G., Leskin A.B., Gazeev V.M., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Oganessian A.Kh., Dzeboev S.O. Assessment of the scale and degree of the negative impact of the Fiagdon tailings dump on the ecosystem. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2020. Vol. 20. No. 2. pp. 54–62. DOI: 10.46698/d5387-0147-5683-x. (In Russ.)
3. Gurbanov A.G., Leksin A.B., Gazeev V.M., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Oganessian A.Kh., Dzeboev S.O. Regularities in the nature of the distribution of macro- and microelements in the surface layer (0.6 m) of the Fiagdon tailings dump. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2019. Vol. 19. No. 4. pp. 51–59. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.43324. (In Russ.)
4. Kamenetsky E.S., Radionoff A.A., Timchenko V.Yu., Panaetova O.S., Sverdlik G.I. Mathematical modeling of dust distribution along the slopes of a mountain gorge from a tailings dump located in the Alagir Gorge. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020. Nos. 11-1. pp. 118–134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-118-134. (In Russ.)
5. Kamenetsky E.S., Radionoff A.A., Timchenko V.Yu., Panaetova O.S. Mathematical modeling of the distribution of chemicals and solid phase of tailings deposited on mountain slopes in the area of the Fiagdon tailings dump in North Ossetia-Alania. *Sustainable development of mountain territories*. 2022. Vol. 14. No. 3. pp. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361 (In Russ.)
6. Lolaev A.B., Badtiev B.P., Butyugin V.V., Badoev A.S. Determination of consolidation characteristics of tailings of alluvial technogenic deposits. *Sustainable development of mountain territories*. 2017. Vol. 9. No. 4. pp. 355–361. (In Russ.)
7. Lolaev A.B., Gurbanov A.G., Dzeboev S.O., Ilaev V.E. Pollution of adjacent territories in the area of activity of the Sadon lead-zinc plant (Republic of North Ossetia-Alania). *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2017. Vol. 6. No. 2. pp. 177–180. (In Russ.)
8. Shelkovnikov M.S. Mesometeorological processes in mountainous areas and their influence on aircraft flights. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1985. 208 p. (In Russ.)
9. Chow F.K., De Wekker S.F.J., Snyder B.J. *Mountain Weather Research and Forecasting*. Dordrecht. Springer. 2013. 750 p. DOI: 10.1007/978-94-007-4098-3.
10. Cuxart J., Cunillera J., Jimenez M.A., Martínez D., Molinos F., Palau J.L. Study of mesobeta basin flows by remote sensing. *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. Vol. 143. pp. 143–158. DOI: 10.1007/s10546-011-9655-8.
11. Gillies J.A. Fundamentals of aeolian sediment transport: dust emissions and transport – near surface. *Environmental Science, Geology*. 2013. Vol. 11. Issue 4. pp. 43–63. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00297-9.

12. Gohm A., Harnisch F., Vergeiner J., Obleitner F., Schnitzhofer R., Hansel A., et al. Air pollution transport in an alpine valley: results from airborne and ground-based observations. *Boundary-Layer Meteorology*. 2009. Vol. 131. pp. 441–463. DOI: 10.1007/s10546-009-9371-9.
13. Hargreaves D.M., Wright N.G. On the use of the k-Epsilon model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. 2007. Vol. 95. Issue 5. pp. 355–269.
14. Issa R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*. 1986. Vol. 62. Issue 1. pp. 40–65. DOI: 10.1016/0021-9991(86)90099-9.
15. Kok J.F., Mahowald N.M., Fratini G., Gillies J.A., Ishizuka M., Leys J.F., Mikami M., Park M.-S., Park S.-U., Van Pelt R.S., Zobeck T.M. An improved dust emission model – Part 1: Model description and comparison against measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 14. Issue 23. pp. 13023–13041. DOI: 10.5194/acp-14-13023-2014.
16. Lang M.N., Gohm A., Wagner J.S. The impact of embedded valleys on daytime pollution transport over a mountain range. *Atmospheric chemistry and physics, Discussions*. 2015. Vol. 15. pp. 14315–14356. DOI: 10.5194/acpd-15-14315-2015.
17. Lehner M., Whiteman C.D. Physical mechanisms of the thermally driven cross-basin circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2014. Vol. 140. Issue 680. pp. 895–907. DOI: 10.1002/qj.2195.
18. Lehner M., Rotunno R., Whiteman C.D. Flow Regimes over a Basin Induced by Upstream Katabatic Flows-An Idealized Modeling Study. *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2016. – Vol. 73. pp. 3821–3842. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0114.1.
19. Lehner M., Whiteman C.D., Dorninger M. Inversion Build-Up and Cold-Air Outflow in a Small Alpine Sinkhole. *Boundary-Layer Meteorology*. 2017. Vol. 163. pp. 497–522.
20. Leukauf D., Gohm A., Rotach M.W., Wagner J.S. The impact of the temperature inversion breakup on the exchange of heat and mass in an idealized valley: sensitivity to the radiative forcing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2015. Vol. 54. pp. 2199–2216. DOI: 10.1175/jamc-d-15-0091.1.
21. Leukauf D., Gohm A., Rotach M. Towards generalizing the impact of surface heating, stratification and terrain geometry on the daytime heat export from an idealized valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2017. Vol. 56. Issue 10. pp. 2711–2727. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0378.1.
22. Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J. A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000. Vol. 102. pp. 51–67.
23. Mahrt L. Variation of surface air temperature in complex terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2006. Vol. 45. pp. 1481–1493.
24. Matzinger N., Andretta M., van Gorsel E., Vogt R., Ohmura A., Rotach M.W. Surface radiation budget in an Alpine valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2003. Vol. 129. pp. 877–895. DOI: 10.1256/qj.02.44.
25. Rotach M.W., Andretta M., Calanca P., Weigel A.P., Weiss A. Boundary layer characteristics and turbulent exchange mechanisms in highly complex terrain. *Acta Geophysicae*. 2008. Vol. 56. pp. 194–219. DOI: 10.2478/s11600-007-0043-1.
26. Serafin S., Zardi D. Daytime heat transfer processes related to slope flows and turbulent convection in an idealized mountain valley. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010. Vol. 67. pp. 3739–3756. DOI: 10.1175/2010JAS3428.1.
27. Sharples J.J. An overview of mountain meteorological effects relevant to fire behaviour and bushfire risk. *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. pp. 737–754.
28. Teixeira M.A.C., Kirshbaum D.J., Olafsson H., Sheridan P.F., Stiperski, I., et al. The atmosphere over mountainous regions. Switzerland: Frontiers Media SA. 2016. 162 p.
29. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. The impact of valley geometry on daytime thermally driven flows and vertical transport processes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2015a. Vol. 141. Issue 690. pp. 1780–1794. DOI: 10.1002/qj.2481.

30. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. Influence of along-valley terrain heterogeneity on exchange processes over idealized valleys. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015b. Vol. 15. Issue 12. pp. 6589–6603.

31. Whiteman C.D. Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys. Part I: observations. *Journal of Applied Meteorology*. 1982. Vol. 21. pp. 270–289.

32. Whiteman C.D. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. NY. Oxford University Press. 2000. 376 p.

УДК 504.453+504.4.054

DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

Оригинальная статья

## Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани

Р.С. Комаров<sup>1,2</sup>, О.С. Решетняк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Южный федеральный университет,  
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40;

<sup>2</sup> Гидрохимический институт, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону,  
пр. Стачки, 198, e-mail: olgare1@mail.ru

Статья поступила: 12.05.2024, доработана: 16.07.2024, принята к публикации: 17.07.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Исследование стока растворенных веществ (в том числе ионного стока рек) имеет важное значение в глобальном масштабе. Происходящие изменения в окружающей среде оказывают влияние на процессы формирования химического состава и качества речных вод в бассейне Кубани. **Цель работы.** Проанализировать пространственно-временную изменчивость ионного стока в пределах бассейна р. Кубани. **Методы исследования.** Исследование проведено на основе многолетних гидрологических и гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета за период с 1990 по 2020 гг. Статистически значимые тенденции ионного стока определялись с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла. Теснота связи между водным и ионным стоком находилась с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Для выделения характерных периодов ионного стока использовался графоаналитический метод нормализованных разностно-интегральных кривых. Существенность различий выделенных временных интервалов проверялась с помощью непараметрического *U*-критерия Манна-Уитни. **Результаты работы.** По длине реки Кубани величина ионного стока последовательно возрастала и достигала максимальных значений в нижнем течении. Среди притоков наибольшие величины абсолютных значений ионного стока характерны для рр. Лабы и Белой. При рассмотрении пространственного распределения модулей стока была обнаружена неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора р. Кубани, обусловленная совокупным влиянием природных и техногенных факторов. Анализ многолетних колебаний ионного стока показал, что чаще всего определяющим фактором в его динамике был водный сток. Наблюдались статистически достоверные тенденции изменчивости ионного стока в нижнем течении р. Кубани, ее дельте и рр. Пшиш и Псекупс. Существенные изменения в выносе ионов через рук. Протока связаны с сокращением водного стока на фоне продолжающегося уменьшения минерализации воды.

**Ключевые слова:** бассейн р. Кубани, ионный сток, макрокомпоненты, модули ионного стока, коэффициент корреляции, тенденции.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>.

**Для цитирования:** Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 191-203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

Original paper

## Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin

**R.S. Komarov**<sup>ID</sup>1,2, **O.S. Reshetnyak**<sup>ID</sup>1<sup>1</sup> Southern Federal University, 40 R. Zorge Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation;<sup>2</sup> Federal State Budgetary Institution, Hydrochemical Institute, 198 Stachki Ave.,  
Rostov-on-Don 344090, Russian Federation,  
e-mail: olgare1@mail.ru*Received: 12.05.2024, revised: 16.07.2024, accepted: 17.07.2024*

**Abstract: Relevance.** The study of dissolved substances flow (including ion flux of rivers) is important on a global scale. The ongoing environmental changes have an impact on the processes of formation of the chemical composition and water quality in the Kuban basin. **Aim.** To analyze the spatiotemporal variability of ion flux within the Kuban River basin. **Research methods.** The study was based on long-term hydrological and hydrochemical data from the Roshydromet State Observation Network for the period from 1990 to 2020. Statistically significant trends in ion flux were determined using the Kendall rank correlation coefficient. The strength of the relationship between water and ion flux was found using the Spearman rank correlation coefficient. The graphical-analytical method of normalized difference-integral curves was used to identify characteristic periods of ion flux. The significance of the differences between the identified time intervals was tested using the nonparametric Mann-Whitney *U*-test. **Results.** Along the length of the Kuban River, the ion flux value consistently increased and reached its maximum values in the lower reaches. Among the tributaries, the highest absolute values of ion flux are characteristic of the Laba and Belaya rivers. The spatial distribution of ion flux modules revealed a heterogeneity of ion discharge intensity within the Kuban River basin, which is caused by the combined influence of natural and anthropogenic factors. The analysis of long-term fluctuations of ion flux showed that the most frequent determining factor in its dynamics was water runoff. Statistically significant trends in the variability of ion flux were observed in the lower reaches of the Kuban River, its delta, and the Pshish and Psekups rivers. A decreasing linear trend is characteristic of the majority of the identified trends. Significant changes in ion flux through the Protoka branch are associated with a decrease in water runoff against the background of a continuing decrease in water mineralization.

**Keywords:** Kuban river basin, ion flux, macrocomponents, ion flux modules, correlation coefficient, trends.

**Acknowledgements.** *The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>.*

**For citation:** Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 191-203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

### Введение

Изучение стока растворенных веществ (в том числе ионного стока рек) имеет важное значение в глобальном масштабе, поскольку антропогенная деятельность может приводить к нарушению естественных «солевых циклов» и засолению пресных вод [Kaushal et al., 2023; Wu et al., 2021], а климатические изменения – к на-

рушению естественных процессов выветривания горных пород (в основном карбонатных, силикатных и сульфатных минералов) [Lechuga-Crespo et al., 2020; Liu et al., 2020; Zhong et al., 2020]. Так по данным работы [Gong et al., 2023] изменение климата усилило положительный вклад процессов выветривания горных пород в возрастание стока основных ионов в речном переносе.

Исследование ионного стока (ИС) рек бассейна Кубани имеет значение в связи с прямым и косвенным воздействием на поверхностные водные объекты. Происходящие изменения окружающей среды оказывают влияние на процессы формирования химического состава и качества воды и в дальнейшем могут повлиять на прибрежные акватории Азовского моря.

Проведенные ранее исследования свидетельствуют о значительной пространственно-временной изменчивости качества поверхностных вод в пределах бассейна р. Кубани [Клименко и др., 2007; Михайлов и др., 2010; Никаноров и др., 2013; Решетняк, Комаров, 2023; Комаров, Решетняк, 2023]. ИС преимущественно изучен в нижнем течении и дельтовых рукавах Кубани. Качественная характеристика речных вод не в полной мере отражает степень техногенной преобразованности отдельных компонентов гидрохимического состава поверхностных вод и ионного стока. Изучение пространственной и временной динамики составляющих химического стока (стока главных ионов, органических веществ, биогенных элементов и т. д.) позволяет более детально оценить степень техногенного воздействия и выявить антропогенную составляющую стока веществ.

После начала регулярных наблюдений за химическим составом поверхностных вод в начале XX в. стала возможной и оценка ионного стока. Вынос р. Кубанью макрокомпонентов впервые был оценен О.А. Алекиным. Для расчета использовались данные о химическом составе за 1936–1941 гг. в пункте наблюдений х. Тиховский и среднемноголетнее значение годового стока воды [Алекин, 1949]. Позже значения были уточнены В.Я. Еременко и др. Оценка проводилась на основе данных 1940–1950 гг. для пунктов г. Краснодар и х. Тиховский [Еременко и др., 1953]. В работе О.А. Алекина и Л.В. Бражниковой приводятся сведения о суммарном стоке главных ионов в районе Переволоцкого узла. Помимо этого, были рассчитаны значения ионного стока притоков: рр. Малый Зеленчук, Уруп, Лаба, Фарс, Белая, Курджипис, Пшеха, Афипис и Адагум [Алекин, Бражникова, 1964].

Позже внимание обращалось на изменения в стоке растворенных веществ р. Кубани вследствие техногенного воздействия. В конце XX века наблюдалось увеличение антропогенной составляющей стока главных ионов [Бортник, Друмева, 1995] и значительное изменение в структуре ионного стока [Коняев и др., 2002]. С 1981 по 2000 гг. отмечалось последовательное увеличение ионного стока по пятилетним периодам в пункте наблюдений х. Тиховский, динамика антропогенной составляющей не имела выраженной тенденции [Коротова и др., 2002].

Использование метода многомерного кластерного анализа позволило авторам работы [Snezhko et al., 2020] не только сгруппировать реки (притоки в бассейне Кубани), но и выделить отдельные ионы металлов (кадмий, молибден и алюминий) – индикаторы загрязнения речных вод в бассейне.

Стоку растворенных веществ в дельтовых рукавах р. Кубани уделялось внимание в работах [Михайлов и др., 2010; Решетняк, Комаров, 2023]. Хозяйственное освоение бассейна Кубани и зарегулирование стока способствовало изменению минерализации и ионного состава воды в нижнем течении и дельте.

В свою очередь, ионный сток притоков Кубани и его временная динамика изучена в меньшей степени. В литературе можно найти лишь немногочисленные данные по этому вопросу [Алекин, Бражникова, 1964; Ресурсы..., 1973; Кочетов, 1976]. Таким образом, с учетом важности и отсутствием современных данных, актуальным является исследование ионного стока в бассейне Кубани в современных условиях антропогенного воздействия. Это и определило цель настоящего исследования – проанализировать пространственно-временную изменчивость ионного стока в пределах бассейна р. Кубани.

### Материалы и методы исследования

Исследование проведено на основе многолетних гидрологических и гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета. Исходные массивы данных включали информацию о расходах воды и концентрациях главных ионов (макрокомпонентов) в воде – гидрокарбонатов ( $\text{HCO}_3^-$ ), хлоридов ( $\text{Cl}^-$ ), сульфатов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), ионов магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ), суммы ионов натрия и калия ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) – за период с 1990 по 2020 годы. Объектами исследования выступали участки р. Кубани (г. Невинномысск, г. Армавир, ст-ца Ладожская, г. Краснодар и х. Тиховский), дельтовых рукавов (рук. Петрушин, Казачий Ерик и Протока) и основных притоков (рр. Лаба, Белая, Пшеха, Пшиш, Псекупс, Афипс и Адагум).

Для расчета объемов стока химических веществ с водосбора реки Кубани использованы многолетние гидрологические и гидрохимические данные, собранные из архивных фондов Росгидромета и Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (<https://gmvo.skniivh.ru>). При наличии незначительных пробелов в рядах гидрологических данных выполнялось их восстановление. С использованием данных об объемах годового стока воды в одном или нескольких пунктах-аналогах по уравнениям линейной регрессии были восстановлены значения объемов годового стока для некоторых гидрологических постов. Из всего массива восстановлено всего 6 % используемых в работе данных.

На основе сведений о концентрациях веществ и значениях годового стока воды выполнен расчет стока отдельных макрокомпонентов и ионного стока (по сумме главных ионов) рек бассейна Кубани прямым способом.

Модуль ионного стока  $M$  ( $\text{т/км}^2$  в год) рассчитан как отношение ионного стока к площади водосбора.

Для статистической обработки многолетних данных использованы MS Excel 2010 и Statistica 13.3. Статистически значимые временные тенденции ионного стока определялись с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла и уровня доверительной вероятности, при котором эти коэффициенты могут считаться статистически значимыми (при  $p < 0,05$ ).

Как правило, оценку тесноты корреляционной связи проводят по модулю значения коэффициента корреляции ( $r$ ) по одной из многочисленных шкал: Чеддока, Коэна, Эванса и др. Учитывая неравномерность сроков отбора проб и сильную внутригодовую вариацию концентраций макрокомпонентов, а также используя принцип разбивки диапазона значений  $r$  от 0 до 1,0 на равные отрезки, трактовка тесноты связи по линейному коэффициенту корреляции осуществлялась по следующим критериям:  $0,10 \leq r < 0,25$  – связь слабая;  $0,25 \leq r < 0,50$  – связь средняя (умеренная);  $0,50 \leq r < 0,75$  – связь сильная (тесная);  $0,75 \leq r < 1,00$  – очень сильная связь. Принято, что при  $r < 0,10$  статистическая связь отсутствует.

Для определения взаимосвязи между водным и ионным стоком рассчитаны значения коэффициента ранговой корреляции Спирмена, который является непараметрическим аналогом коэффициента корреляции Пирсона. В отличие от последнего для коэффициента корреляции Спирмена проверка на нормальность распределения не требуется. Связь считалась статистически значимой при  $p < 0,05$ .

Для выделения характерных периодов ИС (фаз повышенного или пониженного ИС относительно среднесуточных значений) использовался графоаналитический метод нормализованных разностно-интегральных кривых. Для подтверждения правильности выделения этих характерных периодов проводилась оценка статистически значимых отличий значений ИС с помощью непараметрического  $U$ -критерия Манна-Уитни. Различия считались значимыми при  $p < 0,05$ .

### Результаты работы и их обсуждение

Временная изменчивость ионного стока рек бассейна Кубани

На основе данных о концентрациях веществ и объемах водного стока были рассчитаны значения ИС за период 1990–2020 гг. для 17 пунктов наблюдений: по длине р. Кубани, в дельтовых рукавах и на основных притоках. Статистические характеристики полученных значений ИС представлены в таблице 1.

Как в пределах всего бассейна р. Кубани, так и в отдельных пунктах наблюдений абсолютные значения ИС изменялись в широких пределах. Значения коэффициентов вариации ( $C_v$ ) варьировались от 23 % (достаточно однородные данные) в районе г. Темрюка до 50 % (неоднородные данные) в районе г. Крымска.

Таблица 1 / Table 1

#### Статистические характеристики ионного стока в пределах бассейна р. Кубани (1990–2020 гг.) / Statistical characteristics of ion flux within the Kuban River basin (1990–2020)

№	Водный объект, пункт наблюдений / Water body, observation point	Значения ионного стока мин–макс среднее (тыс. т) / Ion flux values min–max mean (thousand tons)	Коэффициент вариации ( $C_v$ , %) / Coefficient of variation ( $C_v$ , %)	Коэффициент корреляции Кендалла / Kendall correlation coefficient
По длине р. Кубани / Along the length of the Kuban River				
1	р. Кубань, г. Невинномысск / Kuban River, Nevinnomyssk	$\frac{-*}{612}$	–	–
2	р. Кубань, г. Армавир / Kuban River, Armavir	$\frac{522-3016}{1766}$	33	-0,12
3	р. Кубань, ст-ца Ладожская / Kuban River, Ladozhskaya	$\frac{818-4489}{2558}$	34	-0,20
4	р. Кубань, г. Краснодар / Kuban River, Krasnodar	$\frac{1975-6116}{3864}$	24	<b>-0,28**</b>
5	р. Кубань, х. Тиховский / Kuban River, Tikhovsky	$\frac{3132-7805}{4673}$	24	-0,05

Дельтовые рукава р. Кубани / Delta branches of the Kuban River				
6	рук. Петрушин, г. Темрюк / Petrushin branch, Temryuk	$\frac{1207-3299}{2114}$	23	-0,23
7	рук. Казачий Ерик, х. Дубовый Рынок / Kazachy Erik branch, Dubovy Rynok	$\frac{11-215}{91}$	48	-0,06
8	рук. Протока, г. Славянск- на-Кубани / Protoka branch, Slavyansk-on-Kuban	$\frac{818-3836}{2191}$	28	<b>-0,25</b>
9	рук. Протока, х. Слободка / Protoka branch, Slobodka	$\frac{1459-4679}{2592}$	29	<b>-0,50</b>
Притоки р. Кубани / Tributaries of the Kuban River				
10	р. Лаба, х. Догужиев / Laba River, Doguzhiyev	$\frac{474-1926}{1215}$	27	-0,13
11	р. Белая, п. Гузерипль / Belaya River, Guzeripl	$\frac{48-176}{86}$	29	0,21
12	р. Белая, г. Майкоп / Belaya River, Maikop	$\frac{132-445}{283}$	30	0,13
13	р. Пшеха, г. Апшеронск / Pshekha River, Apsheronsk	$\frac{66-274}{170}$	38	–
14	р. Пшиш, г. Хадыженск / Pshish River, Khadyzhensk	$\frac{20-87}{44}$	37	<b>-0,29</b>
15	р. Псекупс, г. Горячий Ключ / Psekups River, Goryachy Klyuch	$\frac{42-220}{117}$	40	<b>-0,30</b>
16	р. Афипис, ст-ца Смоленская / Afips River, Smolenskaya	$\frac{36-90}{60}$	31	–
17	р. Адагум, г. Крымск / Adagum River, Krymsk	$\frac{2-99}{46}$	50	-0,14

*Примечание:* \*недостаточно данных; \*\*полу жирным курсивом отмечены статистически значимые ( $p < 0,05$ ) значения коэффициента корреляции Кендалла. Положительные значения – возрастающая тенденция, отрицательные значения – убывающая тенденция. / *Note:* \*insufficient data; \*\*statistically significant ( $p < 0.05$ ) values of the Kendall correlation coefficient are marked in bold italics. Positive values are an increasing trend, negative values are a decreasing trend.

По длине р. Кубани величина ИС последовательно возрастала. Наибольших средних значений ИС достигал в нижнем течении реки в районе х. Тиховского (4673 тыс. т). Ниже река делится на два основных дельтовых рукава – Кубань и Протоку. Главным рукавом является Кубань. В 16 км от устья он разделяется на рук. Петрушин, рук. Казачий Ерик и протоку Переволока [Лурье и др., 2005]. Речной сток в нижнем течении р. Кубани примерно поровну делится по основным дельтовым рукавам и поступает в Азовское море. Суммарный среднегодовой ИС через рук. Петрушин и рук. Протока в Азовское море за период 1990–2020 гг. составлял 4706 тыс. т. При этом в среднем через рук. Протока в Азовское море выносилось на 23 % больше ионов, чем через рук. Петрушин.

Среди изученных притоков р. Кубани наибольшие величины ИС характерны для рр. Лабы и Белой. Стоки суммы главных ионов для этих рек оценены на ос-

нове данных, полученных на пунктах наблюдений, которые располагаются на разном расстоянии от устьев. Ионный сток с водосбора Лабы в среднем составляет 1215 тыс. т., а для р. Белой аналогичное значение можно получить с использованием принципа экстраполяции величин ИС одного изучаемого бассейна реки на соседний речной бассейн [Алекин, Бражникова, 1964]. Таким образом, нами получены ориентировочные значения ИС в бассейне р. Белой – примерно 600 тыс. т (за период 1990–2020 гг.). Такой расчет очень условен, однако дает основания полагать, что ИС р. Белой может быть в два раза меньше ИС р. Лабы.

Среднегодовые абсолютные величины ИС остальных рек в среднем изменялись от 44 до 170 тыс. т. Такие сравнительно небольшие значения обусловлены низкой водностью рассматриваемых рек.

Для количественной оценки тенденций временной изменчивости значений ИС в бассейне р. Кубани рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между годом и ионным стоком. Для большинства исследуемых участков рек формируется убывающий тренд. Статистически значимыми тенденциями являются изменения ИС только на пяти участках: р. Кубань (г. Краснодар), рук. Протока (г. Славянск-на-Кубани), рук. Протока (х. Слободка), р. Пишиш (г. Хадыженск) и р. Псекупс (г. Горячий Ключ). В основном обнаруженная корреляционная связь характеризуется как умеренная (умеренной силы), кроме участка рук. Протока у х. Слободка, где выявлена сильная статистически значимая взаимосвязь.

Применение корреляционного анализа обоснованно тем, что это хороший оценочный метод для предварительной оценки направленности временных тенденций ионного стока рек. В силу значительной вариабельности гидрологических и гидрохимических данных, влияния на ионный состав речных вод множества факторов и процессов, ожидать высокую линейную зависимость нельзя. Поэтому линейные тренды даже умеренной силы являются статистически значимыми для природных вод.

### Пространственная изменчивость модуля ионного стока рек бассейна Кубани

Для анализа пространственной изменчивости ИС рек с различными водностью и площадями водосборов рассчитали среднемноголетние годовые модули (показатели) ионного стока. Путем вычитания значений на расчетном и вышележащем пункте наблюдений получали показатели ИС частных водосборов [Джамалов и др., 2020]. Для картографирования (визуального представления изменчивости модулей ИС) выполнено разделение общего диапазона значений на пять интервалов. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

В бассейне р. Кубани для водосборной площади 45000 км<sup>2</sup> среднее значение модуля ионного стока составляет 86 т/км<sup>2</sup> в год. При детальном рассмотрении пространственного распределения показателей ИС прослеживается неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора. На условной линии Крымск – Смоленская – Горячий Ключ – Апшеронск – Хадыженск – Майкоп расположены пункты наблюдений, относящиеся к «закубанским» рекам и притокам среднего течения р. Кубани. Для этих водотоков значения модулей стока изменяются в широких пределах (62–200 т/км<sup>2</sup> в год).

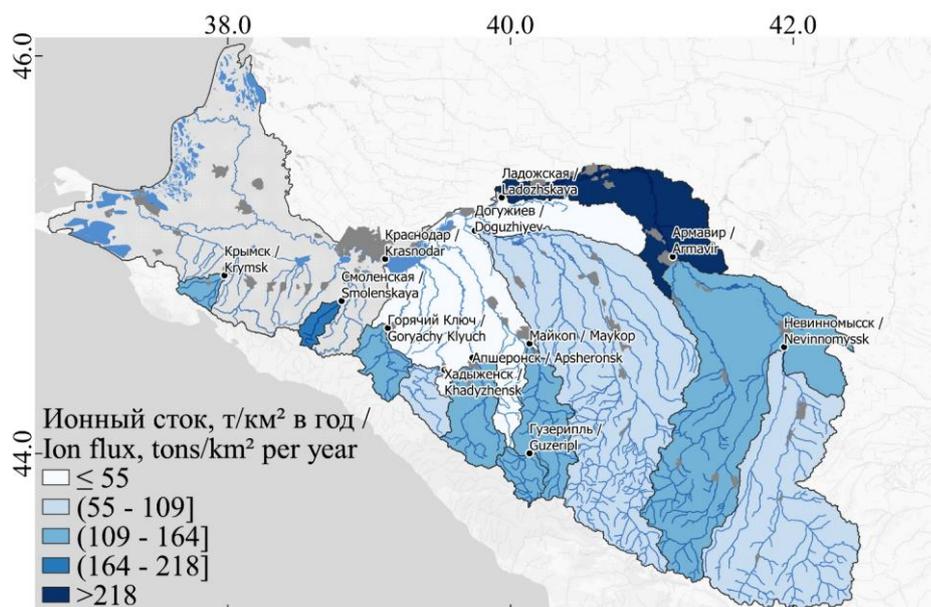


Рис. 1. Пространственная изменчивость модуля ионного стока в пределах бассейна р. Кубани /  
 Fig. 1. Spatial variability of the ion flux modulus within the Kuban River basin

Повышенные значения показателя ИС характерны для участка р. Кубани от г. Невинномысска до г. Армавира ( $121 \text{ т/км}^2$  в год). Вероятно, это связано с интенсивным выносом ионов двумя крупными левобережными притоками – рр. Большой Зеленчук и Уруп. Данные притоки имеют относительно высокую водность. При этом минерализация воды р. Уруп в межень достигает значений  $1 \text{ г/дм}^3$  и выше [Никаноров и др., 2013].

Максимальные значения модуля ИС наблюдаются в среднем течении р. Кубани. На участке от г. Армавира до ст-цы Лadoжской с территории площадью  $\sim 2900 \text{ км}^2$  поступает около  $273 \text{ т/км}^2$  в год главных ионов. По всей видимости, высокое значение показателя ионного стока обусловлено как совокупностью природных условий, так и техногенным влиянием. Река Кубань на данном участке протекает преимущественно в равнинной зоне. Течение становится более спокойным, возрастает температура воды. В районе ст-цы Темижбекской р. Кубань поворачивает на юго-запад и становится более извилистой [Лурье и др., 2005]. Увеличивается вклад подземной составляющей в водный сток, почвогрунты существенно засолены [Михайлов и др., 2010]. Немногочисленные водотоки, протекающие в аналогичных природных условиях и впадающие в р. Кубань между г. Усть-Лабинском и ст-цей Лadoжской имели минерализацию от  $1,0 \text{ г/дм}^3$  (период половодья) до  $2\text{--}4 \text{ г/дм}^3$  и более (период межени) [Ресурсы ..., 1973].

За период 1990–2020 гг. среднегодовое значение минерализации воды на рассматриваемом участке последовательно увеличивалось и составляло  $459 \text{ мг/дм}^3$  в пункте наблюдений г. Армавир,  $561 \text{ мг/дм}^3$  – г. Кропоткин,  $609 \text{ мг/дм}^3$  – ст-ца Лadoжская. Объемы водного стока ( $W$ ) на гидропостах в районе г. Армавир и у ст-цы Лadoжская в целом были близки по среднегодовым значениям ( $\sim 4,2 \text{ км}^3$  за период 1990–2020 гг.). Техногенное загрязнение поверхностных вод здесь происходило за счет сброса недостаточно очищенных сточных вод, а основная доля забора воды приходилась на сельское хозяйство (96,5 %) (<https://kbvu-fgu.ru/docs7>).

## Характерные фазы (периоды) изменчивости ионного стока

Динамика ионного стока определяется водностью реки и содержанием в природных водах макрокомпонентов. Поэтому нарушение зависимости между  $W$  и ИС может указывать на значительное техногенное воздействие, проявляющееся в виде загрязнения водных объектов. В таком случае будет происходить ослабевание корреляционной связи между объемами стока воды и стоком ионов.

Как показано выше, для большинства исследуемых участков рек в бассейне Кубани формируется убывающий тренд для ионного стока, но статистически значимыми являются изменения только на пяти участках – р. Кубань (г. Краснодар), рук. Протока (г. Славянск-на-Кубани), рук. Протока (х. Слободка), р. Пшиш (г. Хадзыженск) и р. Псекупс (г. Горячий Ключ) (табл. 1), для которых далее более детально рассмотрим изменчивость ИС и его компонентов.

Для данных речных участков на основе графоаналитического метода разностно-интегральных кривых выделены характерные периоды изменений величин ионного стока (табл. 2). Для всех пяти участков общий период разделился на два характерных периода повышенных или пониженных значений ИС относительно средне-многолетних значений. При проверке гипотезы о принадлежности двух сравниваемых выборок значений ИС к одной и той же генеральной совокупности с помощью  $U$ -критерия Манна-Уитни установлены существенные статистически значимые отличия сравниваемых периодов ( $p < 0,05$ ).

Таблица 2 / Table 2

### Ионный сток и его изменчивость в характерные периоды для отдельных участков рек (со значимым убывающим трендом) в бассейне р. Кубани / Ion flux and its variability during characteristic periods for certain river sections (with a significant decreasing trend) in the Kuban River basin

№	Водный объект, пункт наблюдений / Water body, observation point	Выделенный период / Selected period	Ионный сток, тыс. т / Ion flux, thousand tons	Относительные изменения средних значений, % / Relative changes in mean values, %	
				Ионный сток / Ion flux	$W$
1	р. Кубань, г. Краснодар / Kuban River, Krasnodar	1990–2006 2007–2020	4307 3327	-23	-14
2	рук. Протока, г. Славянск-на-Кубани / Protoka branch, Slavyansk-on-Kuban	1990–2006 2007–2020	2483 1836	-26	-24
3	рук. Протока, х. Слободка / Protoka branch, Slobodka	1990–2006 2007–2020	3036 2053	-32	-20
4	р. Пшиш, г. Хадзыженск / Pshish River, Khadyzhensk	1994–2005 2006–2018	58 35	-40	-45
5	р. Псекупс, г. Горячий Ключ / Psekups River, Goryachy Klyuch	1990–1999 2000–2016	153 88	-42	-47

Одинаковые временные периоды получены для нижнего течения р. Кубани (г. Краснодар) и для дельтового рукава Протока (г. Славянск-на-Кубани, х. Слобод-

ка). На этих участках произошло синхронное снижение ИС на 23–32 % на фоне снижения водного стока в относительно меньших изменениях (на 14–24 %) (табл. 2). Здесь помимо общих тенденций и характерных периодов отмечается также высокая синхронность изменчивости ИС. Форма нормализованных разностно-интегральных кривых свидетельствует о подобии многолетних колебаний на разных участках (рис. 2). Это же подтверждается статистически значимыми величинами ( $p < 0,05$ ) коэффициента корреляции Спирмена между ИС в сравниваемых пунктах ( $r = 0,76–0,84$ ).

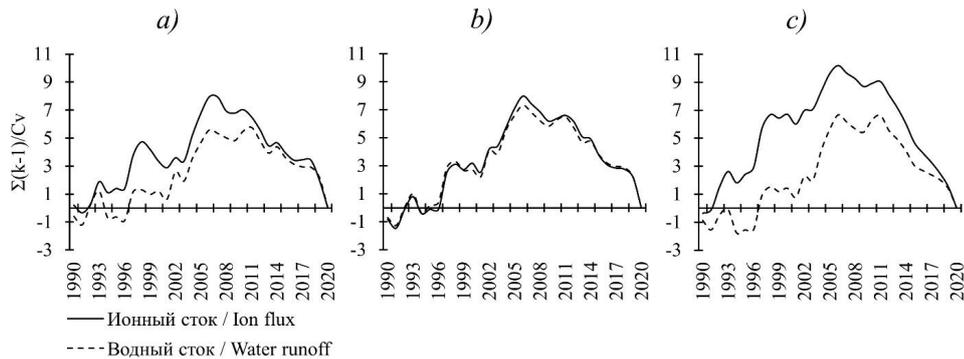


Рис. 2. Нормализованные разностно-интегральные кривые водного и ионного стока в нижнем течении Кубани: (а) – р. Кубань, г. Краснодар, (б) – рук. Протока, г. Славянск-на-Кубани, (с) – рук. Протока, х. Слободка /

Fig. 2. Normalized difference-integral curves of water runoff and ion flux in the lower reaches of the Kuban: (a) – Kuban River, Krasnodar, (b) – Protoka branch, Slavyansk-on-Kuban, (c) – Protoka branch, Slobodka

В целом выявленные особенности многолетних колебаний водного и ионного стока указывают на наличие общих причин происходящих изменений.

## Выводы

Результаты проведенных исследований позволили оценить пространственно-временную изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани за многолетний период.

В пределах речного бассейна абсолютные значения ИС изменялись в широких пределах. По длине реки величина ИС последовательно возрастала и достигала 4673 тыс. т/год в нижнем течении. Среди притоков наибольшие величины абсолютных значений ИС характерны для прр. Лабы и Белой. Среднегодовые значения ИС остальных водотоков были сравнительно небольшими, что обусловлено их водоносностью.

При рассмотрении пространственного распределения модулей ионного стока была обнаружена неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора р. Кубани, обусловленная совокупным влиянием природных и техногенных факторов. Повышенные значения показателя ИС характерны для участка от г. Невинномысска до г. Армавира, а также для отдельных притоков. Максимальный модуль ИС наблюдался в среднем течении р. Кубани на участке от г. Армавира до ст-цы Ладожской. Чаще всего определяющим фактором в динамике ИС являлся водный сток.

Наблюдались статистически достоверные тенденции изменчивости ионного стока в нижнем течении р. Кубани, ее дельте и рр. Пшиш и Псекупс.

В 2007–2020 гг. в нижнем течении р. Кубани и рук. Протока ионный сток снизился в 1,3–1,5 раза по сравнению с предшествующим периодом (1990–2006 гг.). Выявленные особенности многолетних колебаний указывают на наличие общих причин происходящих изменений в нижнем течении р. Кубани и в рук. Протока.

### Литература

1. Алекин О.А. Гидрохимия рек СССР. Реки Кавказа и Азиатской территории СССР. // Труды ГГИ. – 1949. – Вып. 15(69). – 144 с.
2. Алекин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. М: Наука, 1964. – 144 с.
3. Бортник В.Н., Друмева М.А. Оценка антропогенной составляющей солевого стока Дона и Кубани. // Водные ресурсы. – 1995. – Т. 22. № 2. – С. 155–158.
4. Джамалов Р.Г., Решетняк О.С., Сафронова Т.И., Власов К.Г., Галагур К.Г., Григорьев В.Ю., Оботуров А.С. Гидрохимический сток рек Европейской части России. Атлас. М: Ролик, 2020. – 155 с.
5. Еременко В.Я., Зенин А.А., Коновалов Г.С. Сток растворенных веществ р. Кубани и ее гидрохимический режим. // Гидрохимические материалы. – 1953. – Т. 21. – С. 30–53.
6. Клименко О.А., Косолапов А.Е., Радько Г.И. Оценка пространственно-временных изменений качества воды в бассейне р. Кубань. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 4. – С. 38–54.
7. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Комплексная оценка качества воды притоков реки Кубани. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. № 2(32). – С. 24–30. DOI: 10.25744/genb.2023.32.57.004.
8. Коняев С.В., Белоногов В.А., Торсуев Н.П. Колебания ионного стока р. Кубань вследствие антропогенного воздействия. // Известия Русского географического общества. – 2002. – Т. 134. Вып. 5. – С. 48–53.
9. Коротова Л.Г., Смирнов М.П., Клименко О.А., Жемчужнова Н.В., Дубовикова Г.Ф. Вынос реками минеральных, биогенных и загрязняющих веществ в Азовский бассейн. // Экосистемные исследования Азовского моря и побережья. Т. IV. / Отв. ред. Г.Г. Матишов. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. – С. 29–38.
10. Кочетов Н.И. Количественная оценка химической денудации на Западном Кавказе по гидрохимическим данным. // Геоморфология. – 1976. – № 3. – С. 61–66.
11. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. С.-П.: Гидрометеиздат, – 2005. 498 с.
12. Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Иванов А.А. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани. М: ГЕОС, – 2010. 728 с.
13. Никаноров А.М., Минина Л.И., Лобченко Е.Е., Ничипорова И.П. Динамика качества поверхностных вод юга России. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 6. – С. 57–72.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Л.: Гидрометеиздат, – 1973. 447 с.
15. Решетняк О.С., Комаров Р.С. Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани. // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2023. – № 1. – С. 95–105. DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-95-105.
16. Gong S., Bai X., Luo G., Li C., Wu L., Chen F., Ran C., Xi H., Zhang S. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport. // Global and Planetary Change. – 2023. – Vol. 228. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.

17. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B., Utz R.M., Yaculak A.M., Maas C.M., Reimer J.E., Bhide S.V., Malin J.T., Rippey M.A. The anthropogenic salt cycle. // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2023. – Vol. 4. – pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
18. Lechuga-Crespo J.L., Sánchez-Pérez J.M., Sauvage S., Hartmann J., Amiotte Suchet P., Probst J.L., Ruiz-Romera E. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale. // *Global and Planetary Change*. – 2020. – Vol. 192. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
19. Liu J., Han G. Major ions and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations. // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 724. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
20. Snezhko V., Benin D., Lukyanets A., Kondratenko L. Assessing the Pollution Level in the Kuban River Basin by Multivariate Cluster Analysis. // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. – 2020. – Vol. 17. No. 4. – pp. 73–80. DOI: 10.3233/AJW200053.
21. Wu J., Xu N., Wang, Y., Zhang W., Borthwick Alistair G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers. // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.
22. Zhong J., Li S.L., Ibarra D.E., Ding H., Liu C.Q. Solute production and transport processes in Chinese monsoonal rivers: Implications for global climate change. // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2020. – Vol. 34. DOI: 10.1029/2020GB006541.

## References

1. Alekin O.A. Hydrochemistry of rivers of the USSR. Rivers of the Caucasus and the Asian territory of the USSR. Trudy GGI. 1949. Issue 15(69). 144 p. (In Russ.)
2. Alekin O.A., Brazhnikova L.V. Flux of dissolved substances from the territory of the USSR. Moscow. Nauka. 1964. 144 p. (In Russ.)
3. Bortnik V.N., Drumeva M.A. Assessment of the anthropogenic component of the salt flux of the Don and Kuban. *Water Resources*. 1995. Vol. 22. No. 2. pp. 155–158. (In Russ.)
4. Jamalov R.G., Reshetnyak O.S., Safronova T.I., Vlasov K.G., Galagur K.G., Grigoriev V.Yu., Oboturov A.S. Hydrochemical flux of rivers of the European part of Russia. Atlas. Moscow. Rolike. 2020. 155 p. (In Russ.)
5. Eremenko V.Ya., Zenin A.A., Konovalov G.S. Flux of dissolved substances of the Kuban River and its hydrochemical regime. *Hydrochemical Materials*. 1953. Vol. 21. pp. 30–53. (In Russ.)
6. Klimenko O.A., Kosolapov A.E., Radko G.I. Assessment of spatio-temporal changes in water quality in the Kuban River basin. *Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2007. No. 4. pp. 38–54. (In Russ.)
7. Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Integrated water quality assessment of the tributaries of the Kuban River. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2023. Vol. 8. No. 2(32). pp. 24–30. DOI: 10.25744/genb.2023.32.57.004 (In Russ.)
8. Konyaev S.V., Belonogov V.A., Torsuev N.P. Fluctuations in the ion flux of the Kuban River due to anthropogenic impact. In: *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2002. Vol. 134. Issue 5. pp. 48–53. (In Russ.)
9. Korotova L.G., Smirnov M.P., Klimenko O.A., Zhemchuzhnova N.V., Dubovikova G.F. The flow of the mineral, biogenic and polluting substances into the Azov basin by rivers. *Ecosystem studies of the Azov Sea and coast*. Vol. IV. Edit. G.G. Matishov. Apatity. Kola Scientific Center RAS. 2002. pp. 29–38. (In Russ.)
10. Kochetov N.I. Quantitative evaluation of the chemical denudation at the Western Caucasus based on hydrochemical data. *Geomorphology*. 1976. No. 3. pp. 61–66. (In Russ.)
11. Lurie P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. The Kuban River: hydrography and flow regime. Saint Petersburg. Gidrometeoizdat. 2005. 498 p. (In Russ.)

12. Mikhailov V.N., Magritskiy D.V., Ivanov A.A. Hydrology of the delta and estuarine coast of the Kuban River. Moscow. GEOS. 2010. 728 p. (In Russ.)
13. Nikanorov A.M., Minina L.I., Lobchenko E.E., Nichiporova I.P. Dynamics of surface water quality in the South of Russia. Water management of Russia: problems, technologies, management. 2013. No. 6. pp. 57–72. (In Russ.)
14. Surface water resources of the USSR. Vol. 8. North Caucasus. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1973. 447 p. (In Russ.)
15. Reshetnyak O.S., Komarov R.S. Interannual and seasonal variability of chemical runoff along the main delta branches of the Kuban River. Lomonosov Geography Journal. 2023. No. 1. pp. 95–105. DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-95-105 (In Russ.).
16. Gong S., Bai X., Luo G., Li C., Wu L., Chen F., Ran C., Xi H., Zhang S. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport. Global and Planetary Change. 2023. Vol. 228. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
17. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B., Utz R.M., Yaculak A.M., Maas C.M., Reimer J.E., Bhide S.V., Malin J.T., Rippey M.A. The anthropogenic salt cycle. Nature Reviews Earth & Environment. 2023. Vol. 4. pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
18. Lechuga-Crespo J.L., Sánchez-Pérez J.M., Sauvage S., Hartmann J., Amiotte Suchet P., Probst J.L., Ruiz-Romera E. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale. Global and Planetary Change. 2020. Vol. 192. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
19. Liu J., Han G. Major ions and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations. Science of the Total Environment. 2020. Vol. 724. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
20. Snezhko V., Benin D., Lukyanets A., Kondratenko L. Assessing the Pollution Level in the Kuban River Basin by Multivariate Cluster Analysis. Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2020. Vol. 17. No. 4. pp. 73–80. DOI: 10.3233/AJW200053.
21. Wu J., Xu N., Wang, Y., Zhang W., Borthwick Alistair G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers. Nature Communications. 2021. Vol. 12. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.
22. Zhong J., Li S.L., Ibarra D.E., Ding H., Liu C.Q. Solute production and transport processes in Chinese monsoonal rivers: Implications for global climate change. Global Biogeochemical Cycles. 2020. Vol. 34. DOI: 10.1029/2020GB006541.

УДК 551.588.2 (3) (7); 57.045  
DOI: 10.46698/r7153-0875-2724-n

Оригинальная статья

## Биотрансформация углеводородов в составе нефтешлама (на примере объекта исторического загрязнения в Чеченской Республике)

М.Ю. Маркарова<sup>id</sup>, Л.Ш. Махмудова<sup>id</sup>, Н.А. Мамадиев<sup>id</sup>

Грозненский государственный нефтяной технический университет  
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051,  
г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100, e-mail: mls66@mail.ru

Статья поступила: 15.07.2024, доработана: 30.08.2024, принята к публикации: 31.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Проблема рекультивации земель и ликвидации шламонакопителей в Чеченской республике стоит остро из-за отсутствия фактического опыта таких работ и малочисленности исследований в этом направлении. Состав нефти на объектах исторических загрязнений и нефтеотходов в амбарах и шламонакопителях сильно варьирует, что предполагает и разные подходы в методах переработки. **Целью исследования** было изучение разных способов биодеструкции нефтяных углеводородов в составе нефтешламов бывшего Новогрозненского нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) по показателям изменения состава остаточной нефти в полевых и лабораторных опытах. **Методы исследования.** В полевом и лабораторно-вегетационном опытах проведено исследование методов детоксикации нефтешлама объекта накопленного экологического ущерба прошлых лет в Чеченской Республике. Оценку опытных грунтов проводили по изменению концентрации нефтепродуктов, структуры фракции нормальных парафинов и изоалканов, активности микробиоты. **Результаты работы.** Изучено влияние на скорость и качество биодеструкции нефтеуглеводородов комплекса методов биоремедиации с применением нефтеокисляющих аборигенных микроорганизмов, структураторов и сидератов в аэробных и частично анаэробных условиях. Показано, что на первом этапе ремедиации (обработка почвы) происходит активная детоксикация нефти, снижение в 2–4 раза концентрации ПАУ. Наиболее эффективно разрушению ПАУ подвергаются при использовании комплекса приемов: биопрепарата, структуратора и укрывного материала. На стадии фиторемедиации почвогрунт очищается наиболее быстро (до 85–90% от начального уровня загрязнения) при предварительной подготовке путем ремедиации со структуратором и биопрепаратом в аэробных условиях. В этом случае концентрация алкановой фракции заметно снижается. При фиторемедиации почвогрунта, подготовленного в частично анаэробных условиях, концентрация n-алканов возрастает наряду со снижением общей концентрации нефти. Перспективность использования методов частично анаэробного нефтеокисления при использовании укрывного материала определяется, в первую очередь, возможностью глубокой трансформации нефтепродуктов в почвенный углерод с перспективой повышения показателей почвенного плодородия и увеличения эффекта декарбонизации после нефтяных загрязнений.

**Ключевые слова:** нефтеотходы, нефтепродукты, алканы, биодеструкция, ремедиация.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0004 «Комплексное изучение потоков парниковых газов на природных и антропогенно-нарушенных ландшафтах Чеченской Республики и разработка научно-обоснованных рекомендаций по восстановлению биоресурсного потенциала нарушенных земель».

**Для цитирования:** Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Мамадиев Н.А. Биотрансформация углеводородов в составе нефтешлама (на примере объекта исторического загрязнения в Чеченской Республике). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 204–216. DOI: 10.46698/r7153-0875-2724-n

DOI: 10.46698/r7153-0875-2724-n

Original paper

# The biotransformation of hydrocarbons in the composition of oil sludge (on the example of a historical pollution site in the Chechen Republic)

M.Yu. Markarova<sup>id</sup>, L.Sh. Makhmudova<sup>id</sup>, N.A. Mamadiev<sup>id</sup>

Grozny State Oil Technical University named after. acad. M.D. Millionshchikov,  
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,  
e-mail: mls66@mail.ru

Received: 15.07.2024, revised: 30.08.2024, accepted: 31.08.2024

**Abstract: Relevance.** The problem of land remediation and eliminating sludge reservoirs in the Chechen Republic is acute due to the lack of actual experience in such work and the small number of studies in this direction. The composition of oil waste varies greatly, which suggests different approaches and processing methods, especially if we are talking about the use of biotechnological methods. **The aim** of the study was to study different methods of biodestruction of petroleum hydrocarbons in the oil sludge of the former Grozny oil refinery in terms of changes in the composition of residual oil in field and laboratory experiments. **Research methods.** In field and laboratory-vegetation experiments, a study was conducted of methods for detoxifying oil sludge from an object of accumulated environmental damage of past years in the Chechen Republic. The toxicity of test soils was assessed by changes in the concentration of petroleum products, the structure of the fraction of normal paraffins and isoalkanes, and the activity of microbiota. **Results.** The influence on the rate and quality of biodestruction of petroleum hydrocarbons by a set of bioremediation methods using oil-oxidizing indigenous microorganisms, structurizers and green manures under aerobic and partially anaerobic conditions was studied. It has been shown that at the first stage of remediation (soil cultivation), active detoxification of the soil occurs, reducing the concentration of PAHs by 2–4 times. PAHs are destroyed most effectively when using a set of techniques: a biological product, a structurizer and a covering material. At the stage of phytoremediation, the soil is cleaned most quickly (up to 85–90% of the initial level of contamination) with preliminary preparation by remediation with a structurizer and a biological product under aerobic conditions. In this case, the concentration of the alkane fraction decreases noticeably. During phytoremediation of soil prepared under partially anaerobic conditions, the concentration of n-alkanes increases along with a decrease in the total concentration of oil. The prospects of using methods of partially anaerobic oil oxidation when using covering material are determined primarily by the possibility of deep transformation of oil products into soil carbon with the prospect of increasing soil fertility and increasing the effect of decarbonization after oil pollution.

**Keywords:** oil waste, petroleum products, alkanes, biodegradation, remediation.

**Acknowledgements:** *The work was carried out within the framework of the state assignment of GGNTU named after. Academician M.D. Millionshchikova FZNU-2024-0004 “Comprehensive study of greenhouse gas flows in natural and anthropogenically disturbed landscapes of the Chechen Republic and development of science-based recommendations for restoring the bioresource potential of disturbed lands”.*

**For citation:** Markarova M.Yu., Makhmudova L.Sh., Mamadiev N.A. The biotransformation of hydrocarbons in the composition of oil sludge (on the example of a historical pollution site in the Chechen Republic). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 204-216. DOI: 10.46698/r7153-0875-2724-n

## Введение

В период с конца 90-х и до начала 2000-х годов для Чеченской Республики было характерно резкое ухудшение состояния почв. Наибольший вред приносило нефтяное загрязнение, происходящее по причине высокой изношенности нефтяной инфраструктуры (в первую очередь нефтепроводов и нефтехранилищ), а также из-за уничтожения нефтяной инфраструктуры в ходе проведения первой (1994–1996) и второй (1999–2009) военных чеченских кампаний [Вобликов и др., 2011; Экологически нестабильные ..., 2013].

Впоследствии в связи с интенсивной нефтедобычей наблюдалось локальное загрязнение нефтепродуктами в результате переливов из скважин, а также отчуждения земель под отстойники нефтяных вод и испарителей. Общая площадь отчужденных земель составила более тысячи га [Государственный доклад ..., 2014], в 2013 году общая площадь загрязненных земель региона составляла около 12 тыс. га. Химическое загрязнение (нефть и нефтепродукты) имело очаговый характер. Очаги загрязнения приурочены к местам расположения скважин, наливным эстакадам, линейным сооружениям (нефтепроводы) и местам, где ранее использовались установки по кустарной переработке нефти. Один из таких очагов – территория промзоны г. Грозного (Заводской район), то есть территория бывшего НПО «Грознефтеоргсинтез» (ныне правопреемник – ФГУП «Чеченнефтехимпром» Минэнерго РФ). Площадь загрязнения по разным оценкам составляет 150–350 га. При значительных загрязнениях земель имеет место и загрязнение геологической среды, особенно подземных вод [Государственный доклад ..., 2014, 2020; Чеченская республика в цифрах ..., 2019].

В Заводском районе г. Грозного сбор и хранение отходов нефтепереработки в шламовых амбарах привели к накоплению экологического ущерба углеводородами, относящимися к I – III классам опасности. Из органических соединений в почвогрунтах зафиксированы повышенные содержания бензапирена и нефтепродуктов. При фильтрации через грунт шламовый углеводородный загрязнитель мигрирует в подземные воды, загрязняя большие участки. Общий объем накопленных углеводородов Заводского района, оценивался в разные годы и разными исследователями от нескольких сотен тысяч до 2 млн кубометров. В соответствии с определением ГОСТ Р 54003-2010 [ГОСТ ..., 2011] пункт 3.21, исторические загрязнения – последствия хозяйственной деятельности людей в местах дислокации предприятий и организаций, которая осуществлялась в прошлом и обусловила нынешнее загрязнение территорий, наносящих вред окружающей среде и препятствующих использованию их в коммерческих и хозяйственных целях. В этой связи вопросы восстановления земель после нефтяных загрязнений в республике остаются актуальными.

Нефти, добываемые на территории Чеченской Республики обладают низкой плотностью, чрезвычайно подвижны в природной среде, при этом характеризуются как низкосернистые, слабообводненные, с незначительным выходом этил- и метилмеркаптанов. Это определяет с одной стороны высокий потенциал миграции в сопредельные среды и выраженную токсичность, с другой – достаточно короткий период стадии физического самоочищения и, соответственно, быстрое снижение токсичности после попадания в почву.

В легких фракциях преобладают парафиновые углеводороды (алканы), циклоалканы и ароматические углеводороды. Это наиболее подвижная часть нефти, ко-

торая может оказывать наркотическое и токсическое действие на живые организмы. Легкая фракция хорошо мигрирует по почвенному профилю и водоносным горизонтам, расширяя ареал первоначального загрязнения. На поверхности именно она, в первую очередь, подвергается физико-химическим процессам разложения. По данным Ю.И. Пиковского значительная часть этой фракции (от 20 до 40 %) разлагается и улетучивается из почвы уже в первые месяцы после загрязнения [Пиковский и др., 2015].

Скорость разрушения углеводородов во многом определяется концентрацией нефтяного загрязнения. Устойчивость индивидуальных углеводородов и различных компонентов сырой нефти к микробному воздействию в значительной степени обусловлена их структурой. Скорость биodeградации углеводородов микроорганизмами изменяется в порядке: парафины > ароматические углеводороды > циклопарафины. В составе нефтей, подвергающихся микробному разложению, возрастает доля смолисто-асфальтеновых компонентов, последовательно исчезают углеводороды: н-алканы > изо-, антеизоалканы > изопреноиды > моноциклические нафтены > прочие углеводороды [Пиковский и др., 2015].

Почвенные микроорганизмы играют главную роль в разложении не только нефтяных углеводородов, таких как алканы, ароматические углеводороды, но и смолисто-асфальтеновых компонентов, битумоидных соединений. Последние разлагаются крайне медленно, разные фракции различаются стабильностью и подвижностью в природных средах. Как правило, основными компонентами остаточной нефти после стадии самоочищения являются полярные вещества – смолы и асфальтены. Они сохраняются в течение многих лет либо в виде подвижной фракции, либо входят в состав гумусового комплекса почв [Гузев, Левин, 1991; Seo et al., 2009].

Микробиологические процессы ведут к частичному окислению и минерализации. Сырая нефть ингибирует биологическую активность, хотя численность микроорганизмов, особенно нефтеокисляющих, может быть достаточно высокой. Реакцией микробного сообщества на нефтяное загрязнение является его перестройка, происходит активизация групп, отвечающих за нефтеокисление, сопутствующих групп, участвующих в разрушении продуктов распада нефти [Гузев, Левин, 1991; Пиковский и др., 2015; Koshlaf, Ball, 2017; Nasreen, Kalsoom, 2018].

Для очищения почв от нефти различными авторами предлагается использовать методы биоремедиации, такие как использование биопрепаратов, минеральных и органических удобрений, зеленых удобрений, компостов, разрыхлителей. В частности, для очистки почв от нефти предлагают использовать растительные компосты [Youse et al., 2021], иммобилизовать бактериальные консорциумы на поглощающие носители, например на биоуголь [Zhang et al., 2019]. Для оценки токсичности углеводородов и определения эффективности биоремедиации применяют методы, основанные на определении концентрации нефти и отдельных углеводородных соединений, реакции микробиоты и растений [Bioremediation and phytoremediation ..., 2022].

В 2022–2023 гг. мы проводили исследования по изучению изменения концентрации полиароматических соединений в составе нефтешлама Новогрозненского НПЗ имени Н. Анисимова и НПЗ имени А. Шерипова в полевом опыте [Маркарова и др., 2022, 2023]. Исследование продолжено в 2024 году, изучено последствие испытанных методов на этапе фиторемедиации, в том числе по эффективно-

сти очищения почвы и изменению концентрации отдельных алканов в остаточной нефти.

Целью исследования было изучение биодеструкции нефтяных углеводородов в составе нефтешламов Новогрозненского НПЗ имени Н. Анисимова и НПЗ имени А. Шерипова с применением разных способов ремедиации.

### Объекты и методы исследования

В 2022 году заложен полевой эксперимент на участке нефтяного амбара Новогрозненского НПЗ имени Н. Анисимова и НПЗ имени А. Шерипова [Маркарова и др., 2022]. Цель опыта – детоксикация нефтешлама и подготовка почвогрунта к заселению высшими растениями.

Опыт включал пять вариантов: 1 – контроль; 2 – обработка нефтешлама биопрепаратом нефтеокисляющего действия МБК-А; 3 – внесение в почву измельченной соломы, целлюлозолитического консорциума ТД и МБК-А; 4 – обработка нефтешлама биопрепаратом нефтеокисляющего действия МБК-А и укрывание участка пленкой П; 5 – внесение в почву измельченной соломы С, обработанной целлюлозолитическим консорциумом и МБК-А, укрывание участка пленкой (спанбондом).

МБК-А – это экспериментальный консорциум бактерий углеводородокисляющего действия, относящихся к родам *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, выделенных непосредственно из проб нефтешлама экспериментального участка. Для опыта бактерии выращивали на жидких полусинтетических средах, содержащих стерильный нефтешлам с экспериментального участка, в условиях интенсивной аэрации. Титр живых клеток в рабочем растворе составлял не менее  $2-4 \times 10^9/1$  мл. Расход 1 литр на 4 м<sup>2</sup>.

Целлюлозолитический консорциум ТД представляет собой споровую форму природного гриба *Trichoderma lignorum*, для опыта его выращивали на субстрате из пропаренной пшеницы в условиях твердофазной ферментации. Использование ТД было обусловлено необходимостью разрушения целлюлозы в составе соломы, использованной в вариантах 3 и 5. Внесение соломы в опытный субстрат является одним из предложенных авторами элементов технологии переработки нефтешламов, роль которого состоит в разрыхлении нефтешламовых отходов и увеличении их гидрофильности и аэрофильности.

В грунт всех вариантов при закладке опыта внесено минеральное удобрение азофоска N<sub>16</sub>P<sub>16</sub>K<sub>16</sub> из расчета 60 кг действующего вещества на 1 га. Выбор удобрения нитроаммофоска с концентрацией действующих веществ по азоту, фосфору и калию по 16 % обусловлен активизацией биологического окисления нефти почвенными микроорганизмами. Известно [Пиковский и др., 2015; Гузев, Левин 1991], что для разложения углеводородов требуется присутствие азота, фосфора и калия, которые участвуют в процессах клеточного метаболизма в том числе и нефтеокисляющих бактерий при потреблении ими углеводородов нефти.

Доза удобрения 60 кг действующего вещества на 1 га была давно принята в работах по рекультивации земель и считается рекомендованной при проведении рекультивации загрязненных нефтью земель, включена в нормативные документы (например, ГОСТ Р 57447—2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Основные положения»).

Через год после закладки опыта пробы анализируют по показателям концентрации нефти и нефтепродуктов, ПАУ и численности микофлоры отдельных трофических групп [Маркарова и др., 2023]. В 2024 году проведена оценка структуры фракции нормальных алканов и изоалканов в составе остаточной нефти. Наблюдения продолжили в лабораторно-вегетационном опыте, провели высеv тестовых трав (использовали горчицу красную), состав алкановой фракции оценили через 4 месяца после высева растений.

Определение содержания нефтеуглеводородов в почве осуществляли гравиметрическим методом в соответствии с ПНДФ 16.1.41-04 (ПНДФ 16.1.41-04 Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом), массовую долю ПАУ по М76 ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09. Определение структуры алкановой фракции проводили хроматографическим методом [Груздев, 2022].

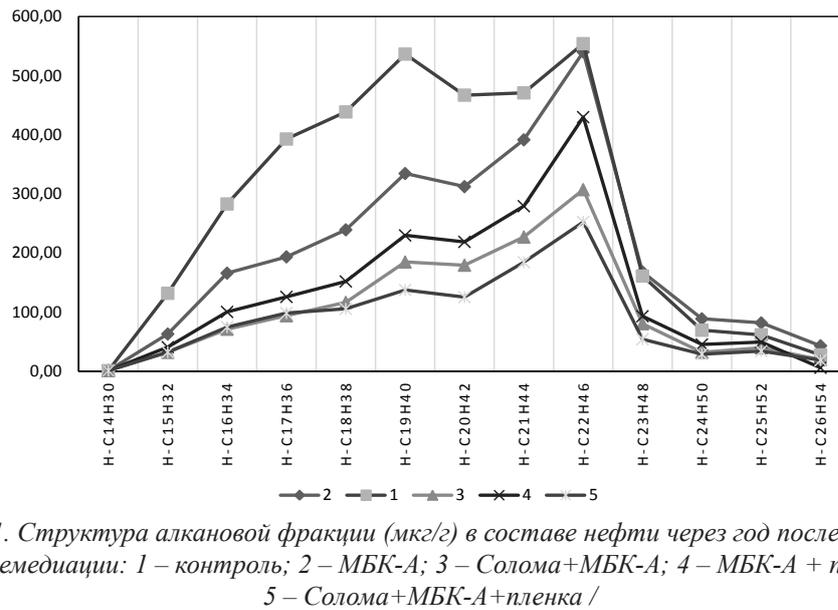
Численность группы углеводородокисляющей микрофлоры (УОМ) определена в соответствии с методами почвенной микробиологии [Методы почвенной ..., 1991].

### Результаты и обсуждение

В 2023 году провели оценку эффективности примененных методов биоремедиации по снижению массовой доли ПАУ и нефтепродуктов в полевом опыте. Было показано [Маркарова и др., 2023], что наиболее эффективная очистка почвогрунтов и снижение массовой доли различных ПАУ были в вариантах с соломой и биопрепаратом. За 10 месяцев при однократной обработке почвогрунтов концентрация загрязнения снижалась на 50–70%, доля высокотоксичных ПАУ, в том числе бенз(а)пирена, в 2 раза. Это закономерно снижало и показатели фитотоксичности.

В 2024 году в опытные почво-грунты высеяли семена горчицы красной. Горчица красная широко применяется в практике сельскохозяйственного производства как зеленое удобрение (сидерат). В нашем опыте она использована с целью улучшения водно-физических и агрохимических свойств загрязненного грунта, а также для активизации комплекса микробиоты, участвующей в разрушении сложных высокомолекулярных соединений в составе остаточной нефти. Считается, что именно они могут включаться в процессы почвообразования и переходить в гуминовые соединения, что позволяет сохранить углерод нефти в почве, но уже в качестве почвенного органического вещества. При проведении работ по рекультивации загрязненных нефтью земель этап фиторемедиации является важным элементом ускорения очищения и восстановления природных свойств почвы. Как было показано ранее [Маркарова и др., 2023], уровень фитотоксичности почвы после проведения ремедиации снизился до значений, приемлемых для развития растений.

Считается, что алкановая фракция в составе нефти наиболее доступна для микробной атаки и первой подвергается разрушению при биоремедиации. Оценка структуры алкановой фракции в опыте до высева трав и через 4 месяца показала следующее. Если до высева трав наибольшая концентрация алканов с длиной цепи от 14 до 26 атомов углерода характеризовала контрольную пробу (рис. 1), а наименьшая их концентрация была в варианте с укрывным материалом, соломой и биопрепаратом, то через 4 месяца выращивания растений картина сильно изменилась.

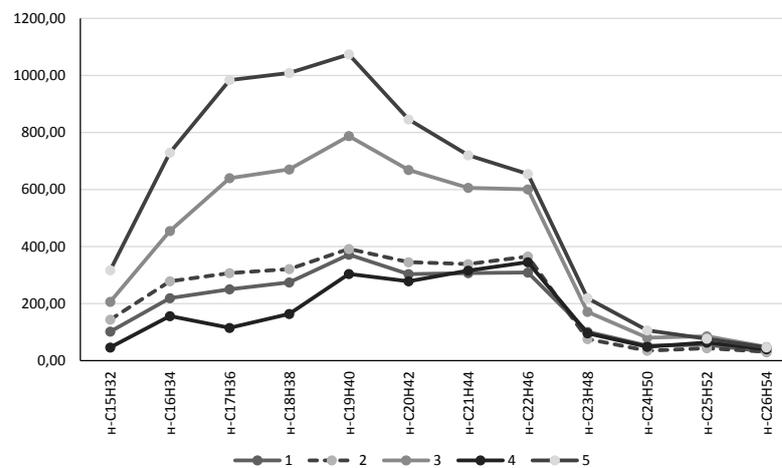


*Рис. 1. Структура алкановой фракции (μg/g) в составе нефти через год после начала биоремедиации: 1 – контроль; 2 – МБК-А; 3 – Солома+МБК-А; 4 – МБК-А + пленка; 5 – Солома+МБК-А+пленка /*

*Fig. 1. Structure of the alkane fraction (μg/g) in the oil one year after the start of bioremediation: 1 – control; 2 – MBK-A; 3 – Straw+MBK-A; 4 – MBK-A + spunbond; 5 – Straw+MBK-A+spunbond*

Бактериальный консорциум в составе биопрепарата МБК-А продуцирует биосурфактанты, которые, как отмечает ряд авторов, стимулируют разрушение многих соединений нефти за счет поверхностно-активного эффекта, усиливающего доступность сложных углеводородов нефтеокисляющему консорциуму почв [Jorfi et al., 2013; Lv et al., 2022; Sar et al., 2023].

Ряд авторов в своих исследованиях отмечают, что анаэробное разложение парафинов происходит с полной их трансформацией в метан [Liu et al., 2020]. В нашем опыте в частично анаэробных стартовых условиях в варианте с укрывным материалом, соломой и биопрепаратом массовая доля парафинов с длиной цепи C14-C20 выросла в 1,5–2,0 раза (рис. 2, 3), в варианте почвы, ранее рекультивированной под спанбондом с биопрепаратом концентрация снизилась в 4 раза, особенно в ряду C15-C20.



*Рис. 2. Структура алкановой фракции (μg/g) через 4 месяца после высева трав: 1 – контроль; 2 – МБК-А; 3 – Солома+МБК-А; 4 – МБК-А + пленка; 5 – Солома+МБК-А+пленка /*

*Fig. 2. Structure of the alkane fraction (μg/g) 4 months after sowing grasses: 1 – control; 2 – MBK-A; 3 – Straw+MBK-A; 4 – MBK-A + spunbond; 5 – Straw+MBK-A+spunbond*

В контрольной пробе было незначительное, на 25–30%, снижение массовой доли алканов с длиной цепи C20-C22. В почве опыта без укрывного материала с соломой и биопрепаратом произошло снижение доли алканов с длиной цепи C21-C26 (рис. 3).

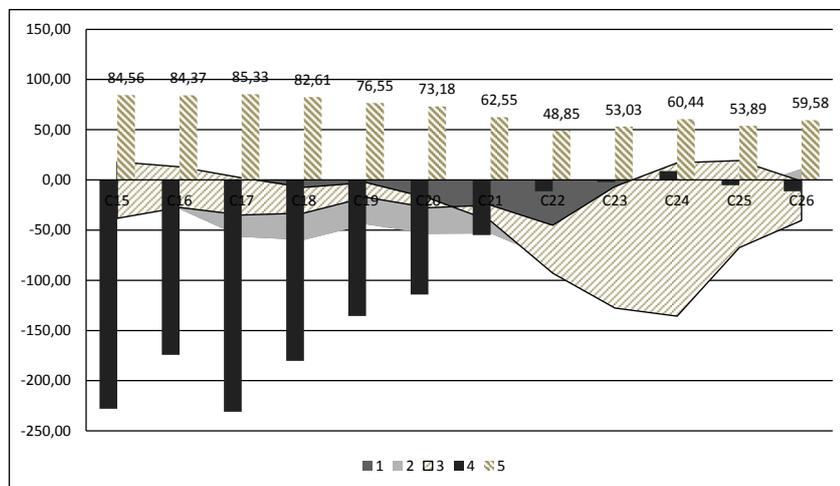


Рис. 3. Изменение концентрации n-алканов (%) в составе остаточной нефти через 4 месяца после высева трав: 1 – контроль; 2 – МБК-А; 3 – Солома+МБК-А; 4 – МБК-А + пленка; 5 – Солома+МБК-А+пленка /

Fig. 3. Change in n-alkanes concentration (%) in residual oil 4 months after sowing grasses: 1 – control; 2 – MBK-A; 3 – Straw+MBK-A; 4 – MBK-A + spunbond; 5 – Straw+MBK-A+spunbond

Аналогичная картина наблюдалась и при трансформации изопреноидов (рис. 4). В контрольном варианте их концентрация осталась почти неизменной, во всех остальных за 4 месяца опыта выросла от 2-х до 6 раз.

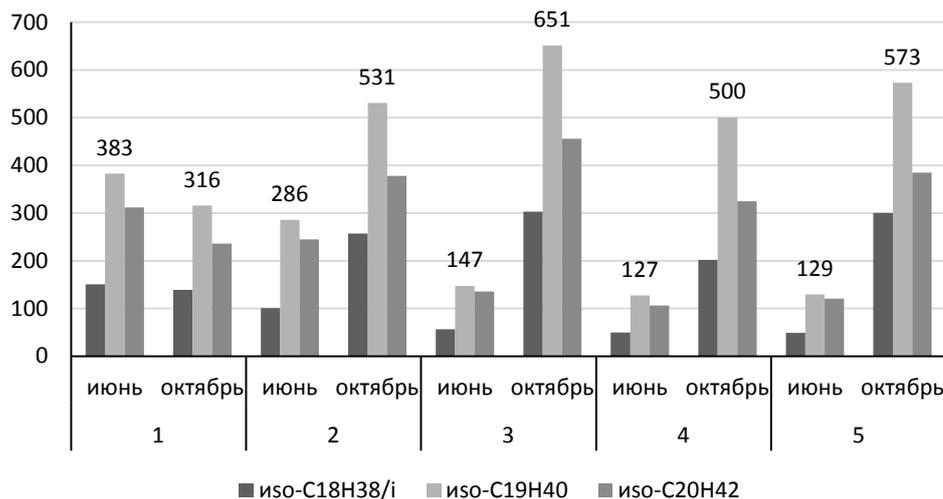


Рис. 4. Трансформация изопреноидов (µg/g) в опыте через 4 месяца после высева трав: 1 – контроль; 2 – МБК-А; 3 – Солома+МБК-А; 4 – МБК-А + пленка; 5 – Солома+МБК-А+пленка /

Fig. 4. Transformation of isoprenoids (µg/g) in the experiment 4 months after sowing grasses: 1 – control; 2 – MBK-A; 3 – Straw+MBK-A; 4 – MBK-A + spunbond; 5 – Straw+MBK-A+spunbond

Снижение массовой доли алкановой фракции обычно расценивают как результат активной жизнедеятельности микробиоты, отвечающей за разрушение легких

нефтеуглеводородов. А с учетом ранее полученных эффектов от примененных методов ремедиации такие данные нелогичны.

Однако результаты становятся понятными после оценки изменения концентрации остаточной нефти (табл. 1) и активности нефтеокисляющей микробиоты (рис. 5) во время вегетационного опыта.

В частично анаэробных условиях в проведенном нами опыте показано, что применение укрывного материала и структуратора, наряду с биопрепаратом нефтеокисляющего действия и на фоне развития растительности в наибольшей степени ускорило разрушение тяжелых соединений нефти, что в свою очередь привело к образованию новых промежуточных легких соединений.

*Таблица 1 / Table 1*

**Концентрация нефтеуглеводородов в почвогрунте опытных вариантов /  
Concentration of petroleum hydrocarbons in soil and ground  
of experimental variants**

№	Наименование варианта / Name of variant	Октябрь / October 2023 г.	Июнь / June 2024 г.	Эффективность очистки почвы от нефти / Efficiency of soil cleaning from oil	Эффективность от контроля / Efficiency from control
		мг/г		%	кратность
1	контроль без обработки / untreated control	300	240	20	0
2	обработка почвы МБК «А» / MBK «A» soil treatment	150	70	53	1,67
3	внесение в почву соломы и МБК «А» / application of straw, MBK «A»	120	15	88	3,38
4	обработка почвы МБК «А» и укрывание площадки пленкой / application of straw and MBK «A» to the soil	125	48	62	2,08
5	внесение в почву соломы, МБК «А» и укрывание площадки пленкой / application of straw, MBK «A» into the soil and covering the site with film	110	23	79	2,95

Наибольшая стартовая активизация микробиоты в опыте была характерна для варианта без укрывного материала с биопрепаратом и соломой, поскольку почва была в лучших условиях по аэрации (рис. 5). Именно в данном варианте прошло максимально эффективное разрушение парафиновой фракции (рис. 3).

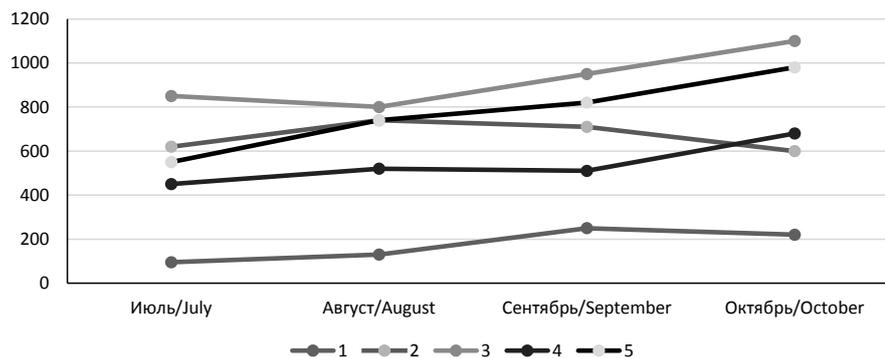


Рис. 5. Динамика численности нефтеокисляющих микроорганизмов в почве опыта (тыс. КОЕ/1 г в.с.п). 1 – контроль; 2 – МБК-А; 3 – Солома+МБК-А; 4 – МБК-А + пленка; 5 – Солома+МБК-А+пленка /

Fig. 5. Dynamics of oil-oxidizing microorganisms in the experimental soil (thousand colonies/1 g of air-dry soil): 1 – control; 2 – MBK-A; 3 – Straw+MBK-A; 4 – MBK-A + spunbond; 5 – Straw+MBK-A+spunbond

С точки зрения полного очищения почвы от нефти этот способ очищения почвы и почвогрунта из нефтешламохранилищ более эффективен для ремедиации. С позиций декарбонизации и сохранения углерода в почве, перехода его в почвенную составляющую более предпочтительным будет использование укрывного материала, поскольку он создает условия для более глубокой трансформации тяжелых и трудноразрушаемых фракций нефти, а значит и возрастают шансы на более качественную очистку почвы с эффектом улучшения ее плодородия.

## ВЫВОДЫ

Проведенный опыт показал, что биологические методы активизации нефтеокисления в составе нефтеотходов объектов исторических загрязнений могут быть эффективными при использовании таких приемов, как обработка биопрепаратами нефтеокисляющего действия наряду со структураторами с последующей фиторемедиацией. В аэробных условиях доля легких парафинов, в том числе высвобождающихся при биодеструкции тяжелых фракций, достаточно быстро потребляется почвенными нефтеокисляющими микроорганизмами и удаляется из почвы путем вымывания или испарения. Эффективность этого приема на стадии фиторемедиации может достигать 85–90% очистки почвогрунтов от нефти. С учетом высокой плотности и гидрофобности нефтешлама использование структураторов и разрыхлителей является необходимым условием активизации почвенного нефтеокисляющего пула. Разница в эффективности нефтеокисления с соломой и без нее была в наших опытах двукратной.

При разложении тяжелых углеводородов в ограниченно аэробных условиях за счет активизации биологического нефтеокисления происходит временное увеличение доли легких парафинов в составе остаточной нефти. Перспективность использования методов частично анаэробного нефтеокисления при использовании укрывного материала, определяется в первую очередь возможностью глубокой трансформации нефтепродуктов в почвенный углерод с перспективой повышения показателей почвенного плодородия и увеличения эффекта декарбонизации после нефтяных загрязнений.

## Литература

1. Вобликов Б.Г., Калашник Ж.В., Усманов А.Х., Корнилов Ю.В. Проблемы экологической безопасности и способы рекультивации земель, загрязненных нефтепродуктами в Чеченской республике. // Вестник АГТУ. – 2011. – Т. 52. № 2 – С. 73–77.
2. ГОСТ Р 54003-2010. Экологический менеджмент. Оценка прошлого накопленного в местах дислокации организаций экологического ущерба. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2011. – 25 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Чеченской Республики в 2021 году». Грозный: МИНПРИРОДЫ ЧР, 2020. – 205 с.
4. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Чеченской Республики в 2013 году» составлен под руководством Заместителя министра природных ресурсов и охраны окружающей среды ЧР А.М. Джайрханова». Грозный, 2014.
5. Груздев И.В. Анализ объектов окружающей среды хроматографическими методами. Практикум: учебное пособие. Сыктывкар: СГУ им. Питирима Сорокина, 2022. – 65 с.
6. Гузев В.С., Левин С.В. Перспективы эколого-микробиологической экспертизы состояния почв при антропогенном воздействии. // Почвоведение. – 1991. – № 9. – С. 50–62.
7. Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Керимов И.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.
8. Маркарова М.Ю., Махмудова Л.Ш., Мамадиев Н.А., Дускаев М.З., Гагаева З.Ш. Детоксикация углеводородов в составе нефтешлама на объектах исторических загрязнений Чеченской республики. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. № 4 (34). – С. 65–70.
9. Методы почвенной микробиологии и биохимии. / Под редакцией Д.Г. Звягинцева, М.: МГУ, 1991. – 304 с.
10. Пиковский Ю.И., Исмаилов Н.М., Дорохова М.Ф. Основы нефтегазовой геоэкологии. / Под редакцией А.Н. Геннадиева. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 399 с.
11. Чеченская Республика в цифрах. Краткий статистический сборник. / Под редакцией Р.Д. Дигаев, А.Х. Магомадова, Х.С. Абушева, Л.Э. Шагидаева, Л.А.-С. Магомадова, С.А.-А. Чуликова. Грозный: Чеченстат, 2019. – 168 с.
12. Экологически нестабильные территории Чеченской Республики должны быть ликвидированы. // Промышленная и экологическая безопасность и охрана труда. – 2013. – Т. 85. № 11. – С. 14–17.
13. Bioremediation and phytoremediation technologies in sustainable soil management. Vol. 3: Inventive Techniques, Research Methods, and Case Studies. / Eds. J.A. Malik, M.R. Goyal. – New York: Academic Press, 2022. – 550 p.
14. Zhang B., Zhang L., Zhang X. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. // The Royal Society of Chemistry. – 2019. – № 9. – pp. 35304–35311.
15. Koshlaf E., Ball A.S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. // AIMS Microbiology. – 2017. – Vol. 3. No. 1. – pp. 25–49.
16. Youse K., Mohebb A., Pichtel J. Biodegradation of weathered petroleum hydrocarbons using organic waste amendments. // Applied and Environmental Soil Science. – 2021. – Vol. – pp. 1–12.
17. Liu Y.F., Chen J., Liu Z.L., Shou L.B., Lin D.D., Zhou L., Yang S.Z., Liu J.F., Li W., Gu J.D., Mu B.Z. Anaerobic degradation of paraffins by thermophilic actinobacteria under methanogenic conditions. // Environ Science & Technology. – 2020. – Vol. 54. Issue 17. – pp. 10610–10620. DOI: 10.1021/acs.est.0c02071.
18. Nasreen Z., Kalsoom S. Biodegradation of petroleum industry oily sludge and its application in land farming: a review. // International Journal of Environment and Waste Management. – 2018. – Vol. 21. No.1. – pp. 37–57.

19. Sar P., Kundu S., Ghosh A., Saha B. Natural surfactant mediated bioremediation approaches for contaminated soil. // RSC Advances. – 2023. – Vol. 44. No. 13. – pp. 30586–30605.
20. Jorfi S., Rezaee A., Mobeh-ali G.-A., Jaafarzadeh N.A. Application of biosurfactants produced by *Pseudomonas aeruginosa* sp4 for bioremediation of soils contaminated by pyrene. // Soil and Sediment Contamination. – 2013. – Vol. 22. No. 8. – pp. 890–911.
21. Seo J.S., Keum Y.S., Li Q.X. Bacterial degradation of aromatic compounds. International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2009. – Vol. 6. – pp. 278–309.
22. Lv Y., Bao J., Zhu L. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. // Energy Reports. – 2022 – Vol. 8. – pp. 7976–7988.

## References

1. Voblikov B.G., Kalashnik Zh.V., Usmanov A.Kh., Kornilov Yu.V. Problems of environmental safety and methods of reclamation of lands contaminated with oil products in the Chechen Republic. Bulletin of ASTU. 2011. Vol. 52. No. 2. pp. 73–77. (In Russ.)
2. GOST R 54003-2010. Ecological management. Evaluation of the past ecological damage accumulated in places of arrangement of organizations. General principles. Moscow. Standartinform. 2011. 25 p. (In Russ.)
3. The State report “On the state and environmental protection of the Chechen Republic in 2021”. Grozny. Ministry of Natural Resources of the Chechen Republic. 2020. 205 p. (In Russ.)
4. The State report “On the State of the Environment of the Chechen Republic in 2013” was compiled under the leadership of the Deputy Minister of Natural Resources and Environmental Protection of the Chechen Republic A.M. Dzhaikhanov”. Grozny. 2014. (In Russ.)
5. Guzev V.S. Analysis of environmental objects by chromatographic methods. Practicum. Textbook. Syktyvkar. Pitirim Sorokin State University. 2022. 65 p. (In Russ.)
6. Guzev V.S., Levin S.V. Prospects of ecological-microbiological expertise of soil condition under anthropogenic impact. Soil Science. 1991. No. 9. pp. 50–62. (In Russ.)
7. Markarova M.Yu., Makhmudova L.Sh., Kerimov I.A. Analysis of greenhouse gases in oil-contaminated areas and development of methods for their bioremediation (using the example of Grozny). Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 153–168. (In Russ.)
8. Markarova M.Yu., Makhmudova L.Sh., Mamadiev N.A., Duskaev M.Z., Gagaeva Z.Sh. Detoxification of hydrocarbons in oil sludge at historical pollution sites in the Chechen Republic. Grozny Natural Science Bulletin. 2023. Vol.8. No. 4 (34). pp. 65–70. (In Russ.)
9. Methods of soil microbiology and biochemistry. Ed. D.G. Zvyagintsev. Moscow. MSU. 1991. 304 p. (In Russ.)
10. Pikovsky Yu.I., Ismailov N.M., Dorokhova M.F. Fundamentals of oil and gas geoecology. Ed. A.N. Gennadiev. Moscow. INFRA-M. 2015. 399 p. (In Russ.)
11. The Chechen Republic in numbers. Brief statistical collection. Eds. R.D. Digaev, A.Kh. Magomadova, Kh.S. Abusheva L.E. Shagidaeva, L.A.-S. Magomadova, S.A.-A. Chulikova. Grozny. 2019. 168 p. (In Russ.)
12. Ecologically unstable territories of the Chechen Republic should be liquidated. Industrial and environmental safety and labor protection. 2013. Vol. 85. No. 11. pp. 14–17. (In Russ.)
13. Bioremediation and phytoremediation technologies in sustainable soil management. Vol. 3: Inventive Techniques, Research Methods, and Case Studies. Eds. J.A. Malik, M.R. Goyal. New York: Academic Press. 2022. 550 p.
14. Zhang B., Zhang L., Zhang X. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. The Royal Society of Chemistry. 2019. № 9. pp. 35304–35311.
15. Koshlaf E., Ball A.S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. AIMS Microbiology. 2017. Vol. 3. No. 1. pp. 25–49.

16. Youse K., Mohebb A., Pichtel J. Biodegradation of weathered petroleum hydrocarbons using inorganic waste amendments. *Applied and Environmental Soil Science*. 2021. Vol. pp. 1–12.
17. Liu Y.F., Chen J., Liu Z.L., Shou L.B., Lin D.D., Zhou L., Yang S.Z., Liu J.F., Li W., Gu J.D., Mu B.Z. Anaerobic degradation of paraffins by thermophilic actinobacteria under methanogenic conditions. *Environ Science & Technology*. 2020. Vol. 54. Issue 17. pp. 10610–10620. DOI: 10.1021/acs.est.0c02071.
18. Nasreen Z., Kalsoom S. Biodegradation of petroleum industry oily sludge and its application in land farming: a review. *International Journal of Environment and Waste Management*. 2018. Vol. 21. No.1. pp. 37–57.
19. Sar P., Kundu S., Ghosh A., Saha B. Natural surfactant mediated bioremediation approaches for contaminated soil. *RSC Advances*. 2023. Vol. 44. No. 13. pp. 30586–30605.
20. Jorfi S., Rezaee A., Mobeh-ali G.-A., Jaafarzadeh N.A. Application of biosurfactants produced by *Pseudomonas aeruginosa* sp4 for bioremediation of soils contaminated by pyrene. *Soil and Sediment Contamination*. 2013. Vol. 22. No. 8. pp. 890–911.
21. Seo J.S., Keum Y.S., Li Q.X. Bacterial degradation of aromatic compounds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2009. Vol. 6. pp. 278–309.
22. Lv Y., Bao J., Zhu L. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. *Energy Reports*. 2022 Vol. 8. pp. 7976–7988.

УДК 550.34.013.2:551.2 (479-924.73)

DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

Оригинальная статья

## Трехмерные геоэкологические модели при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа

И.Ю. Матасова <sup>1</sup>, Н.А. Яицкая <sup>2</sup>, М.А. Модина <sup>1</sup>, В.С. Бригида <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: semigorie@mail.ru, marishamodina@yandex.ru;

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр "Субтропический научный центр РАН", Россия, 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, e-mail: yaitskayan@mail.ru, 1z011@inbox.ru

Статья поступила: 28.06.2024, доработана: 26.08.2024, принята к публикации: 06.09.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Изменение климата и связанные с ним экономические последствия усиливают геоэкологические риски вдоль Черноморского побережья Кавказа, при этом особенно страдает субтропическая зона России. Хотя этот регион обладает большим потенциалом для развития пляжного туризма, здесь все чаще реализуются опасные гидрометеорологические явления высокой степени интенсивности. Для обеспечения устойчивого развития прибрежной инфраструктуры и реализации эффективных мер по защите береговой линии важно точно прогнозировать межгодовую изменчивость и экстремальные колебания уровня Черного моря. **Цель исследований** – совершенствование методов формирования трехмерных геоэкологических моделей при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа. **Методика исследований** заключалась в использовании комплексного подхода, объединяющегося в анализе существующей литературы с данными Единой государственной информационной системы для создания базы данных уровня Черного моря (по посту г. Сочи). Значения уровня моря статистически обрабатывались и дополнялись с помощью трехмерной интерполяции. Формирование трехмерных моделей осуществлялось в программе Gnuplot, а регрессионных моделей (для двумерной постановки задачи) – в MS Excel методом наименьших квадратов. **Результатами исследования** стала разработка авторского подхода к обработке долгосрочных временных рядов данных, позволяющего существенно видоизменить подходы к формированию трехмерных геоэкологических моделей. В результате установлено, что для каждого 1-го и 5-го года роста времени наблюдения с 1927 по 2017 гг. приводит к росту уровня Черного моря, по полиномиальному закону на 5,4 %. При этом большая часть из этого роста приурочена к последним 20-ти годам. Дальнейшие исследования следует вести в направлении эффективной интеграции авторского подхода в геостатистический анализ для совершенствования ГИС технологий.

**Ключевые слова:** повышение уровня моря, побережье Черного моря, 3D модели, временные ряды, изменение климата, глобальная эффективность использования ресурсов, сохранение, экологическая устойчивость, водные экосистемы, водные ресурсы.

**Для цитирования:** Матасова И.Ю., Яицкая Н.А., Модина М.А., Бригида В.С. Трехмерные геоэкологические модели при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 217-229. DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

Original paper

## Three-dimensional geoecological models in forecasting sea level on Black Sea coast of Caucasus

I.Yu. Matasova <sup>1</sup>, N.A. Yaitskaya <sup>2</sup>, M.A. Modina <sup>1</sup>, V.S. Brigida <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Admiral Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossisk 353924, Russian Federation, e-mail: semigorie@mail.ru, marishamodina@yandex.ru;

<sup>2</sup> Federal Research Centre, Subtropical Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabriciusa Str., Sochi 354002, Russian Federation, e-mail: yaitskayan@mail.ru, 1z011@inbox.ru

Received: 28.06.2024, revised: 26.08.2024, accepted: 06.09.2024

**Abstract: Relevance.** Climate change and its associated economic consequences are intensifying geoecological risks along the Black Sea coast of the Caucasus, with the subtropical zone of Russia being particularly affected. Although this region has great potential for coastal tourism development, it is increasingly experiencing dangerous hydrometeorological phenomena of high intensity. To ensure sustainable development of coastal infrastructure and implement effective measures to protect the coastline, it is important to accurately predict inter-annual variability and extreme fluctuations in the Black Sea level. **The aim** of the research is to improve methods for forming three-dimensional geoecological models when forecasting sea levels on the Black Sea coast of the Caucasus. **The methods** involved using a comprehensive approach, combining the analysis of existing literature with data from the Unified State Information System to create a database of the Black Sea level (for the city Sochi post). Sea level values were statistically processed and supplemented using three-dimensional interpolation. The formation of three-dimensional models was carried out in the Gnuplot program, and regression models (for two-dimensional problem formulation) were created in MS Excel using the least squares method. **The research resulted** in the development of an author's approach to processing long-term time series data, which allows for a significant modification of approaches to the formation of three-dimensional geoecological models. As a result, it was established that for every 1st and 5th year, the increase in observation time from 1927 to 2017 leads to an increase in the Black Sea level, following a polynomial law, by 5.4%. Most of this growth is attributed to the last 20 years. Further research should be conducted in the direction of effective integration of the author's approach into geostatistical analysis for the improvement of GIS technologies.

**Keywords:** sea level rise, Black Sea coast, 3D models, time series, climate change, global resource efficiency, conservation, ecological Resilience, aquatic ecosystems, water resource.

**For citation:** Matasova I.Yu., Yaitskaya N.A., Modina M.A., Brigida V.S. Three-dimensional geoecological models in forecasting sea level on Black Sea coast of Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 217-229. DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

### Введение

Последствия климатических изменений, наряду с неблагоприятными экономическими последствиями, обуславливают рост геоэкологических рисков вдоль Черноморского побережья Кавказа, особенно в субтропической зоне России [Бригида и др., 2020; Nuriev et al., 2023]. Эта территория имеет значительный потенциал

для развития пляжного туризма, при этом с каждым годом сталкиваясь с ростом частоты и масштабов негативных проявлений опасных гидрометеорологических процессов. Увеличение количества осадков и штормовых нагонов представляют угрозу не только прибрежным экосистемам и ценным рекреационным ресурсам, но и городской инфраструктуре в целом. Прогнозирование межгодовой динамики и экстремальных колебаний уровня Черного моря имеет решающее значение для разработки устойчивой инфраструктуры, а также берегоукрепительных и гидротехнических сооружений.

На современном этапе научного понимания природных процессов в геосредах используются разнообразные методы моделирования. При этом качество используемых данных, особенно для гидрологических задач, имеет первостепенное значение [Gutarevich et al., 2023; Karpov et al., 2024; Hristova, 2024]. Авторы отмечают, что повышение точности пространственного разрешения цифровой модели рельефа существенно увеличивает требуемую вычислительную мощность. В связи с этим, многие трехмерные гидродинамические модели водных объектов служат в первую очередь вспомогательным инструментом для специалистов-океанологов. Аналогичный сценарий наблюдается при оценке влияния климатических параметров холодного периода года на интенсификацию деформационных процессов в природно-технических системах [Klyuev et al., 2023; Sun et al., 2023]. Тем не менее, предпочтение двумерной постановке распространяется на более широкий круг задач, включая анализ протяженных временных рядов данных, несмотря на потенциальные преимущества многомерных моделей [Zaalishvili et al., 2022; Rezanov et al., 2022; Dzhioeva, 2022]. Например, для прогнозирования сезонной и межгодовой изменчивости уровня Черного моря продолжают определять характеристики линейных трендов с использованием двумерных моделей. При этом использование метода «Autoregression of the integrated moving average» (ARIMA) сопряжено с получением около 15,92% ошибок модельных данных [Zaalishvili et al., 2022]. В географических задачах подобные вопросы решаются в трехмерной постановке с использованием ГИС-технологий на основе стохастических методов (гауссовских процессов). Кроме алгоритмов «крикинга», для трехмерной интерполяции используется метод «взвешивания по обратному расстоянию» (IDW) или сплайновая интерполяция. Бурный рост использования методов машинного обучения, например нейронных сетей, начался относительно недавно. В то же время, обоснованность их применения требует более тщательного изучения [Viktorov, Gibadullin, 2023; Pavlov et al., 2024].

Одной из отличительных характеристик процессов протекающих в геосредах является сложное взаимодействие изменений различных масштабов в сочетании с цикличностью и нелинейностью характера их проявлений. Несмотря на развитие отдельных методов моделирования, сохраняются серьезные проблемы, особенно в вопросах геодинамического районирования и локализации сейсмически опасных зон. Метод ближайшего соседа («Nearest Neighbor») успешно используется для изучения изменчивости и различий афтершоков при декластеризации пространственно-распределенных рассеянных данных. В области материаловедения, при оценке механохимических процессов успешно применяется сплайновая интерполяция [Efremenkov, Shanin, 2023; Mhanna, Hussein et al., 2024].

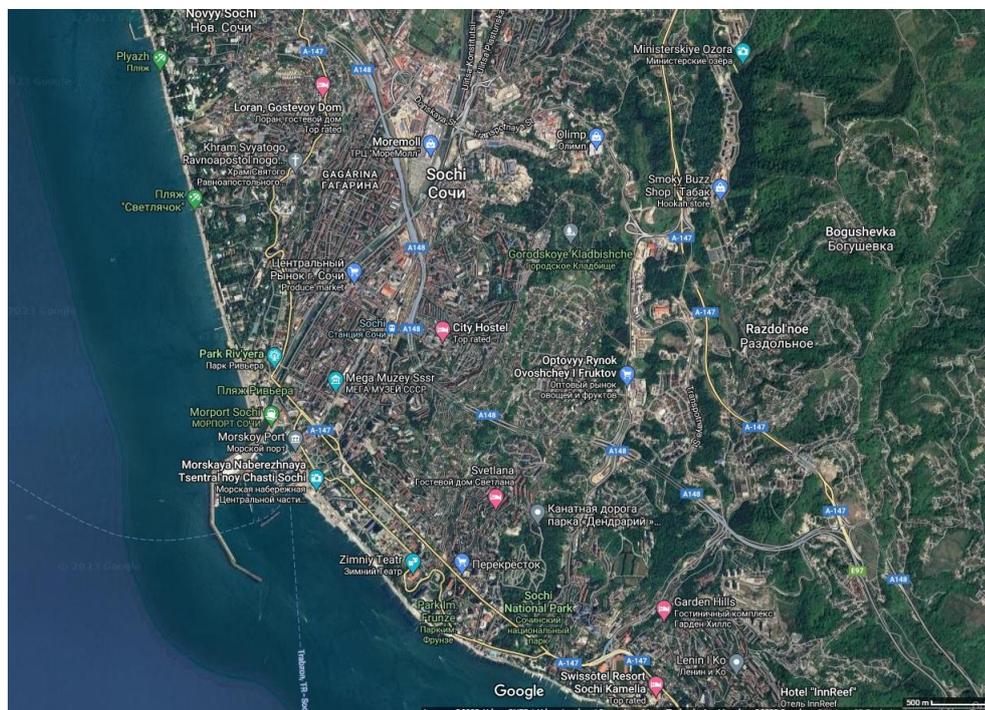
Если подходы к моделированию волнового климата морей достаточно развиты и освящены, влияние фактора межгодовой и внутригодовой изменчивости остается

не до конца изученным. Помимо простого затопления и разрушения территорий, повышение уровня моря является одним из факторов, который в значительной степени влияет на увеличение энергетического потенциала штормов. Чем больше глубина на подходе к берегу, тем меньше влияние рефракции волн и тем мощнее волны, ударяющиеся о берег. Полевые исследования показывают, что наибольшей продуктивностью для пляжного туризма (по ширине) обладают только около 10,38% от всей береговой линии г. Сочи. Кроме того, 54,92% береговой линии представляют собой пляжи с низкой продуктивностью (шириной менее 20 метров), что обуславливает необходимость приложения значительных усилий в области строительства новых берегоукрепительных гидротехнических сооружений. В этой связи совершенствование методологии прогнозирования уровня Черного моря, как основы для доказательства существования негативных проявлений климатических изменений на Черноморском побережье Кавказа, является важной научной задачей.

Цель работы – совершенствование методов формирования трехмерных геоэкологических моделей при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа. Для ее достижения решались следующие задачи: оценка межгодовой динамики уровня Черного моря в двумерной постановке задачи; разработка трехмерных статистических моделей изменчивости уровня Черного моря.

### Методы исследования

Объект исследования – наблюдательная станция, расположенная в г. Сочи. ( $43^{\circ}34'38.2$  N  $39^{\circ}43'12.0$  E, рис. 1).



*Рис. 1. Расположение измерительного поста (43.577287, 39.720004 Copyright © Google Earth) /*

*Fig. 1. Location of measuring post (43.577287, 39.720004 Copyright © Google Earth)*

В основе работы применен комплексный подход включающий: анализ литературных источников; формирование базы данных об уровне Черного моря (район

г. Сочи) на основе Единой государственной системы информации; использование трехмерной интерполяции для статистической обработки значений уровня моря в ПО «gnuplot» [Ma et al., 2024; Malyukova et al., 2023] использование метода наименьших квадратов для построения регрессионных моделей в MS «Excel» [Brigida, Zinchenko, 2014; Конгар-Сюрюн, Ковальский, 2023].

### Результаты работы и их обсуждение

*Оценка межгодовой динамики уровня Черного моря в двумерной постановке задачи.*

Климатические изменения и их влияние на трансформацию природных процессов в геосредах с трудом поддаются упрощению в виде двумерной постановки задачи. Хронологический ход уровня моря по посту Сочи в виде графика рассеянных данных, начиная с 1926 г. представлен на рис. 2.

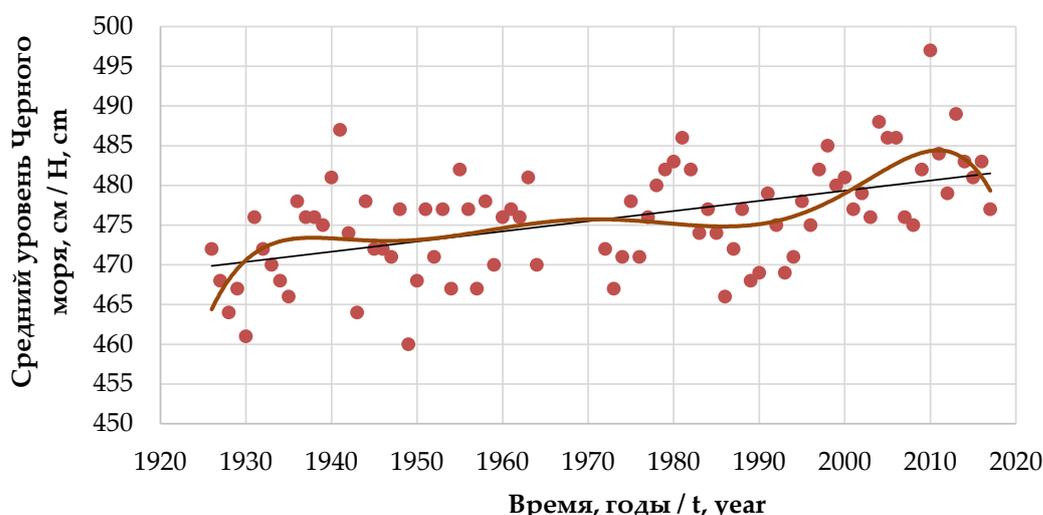


Рис. 2. Хронологический ход среднего уровня Черного моря по данным Сочинского поста (1925–2017 гг.) и его линейный и полиномиальный тренды /

Fig. 2. Chronological course of average level of the Black Sea according to the Sochi post (1925–2017) and its linear and polynomial trends

Параметры и общий вид формул для линейного и полиномиального (6 степени) видов регрессионных моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

#### Параметры регрессии / Regression parameters

R <sup>2</sup>	Формула / Formula	
0,3596	$H = -7E - 09t^6 + 8E - 05t^5 - 0,3918t^4 + 1029,2t^3 - 2E + 06t^2 + 1E + 09t - 4E + 11$	(1)
0,2769	$H = 0,1278t + 223,72$	(2)

Анализ коэффициентов детерминации в таблице 1 показывает, что традиционный подход двумерных временных рядов недостаточно представительно отражает динамику изменения уровня моря. Однако данные ясно показывают линейное повышение уровня моря, особенно заметное с 1980-х годов. Для повышения точности и надежности полученных моделей, методология исследования подразумевала разделение всего набора данных на пятилетние сегменты (где m – номер года внутри

пятилетних интервалов;  $N$  – номер пятилетнего интервала, при разбиении всего временного ряда начиная с 1927 г.). Например, 1932 год имеет параметры:  $m = 1$ ;  $N = 2$  (то есть он является первым по счету годом во втором пятилетнем интервале). Свертка временного ряда, таким образом, позволит представить двумерный массив данных в виде трехмерной структуры.

*Трехмерные статистические модели изменчивости уровня Черного моря.* Основой исследований являлись данные (начиная с 1927 г.) по замерному посту г. Сочи. Для оценки динамики временного ряда в простейшем случае к стандартной задаче применялась попарная оценка по критерию «качество-надежность» («goodness-of-fit»). Качество моделей определялось по углу отклонения линейного тренда от стандартной оптимальной линии на квартильно-четвертных графиках остаточного анализа (Q-Q диаграмм). Авторский подход заключался в том, чтобы оценить качество сплайн-подгонки поверхности отклика к интерполированным данным в зависимости от типа алгоритма интерполяции (Watson, Akima или Renka) и сравнить его с базовым случаем. Разделение временного ряда на пятилетние интервалы позволило ввести новый параметр (количество интервалов) и сформировать трёхмерную модель («базовый вариант» рис. 3б). После проведения попарных сравнений с использованием Q-Q диаграмм и «анализа остатков» наиболее качественная модель была достигнута при использовании алгоритма R. Renka (рис. 3а).

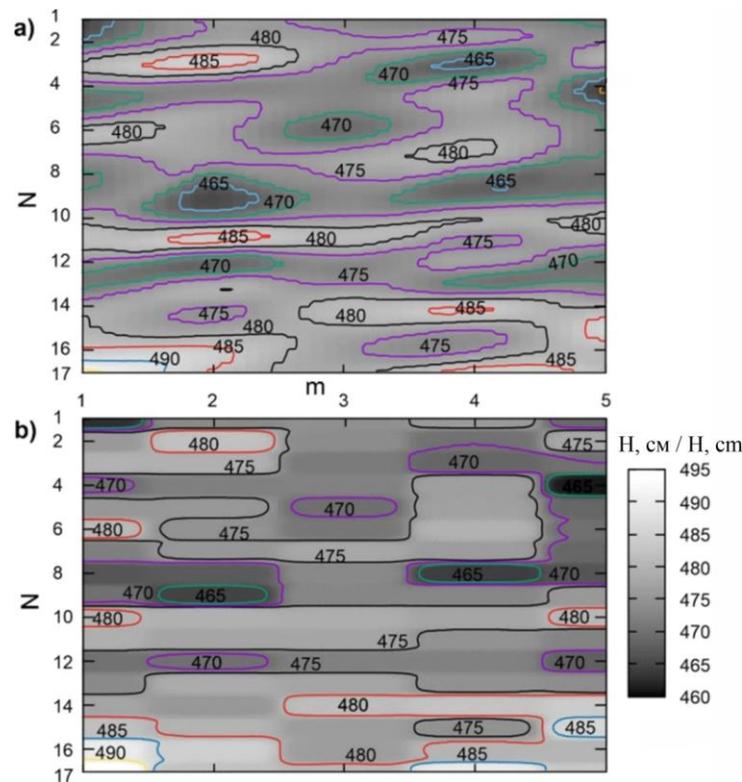


Рис. 3. Проекция динамики уровня Черного моря:  $m$  – номер года внутри пятилетнего интервала;  $N$  – номер пятилетнего интервала; а) – сплайновая аппроксимация поверхности по интерполированным данным по процедуре Р. Ренка, б) – сплайновая аппроксимация «базовый вариант» /

Fig. 3. Projection of Black Sea level dynamics:  $m$  – year number within a five-year interval;  $N$  – five-year interval number; а) – spline approximation of the surface according to interpolated data according to the R. Renck procedure, б) – spline approximation “basic version”

Из анализа рис. 3 следует, что, начиная с 1927 г. (первого года,  $m = 1$ ,  $N = 1$ ) по 2017 г. прослеживалось 17 пятилетних интервалов. Из сравнения проекций поверхности отклика следует, что более сфокусированные очертания площадей локальных экстремумов обуславливают лучшее представление исследованных процессов по сравнению с базовым случаем. Геометрическое представление наиболее представительной модели показано на рис. 4.

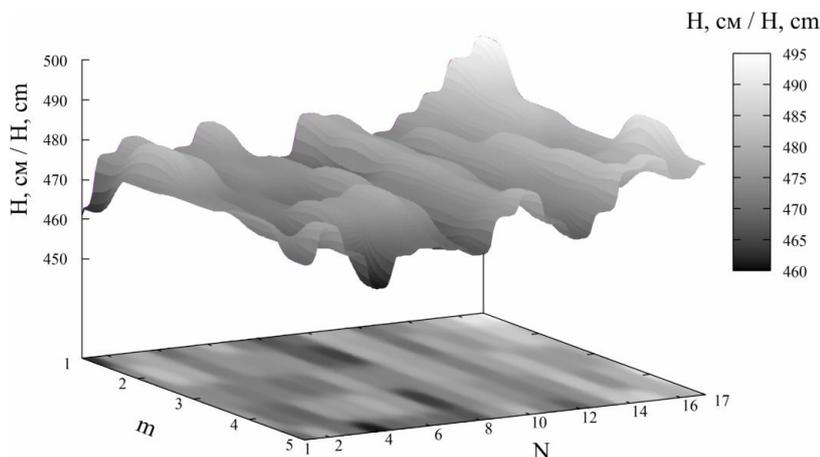


Рис. 4. Модель межгодовой цикличности уровня моря в трехмерной постановке задачи / Fig. 4. Model of interannual sea level cyclicity in a three-dimensional problem statement

Исходя из анализа поверхности отклика представленной на рис. 4. следует, что характер поверхности вдоль значений  $m = 1$  и  $5$  явно свидетельствует о восходящей тенденции уровня Черного моря (рис. 5).

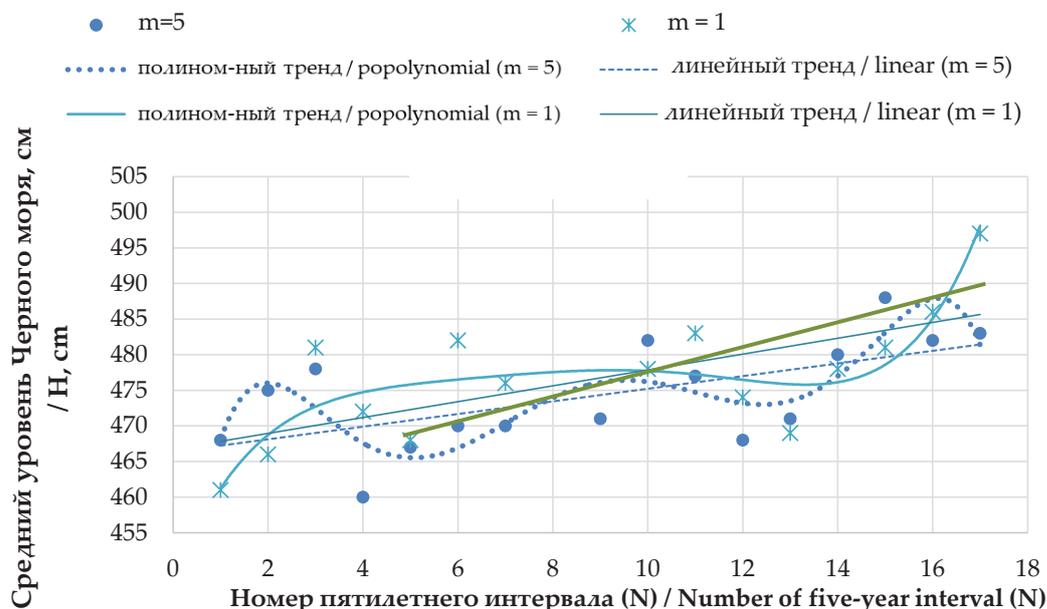


Рис. 5. Модель межгодовой цикличности крайних проекций пятилетних интервалов временного ряда / Fig. 5. Model of interannual cyclicity of edge projections of five-year time series intervals

Параметры и общий вид формул для линейного и полиномиального (6 степени) видов регрессионных моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры регрессии для трехмерной постановки задачи /  
Regression parameters for three-dimensional formulation problem**

m	R <sup>2</sup>	Формула / Formula	
1	0,4457	$H = 1,1137t + 466,7$	(3)
	0,7923	$H = -0,0003t^6 + 0,0156t^5 - 0,3385t^4 + 3,5312t^3 - 18,476t^2 + 46,628t + 428,47$	(4)
5	0,3842	$H = 0,8862t + 466,34$	(5)
	0,677	$H = -0,0005t^6 + 0,0286t^5 - 0,5956t^4 + 5,9454t^3 - 28,891t^2 + 60,995t + 430,66$	(6)

Исходя из анализа коэффициентов детерминации из табл. 2. следует, что рассмотрение пятилетних интервалов протяженных временных рядов приводит к росту коэффициентов детерминации линейных и полиномиальных моделей. При этом уровень R<sup>2</sup> достаточен ( $\geq 0,7$ ) для обеспечения статистической достоверности полиномиальных моделей. Кроме того, рост тангенса угла наклона линейных трендов (при условии трехмерной постановки задачи) довольно существенен (0,89 и 1,11) по сравнению со значением 0,13 для двумерной задачи.

Представленный пример динамики уровня моря для всех значений  $m=3$  (смотри зеленую линию тренда на рис. 5) представлен для «середины» общей модели. Ее общие закономерности имеют подобные черты с кривыми краевых значений (то есть для  $m=1$  и  $m=5$ ), начиная с шестого пятилетнего интервала.

Результаты моделирования, для двумерной постановки задачи (смотри рис. 2), подобны результатам, которые получены для Испанского Средиземноморья и Китайских морей [Cheng et al., 2016; Malozyomov et al., 2023]. Такой же подход по сегментации временных рядов данных по четырем мареографам (Aden, Karachi, Mumbai, and Fremantle) использован в работе [Boretti, 2020]. В подобных работах, как и в нашем случае, линейные тренды используются для первичного определения общих закономерностей динамики исследуемых процессов или служат основой для калибровки при использовании различных алгоритмов обработки данных. При применении диаграмм Тейлора можно получить качественно иные результаты моделирования [Li et al., 2024]. В другом подобном исследовании [Azran et al., 2023; Bryukhanova et al., 2024], только 4 модели были взяты за основу для формирования среднего уровня моря (Малайзия). Дальнейший пространственный анализ приведен в виде картографического распределения уровня моря вдоль побережья, что не позволяет оценить степень достоверности полученных результатов в конкретной точке.

Наиболее близким аналогом авторского подхода для двумерной постановки задачи является «интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего» (ARIMA) [Anwar et al., 2022; Yang et al., 2023b]. Так при анализе уровня приливов на станции Cox's Bazar (Бангладеш) его успешно применяли для заполнения пустот рассеянных данных. После чего использовался алгоритм «полного ансамблевого разложения по эмпирическому моду» (CEEMD) для получения обобщенного тренда. Следует отметить хорошее качество сглаживания данных, для данного подхода, но полученные регрессии обладают худшей прогностической способностью

по критериям «goodness-of-fit». Метод SEEMD в сочетании с использованием нейронных сетей может устранить данный недостаток [Yang et al., 2023a]. Также довольно близким к результатам исследования является использование моделей множественной регрессии с проверкой качества полученных результатов посредством формирования Q-Q графиков. Тем не менее, и в данном исследовании в некоторых точках замера (Pensacola, Флорида) модельные данные имеют существенный разброс значений.

Основным подходом к формированию трехмерных статистических моделей в виде пространственных изменений уровня моря на основе ретроспективного анализа данных является использование ГИС технологий. Основным недостатком работы является использование стохастических алгоритмов интерполяции (крикинга). Ее суть заключается в сложности оценки итоговых моделей, когда интерполянт проходит через экспериментальные точки. Более представительным, по сравнению со стандартными методами геостатистики, выглядит метод Вейвлет-преобразования (*Wavelet analysis*). Наши результаты проекций трёхмерных статистических моделей (смотри рис. 3.) подобны моделям месячных изменений MSLA («monthly mean sea level anomaly») в системе Канарских течений [Marrero-Betancort et al., 2023]. При этом использованная, в нашем случае, свертка временного ряда может быть эффективно интегрирована в более совершенные и масштабные модели. Например, служить заменой менее представительного гармонического анализа временных рядов.

Высокий уровень роста, по сравнению с европейскими исследованиями, по-видимому, связан с высокой геодинамической активностью на Кавказе, которая сопряжена с опусканием некоторых участков береговой линии. Во многих палеогеографических исследованиях [Кизилев, 2023] указывается, что многие крепости на Черноморском побережье Кавказа подверглись затоплению. Например, палеорекострукция крепостей Пицунды [Trebeleva et al., 2021] указывает на ее фактическое частичное затопление, что является косвенным доказательством более высокого роста уровня Черного моря по сравнению с теоретическими моделями.

## Выводы

Учитывая негативные последствия глобального изменения климата, технологического влияния и усиления эрозии из-за повышения уровня моря, крайне важно как на государственном уровне, так и на региональном уровне решать вопросы комплексной защиты береговой линии от эрозии. Это имеет решающее значение для сохранения и приумножения рекреационного потенциала субтропического побережья Кавказа. Выполненные исследования показывают, что при рассмотрении динамики уровня Черного моря в трехмерной постановке задачи обеспечивается рост коэффициентов детерминации полиномиальных регрессионных моделей до статистически значимого уровня. Кроме того, использование интерполяционного алгоритма R. Renka позволяет обеспечить большую надежность моделей, в которых изоповерхности локальных экстремумов обуславливают лучшее представление исследованных процессов. В результате удалось установить, что для краевых значений пятилетних интервалов (то есть для каждого 1-го и 5-го года) рост времени за столетний период (с 1927 по 2017 гг.) приводит к росту уровня Черного моря, по полиномиальному закону на 5,4 %. При этом большая доля роста прослеживается с 13-го по 15-й пятилетний интервал, или за последние 20 лет.

## Литература

1. Бригида В.С., Мишулина С.И., Стась Г.В. Перспективные направления экологизации структурных элементов туристского продукта краснодарского края (на примере транспортной составляющей). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12. № 1. – С. 24–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25.
2. Кизилов А.С. Древние крепости и поселения Черноморского и Каспийского побережий Кавказа: некоторые вопросы локализации, идентификации и сохранности. // История, археология и этнография Кавказа. – 2023. – Т. 19. – №. 3. – С. 743–758. DOI: 10.32653/СН193743-758.
3. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. Т. 13. № 4. – С. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.
4. Anwar M.S., Rahman K., Bhuiyan M.A.E., Saha R. Assessment of Sea Level and Morphological Changes along the Eastern Coast of Bangladesh. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Art. No. 527. DOI: 10.3390/jmse10040527.
5. Azran N.I., Jeofry H., Chung J.X., Juneng L., Ali S.A.S., Griffiths A., Ramli M.Z., Ariffin E.H., Miskon M.F., Mohamed J., et al. Southern South China sea dynamics: sea level change from coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) in the 21st Century. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – Art. No. 458. DOI: 10.3390/jmse11020458.
6. Boretti A. Analysis of Segmented Sea level Time Series. // Applied Sciences. –2020. – Vol. 10. – Art. No. 625. DOI: 10.3390/app10020625.
7. 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.
8. Bryukhanova N.N., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Pavlov P.P., Romanova V.V., Karlina Y.I. Reliability study of metal-oxide semiconductors in integrated circuits. // Micromachines. – 2024. – Vol. 15. – Art. No. 561. DOI: 10.3390/mi15050561.
9. Cheng Y., Ezer T., Hamlington B.D. Sea level acceleration in the China Seas. // Water. – 2016. – Vol. 8. – Art. No. 293. DOI: 10.3390/w8070293.
10. Dzhioeva A.K. Prospects for mining ecologization to reduce harmful emissions into the atmosphere. // Ugol. – 2022. – No. 10. – pp. 29–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32.
11. Efremenkov E.A., Shanin S.A. Development of an algorithm for computing the force and stress parameters of a cycloid reducer. // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – Art. No. 993. DOI: 10.3390/math11040993.
12. Gutarevich V.O., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.A., Kukartsev V.V., Iushkova L.V., Korpacheva L.N. Reducing oscillations in suspension of mine monorail track. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – Art. No. 4671. DOI: 10.3390/app13084671.
13. Hristova T. Tracking mining company electric vehicles for sustainable development optimization using distributed ledger technologies. // Journal of Sustainable Mining. – 2024. – Vol. 23. No. 3. – pp. 299–314. DOI: 10.46873/2300-3960.1425.
14. Karpov D.F., Vafaeva K.M., Pavlov M.V., Dixit S., Ravikanth P., Nautiyal R.D., Punia A., Madan P. Parametric analysis of a radiant gas heating system for controlled-environment agriculture with preheated ventilation. // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 511. – Art. No. 01010. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101010.
15. Klyuev R.V., Brigida V.S., Lobkov K.Y., Stupina A.A., Tynchenko V.V. On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023. – Vol. Nos. 11-1. – pp. 292–304. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_292.
16. Li X., Li L., Yan F., Qi C., Guzev M.A., Kozhevnikov E.V., Kunitskikh A.A. An analytical solution of direction evolution of crack growth during progressive failure in brittle rocks. // Deep Underground Science and Engineering. Portico. – 2024. DOI: 10.1002/dug2.12117.

17. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. // Resources, Conservation & Recycling Advances. – 2024. – Vol. 23. – Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.

18. Malozyomov B.V., Khalikov I.H., Kukartsev V.A. Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption. // Energies. – 2023. – Vol. 16. – No. 2. – Art. No. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

19. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular Mining Wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

20. Marrero-Betancort N., Marcello J., Rodríguez-Esparragón D., Hernández-León S. Sea level change in the canary current system during the satellite era. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 10. – Art. No. 936. DOI: 10.3390/jmse10070936.

21. Mhanna M., Hussein H.H. Analysis of squeezing-induced failure in a water tunnel and measure of rehabilitation: A case study of Tishreen tunnel, Syria. // Deep Underground Science and Engineering. Portico. – 2024. DOI: 10.1002/dug2.12120.

22. Nuriev M., Zaripova R., Sitnikov S., Nurgaliev R. The principles of building a parallel program for steganographic file protection. // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 458. – Art. No. 09027. DOI: 10.1051/e3sconf/202345809027.

23. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F., Dixit S., Kumar P., Joshi A., Mishra R., Brar M. Impact of environmental factors on indoor air temperature in gas-fired radiant heated cultivated structures. // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 511. – Art. No. 01036. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101036

24. Rezanov V.A., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Grinek A.V., Skeebe V.Y., Lyosin A.V., Karlina A.I. Study of melting methods by electric resistance welding of rails. // Metals. – 2022. – Vol. 12. – Art. No. 2135. DOI: 10.3390/met12122135.

25. Sun J., Huang Y., He Y., Andrii B., Liu W. Properties of macadam stabilized with cement and asphalt emulsion. // Materials. – 2023. – Vol. 16. No. 23. – Art. No. 7256. DOI: 10.3390/ma16237256.

26. Trebeleva G., Glazov K., Kizilov A., Sakania S., Yurkov V., Yurkov G. Roman fortress pituit: 3D-reconstruction of the monument based on the materials of archaeological research and geological paleoreconstructions. // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. No. 11. – Art. No. 4814. DOI: 10.3390/app11114814.

27. Viktorov I., Gibadullin R. The principles of building a machine-learning-based service for converting sequential code into parallel code. // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 431. – Art. No. 05012. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105012.

28. Yang S., Bieliatynskiy A., Trachevskiy V., Shao M., Ta M. Research of nano-modified plain cement concrete mixtures and cement-based concrete. // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2023b. – Vol. 17. No. 1. DOI: 10.1186/s40069-023-00601-8.

29. Yang Y., Cheng Q., Tsou J.-Y., Wong K.-P., Men Y., Zhang Y. Multiscale analysis and prediction of sea level in the northern south china sea based on tide gauge and satellite data. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023a. – Vol. 11. – Art. No. 1203. DOI: 10.3390/jmse11061203.

30. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and Republic of North Ossetia-Alania. // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.

## References

1. Brigida V.S., Mishulina S.I., Stas G.V. Perspective directions of “ecologisation” of structural elements of a tourist product of Krasnodar region (case study of transportation

component). Sustainable Development of Mountain Territories. 2020. Vol. 12. No. 1. pp. 18–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25. (In Russ.)

2. Kizilov A.S. Ancient fortresses and settlements along the Black sea and Caspian coasts of the Caucasus: localization, identification, and preservation challenges. History, Archeology and Ethnography of the Caucasus. 2023. Vol. 19. No. 3. pp. 743–758. DOI: 10.32653/CH193743-758. (In Russ.)

3. Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014. (In Russ.)

4. Anwar M.S., Rahman K., Bhuiyan M.A.E., Saha R. Assessment of Sea Level and Morphological Changes along the Eastern Coast of Bangladesh. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. Art. No. 527. DOI: 10.3390/jmse10040527.

5. Azran N.I., Jeofry H., Chung J.X., Juneng L., Ali S.A.S., Griffiths A., Ramli M.Z., Ariffin E.H., Miskon M.F., Mohamed J., et al. Southern South China sea dynamics: sea level change from coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) in the 21st Century. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Art. No. 458. DOI: 10.3390/jmse11020458.

6. Boretti A. Analysis of segmented sea level time series. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Art. No. 625. DOI: 10.3390/app10020625.

7. 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.

8. Bryukhanova N.N., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Pavlov P.P., Romanova V.V., Karlina Y.I. reliability study of metal-oxide semiconductors in integrated circuits. *Micromachines*. 2024. Vol. 15. Art. No. 561. DOI: 10.3390/mi15050561.

9. Cheng Y., Ezer T., Hamlington B.D. Sea level acceleration in the China Seas. *Water*. 2016. Vol. 8. Art. No. 293. DOI: 10.3390/w8070293.

10. Dzhioeva A.K. Prospects for mining ecologization to reduce harmful emissions into the atmosphere. *Ugol*. 2022. No. 10. pp. 29–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32.

11. Efremkov E.A., Shanin S.A. Development of an algorithm for computing the force and stress parameters of a cycloid reducer. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Art. No. 993. DOI: 10.3390/math11040993.

12. Gutarevich V.O., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.A., Kukartsev V.V., Iushkova L.V., Korpacheva L.N. Reducing oscillations in suspension of mine monorail track. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Art. No. 4671. DOI: 10.3390/app13084671.

13. Hristova T. Tracking mining company electric vehicles for sustainable development optimization using distributed ledger technologies. *Journal of Sustainable Mining*. 2024. Vol. 23. No. 3. pp. 299–314. DOI: 10.46873/2300-3960.1425.

14. Karpov D.F., Vafaeva K.M., Pavlov M.V., Dixit S., Ravikanth P., Nautiyal R.D., Punia A., Madan P. Parametric analysis of a radiant gas heating system for controlled-environment agriculture with preheated ventilation. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 511. Art. No. 01010. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101010.

15. Klyuev R.V., Brigida V.S., Lobkov K.Y., Stupina A.A., Tynchenko V.V. On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023. Vol. Nos. 11-1. pp. 292–304. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_292.

16. Li X., Li L., Yan F., Qi C., Guzev M.A., Kozhevnikov E.V., Kunitskikh A.A. An analytical solution of direction evolution of crack growth during progressive failure in brittle rocks. *Deep Underground Science and Engineering*. Portico. 2024. DOI: 10.1002/dug2.12117.

17. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2024. Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.

18. Malozyomov B.V., Khalikov I.H., Kukartsev V.A. Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 2. Art. No. 729. DOI: 10.3390/en16020729.
19. Malyukova L.S., Martyshev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular mining wastes management for sustainable production of *camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
20. Marrero-Betancort N., Marcello J., Rodríguez-Esparragón D., Hernández-León S. Sea level change in the canary current system during the satellite era. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 10. Art. No. 936. DOI: 10.3390/jmse10070936.
21. Mhanna M., Hussein H.H. Analysis of squeezing-induced failure in a water tunnel and measure of rehabilitation: A case study of Tishreen tunnel, Syria. *Deep Underground Science and Engineering*. Portico. 2024. DOI: 10.1002/dug2.12120.
22. Nuriev M., Zaripova R., Sitnikov S., Nurgaliev R. The principles of building a parallel program for steganographic file protection. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 458. Art. No. 09027. DOI: 10.1051/e3sconf/202345809027.
23. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F., Dixit S., Kumar P., Joshi A., Mishra R., Brar M. Impact of environmental factors on indoor air temperature in gas-fired radiant heated cultivated structures. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 511. Art. No. 01036. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101036.
24. Rezanov V.A., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Grinek A.V., Skeebe V.Y., Lyosin A.V., Karlina A.I. Study of melting methods by electric resistance welding of rails. *Metals*. 2022. Vol. 12. Art. No. 2135. DOI: 10.3390/met12122135.
25. Sun J., Huang Y., He Y., Andrii B., Liu W. Properties of macadam stabilized with cement and asphalt emulsion. *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 23. Art. No. 7256. DOI: 10.3390/ma16237256.
26. Trebeleva G., Glazov K., Kizilov A., Sakania S., Yurkov V., Yurkov G. Roman fortress pituit: 3D-reconstruction of the monument based on the materials of archaeological research and geological paleoreconstructions. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 11. Art. No. 4814. DOI: 10.3390/app11114814.
27. Viktorov I., Gibadullin R. The principles of building a machine-learning-based service for converting sequential code into parallel code. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 431. Art. No. 05012. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105012.
28. Yang S., Bieliatynskiy A., Trachevskiy V., Shao M., Ta M. Research of nano-modified plain cement concrete mixtures and cement-based concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023b. Vol. 17. No. 1. DOI: 10.1186/s40069-023-00601-8.
29. Yang Y., Cheng Q., Tsou J.-Y., Wong K.-P., Men Y., Zhang Y. Multiscale analysis and prediction of sea level in the northern south china sea based on tide gauge and satellite data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023a. Vol. 11. Art. No. 1203. DOI: 10.3390/jmse11061203.
30. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and geocological factors in assessing the state of the geological environment based on the analysis of spatial databases of the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.

УДК 551.43

DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

Оригинальная статья

## Моделирование отвесной стенки активного клифа по данным лидарной съемки (на примере Краснодарского водохранилища)

А.А. Лагута <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: a-y-l@mail.ru;

<sup>2</sup> АГМ Системы, 350063, Россия, г. Краснодар, ул. им. Фрунзе 22/1, e-mail: a-y-l@mail.ru

Статья поступила: 01.07.2024, доработана: 15.08.2024, принята к публикации: 29.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Берега Краснодарского водохранилища на отдельных участках продолжают активное формирование с разрушением уступа II надпойменной террасы долины р. Кубани. В береговой зоне водохранилища на данной террасе расположены многочисленные объекты застройки, относящиеся к различным функциональным зонам (жилой, рекреационной и др.) МО город Краснодар. **Цель работы.** Разработка методики создания и анализа цифровой модели рельефа активного клифа, ориентированной на отвесный обрыв с отрицательными уклонами, с оценкой формы и размеров волноприбойных ниш. **Методы.** В результате лидарной съемки получено облако точек лазерных отражений (ТЛО) в пределах тестового участка активного клифа протяженностью 458 м и выполнена классификация ТЛО с выделением класса «земля». В целях исключения из модели отрицательных уклонов выполнено преобразование системы координат ТЛО, выраженное в замещении координат по оси X на расстояние вдоль бровки клифа и повороте массива точек вокруг новой оси абсцисс на минус 90°. После преобразования системы координат построена цифровая модель рельефа стенки откоса с выделением волноприбойных ниш на основе индекса TPI. **Результаты.** Разработана методика моделирования форм рельефа с отрицательным уклоном. Определены форма, размеры и пространственное положение волноприбойных ниш. Всего в пределах участка выделено 14 отдельных ниш при общей длине 394,72 м. Средняя глубина ниш – 0,51 м, максимальная – 1,79 м; средняя длина – 28,82 м, максимальная – 84,16 м. Средняя величина уклона поверхности откоса по участку составляет 57,97°; средний положительный уклон – 52,12°, средний отрицательный уклон – 72,58°. Обнаружена значительная вариабельность высотного положения волноприбойных ниш на откосе (от 33,89 до 37,82 м БС). Общий объем массы грунта, заключенный над волноприбойной нишей между поверхностью откоса и вертикальной плоскостью, касательной к самой глубокой точке ниши, в пределах участка работ составляет 743,88 м<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** Краснодарское водохранилище, цифровая модель рельефа, формирование берегов, абразия, мобильное лазерное сканирование, индекс превышения (TPI).

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20005 и при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-27-20005.

**Для цитирования:** Лагута А.А. Моделирование отвесной стенки активного клифа по данным лидарной съемки (на примере Краснодарского водохранилища). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 230-242. DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

Original paper

## Modeling of a steep wall of an active cliff using LiDAR survey data (case study of the Krasnodar Reservoir)

A.A. Laguta <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation, e-mail: a-y-l@mail.ru;

<sup>2</sup> AGM Systems LLC, 22/1 Frunze Str., Krasnodar 350063, Russian Federation, e-mail: a-y-l@mail.ru

Received: 01.07.2024, revised: 15.08.2024, accepted: 29.08.2024

**Abstract: Relevance.** The banks of the Krasnodar Reservoir in some areas continue to actively form with the destruction of the ledge of the II floodplain terrace of the Kuban River valley. In the coastal zone of the reservoir on this terrace there are numerous development objects belonging to various functional zones (residential, recreational, etc.) of the municipal formation of the city of Krasnodar. **Aim.** The aim of the research is the development of a methodology for creating and analyzing a digital relief model of an active cliff, focused on a steep cliff with negative slopes, with an assessment of the shape and size of wave-cut notches. **Methods.** As a result of the LiDAR survey, a point cloud was obtained within a test section of the active cliff with a length of 458 m and a classification of the point cloud was performed, highlighting the “ground” class. In order to exclude negative slopes from the model, a transformation of the point cloud coordinate system was performed, expressed in replacing the coordinates along the X axis by a distance along the edge of the cliff and rotating the array of points around the new abscissa axis by minus 90°. After transforming the coordinate system, a digital model of the steep wall was built with the identification of wave-cut notches based on the TPI index. **Results.** A technique has been developed for modeling landforms with a negative slope. The shape, dimensions and spatial position of the wave-cut notches have been determined. In total, 14 separate notches were identified within the site with a total length of 394.72 m. The average depth of the notches is 0.51 m, the maximum is 1.79 m; the average length is 28.82 m, the maximum is 84.16 m. The average slope ratio of the surface along the site is 57.97°; the average positive slope is 52.12°, the average negative slope is 72.58°. Significant variability in the altitudinal position of wave-cut notches on the slope was discovered (from 33.89 to 37.82 m (Baltic Vertical Datum)). The total volume of soil mass contained above the wave-cut notch between the surface of the slope and the horizontal plane tangent to the deepest point of the notch within the study site is 743.88 m<sup>3</sup>.

**Keywords:** Krasnodar Reservoir, digital elevation model, coast formation, abrasion, mobile laser scanning, Topographic Position Index (TPI).

**Acknowledgments:** The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-27-20005 and with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 24-27-20005.

**For citation:** Laguta A.A. Modeling of a steep wall of an active cliff using LiDAR survey data (case study of the Krasnodar Reservoir). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 230-242. DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

### Введение

Интенсивность и характер переработки берегов определяются главным образом геолого-геоморфологическими и гидрологическими факторами [Иванов, Тржцинский, 2001]. В их взаимодействии рождаются различные динамические обстановки

рельефообразования и осадконакопления, под которыми традиционно понимаются пространственные геоморфологические единицы со свойственными им условиями накопления осадков или абразии [Pettijohn, 1957; Reineck, Singh, 1957; Долотов, 1989; Хабидов и др., 1999], формирующиеся как в результате преимущественного воздействия какого-либо отдельного фактора, так и вследствие совокупного влияния разнообразных комбинаций факторов.

Запуск в эксплуатацию Краснодарского водохранилища в 1975 г. вызвал нарушение вещественного баланса, влекущее за собой несоответствие существовавших до начала эксплуатации отдельных форм рельефа актуальным условиям среды рельефообразования и обусловленное возникновением новых факторов морфолитогенеза (создание динамического подпора), либо перераспределением вкладов предшествовавших. Для водохранилищ, сходных по генетическому типу с Краснодарским, по однородности комбинаций указанных факторов выделяются три области, одна из которых – область волнового морфолитогенеза – занимает около 7,5 км длины правого берега (рис. 1). Здесь доминирующим фактором рельефообразования является вновь созданный, а именно – воздействие прибойного потока.

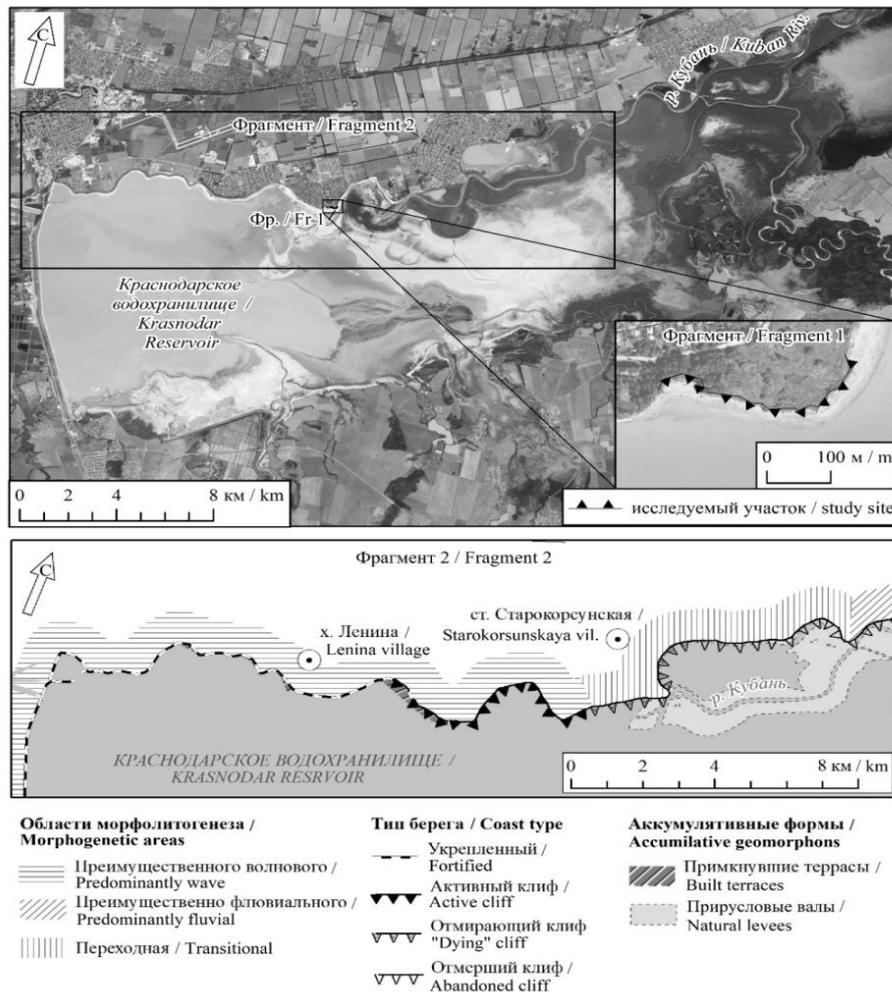


Рис. 1. Положение исследуемого участка и специфических областей морфолитогенеза на правом берегу Краснодарского водохранилища /

Fig. 1. Position of the study site and specific morphogenetic areas on the right bank of the Krasnodar Reservoir

Для формирующейся в пределах рассматриваемой области береговой линии упомянутое выше несоответствие спустя полвека эксплуатации объекта продолжает проявляться в активном разрушении уступа II надпойменной террасы долины р. Кубани, характерном для лессовидных суглинков – наиболее слабых по сопротивляемости размыву грунтов, с сопутствующим образованием трещин, заколов в клифе, останцов.

Стремление нарушенной созданием подпора системы к равновесному состоянию непрерывно, и, следовательно, до достижения профиля равновесия непрерывен и процесс разрушения берегов, препятствующих волнам. Уместно заметить, что согласно [Гаврюхова, 1998] расчетные проектные сроки самовыполживания для анализируемого объекта не оправдались уже по итогам 90-х гг. XX в.

Целью исследования является разработка методики создания и анализа цифровой модели рельефа стенки берегового откоса с оценкой формы и размеров волноприбойных ниш, играющих важную роль в разрушении участков берегов, сложенных лессовидными суглинками [Назаров, Гаврюхова, 2005].

Актуальность разработки предлагаемой методики в совокупности с методикой оценки линейного смещения берегового уступа [Лагута, Погорелов, 2023], помимо важности водоема как хозяйственного объекта, обусловлена нахождением в береговой зоне водохранилища многочисленных объектов застройки, относящихся к различным функциональным зонам (жилой, рекреационной и др.) муниципального образования город Краснодар, и необходимостью принятия управленческих решений по защите берегов. Методика основана на морфометрическом анализе цифровой модели рельефа, полученной по материалам лидарной съемки (мобильного лазерного сканирования) – динамично развивающейся технологии, имеющей широкое применение [Антоненко и др., 2014; Ossowski, Tysiac, 2018; Ossowski et al., 2019; Погорелов и др., 2023а, 2023б].

### Методы исследования

Режим эксплуатации водохранилища, вследствие которого уровни, достигающие отметки НПУ, наблюдаются в среднем не более 5 месяцев в году, открывает возможности для съемки стенки откоса с осушенной поверхности пляжа в межженный период года. Лидарная съемка исследуемого участка проведена 9 сентября 2023 г. при уровне 25,95 м БС (<http://www.kbvufgu.ru/>). Технология мобильного лазерного сканирования заключается в пространственной привязке облака точек лазерных отражений (ТЛО), что осуществляется с использованием данных основных компонентов системы сканирования: сенсора (LiDAR) с функцией дальномера; ГНСС-приемника с функцией регистрации данных спутниковых наблюдений для последующего расчета пространственного положения и инерциального блока с функцией записи угловых и линейных ускорений для измерения пространственной ориентации. Такой набор исходных данных позволяет однозначно определить координаты ТЛО путем решения прямой геодезической задачи. Для проведения мобильного лазерного сканирования использована система АГМ-МС1, основные характеристики которой приведены в таблице 1.

Таблица 1/ Table 1

**Система лазерного сканирования АГМ-МС1. Основные характеристики /  
Laser scanning system AGM-MS1. Main characteristics**

Характеристика / Characteristic	Значение / Value	Единица измерения / Measuring unit
Частота сканирования / Scanning frequency	600	кГц / kHz
Максимальная дальность измерения / Maximum measuring range	200	м / m
Угол поля зрения / Field of view	360	°
Частота вращения сканирующего зеркала / Rotation frequency	20	Гц / Hz
Точность определения дальности / Range accuracy	3	см / cm
Точность определения координат / Position accuracy	до 5	см / cm
Температура использования / Usage temperature	-10...+50	°C

На первом этапе полевых работ проведена рекогносцировка для оценки возможности общей проходимости маршрута и проложения траекторий без препятствий для сигнала ГНСС. Траектория обрабатывалась как в прямом, так и в обратном направлениях. Следующий этап представлен комбинированным решением траектории – реализацией последовательности точек с рассчитанными координатами и углами ориентации, полученными после обработки данных инерциального блока. Дискретность траектории определяется частотой записи инерциальной навигационной системы (для АГМ-МС1 – 500 Гц). Расчет траектории выполнен в ПО AGM PosWorks Web. Финальный этап комплекса действий с сырыми данными лазерного сканирования – получение облака точек лазерных отражений с координатами. В программно-аппаратном комплексе АГМ-МС1 эту задачу выполняет ПО AGM ScanWorks [Лагута, Погорелов, 2023]. Установленная система координат – UTMN37, система высот – Балтийская 1977 г. (БС). Длина участка – 458 м, средняя плотность облака ТЛО – более 1500 м<sup>-1</sup>.

Активный клиф формирующихся берегов Краснодарского водохранилища на исследуемом участке изобилует формами рельефа с отрицательным уклоном (рис. 2, рис. 5б), что создает очевидные препятствия для применения классического итерационного метода классификации точек истинной поверхности («земля»). Физически наличие отрицательного уклона означает наличие у модели поверхности более одной отметки высот в точке с одними плановыми координатами. Сущность предлагаемого метода заключается в итерационном включении в исходную TIN-модель, построенную по минимальным отметкам в пределах пользовательской ячейки регулярной сетки, новых точек по настраиваемым параметрам (итерационные угол и дистанция) [Axelsson, 2000]. Метод обеспечивает корректный результат классификации ТЛО, полученных от поверхностей, для которых применимо следующее правило: нормаль к поверхности имеет с ней одну и только одну точку пересечения. В целях выполнения обозначенного условия перед локальной дополнительной классификацией точек «земли» в пределах участков поверхностей с отри-

цательным уклоном применена пространственная трансформация, заключающаяся в повороте массива ТЛО вокруг длинной горизонтальной оси каждого участка на необходимую величину с последующим возвратом в систему координат UTMN37. Результатом этапа классификации стало облако ТЛО класса «земля», ограниченное сверху бровкой клифа и снизу – его подошвой (рис. 3, рис. 4в). На рисунке 3, представлен репрезентативный для всего участка исследования пример поперечного сечения шириной 0,2 м, образованного плоскостью, перпендикулярной линии бровки. Классификация осуществлена в ПО TerraSolid.



Рис. 2. Типичные для исследуемого участка клифы абразионных обвально-просадочных берегов на фото (а) и виде точек лазерных отражений (б). Дата съемки – 09.09.2023 /

Fig. 2. Cliffs of abrasive landslide-subsidence banks typical for the study area in the photo (a) and the view of point clouds (b). Date of shooting and surveying – 09.09.2023

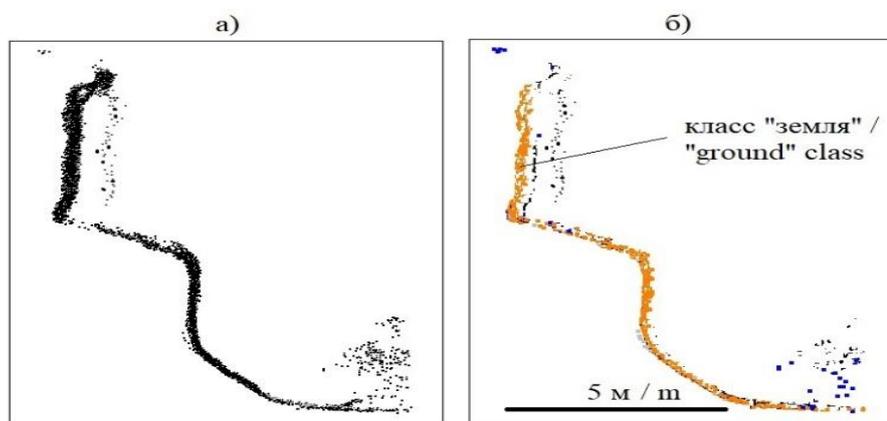


Рис. 3. Поперечный профиль берегового откоса по неклассифицированному (а) и классифицированному (б) облаку ТЛО. Глубина (ширина сечения) профиля – 0,2 м. Вертикальный масштаб равен горизонтальному /

Fig. 3. Transverse profile of the coastal slope for unclassified (a) and classified (b) point clouds. The depth (section width) of the profile is 0.2 m. The vertical scale is equal to the horizontal scale

Дальнейшие этапы работы – создание цифровой модели рельефа и пространственный анализ – требуют исключения из набора данных форм рельефа с отрицательным уклоном по тем же причинам, что и при классификации ТЛО, а именно, наличие в точке с одними координатами двух и более отметок высот. Для решения задачи выполнено преобразование массива ТЛО класса «земля» из исходной системы координат в новую с использованием ПО ArcGIS Desktop. Порядок и описание преобразования приведены ниже.

*Векторизация бровки активного клифа.* Этап заключается в оцифровке бровки откоса – границы между поверхностью II надпойменной террасы и поверхностью клифа. Оцифровка может быть выполнена как вручную (для относительно небольших по длине участков), так и автоматически: посредством расчета горизонтальной (тангенциальной) кривизны ( $k_h$ ) – морфометрической величины, построенной по цифровой модели рельефа. В геоморфологическом отношении на моделях горизонтальной кривизны выделяются отроги хребтов ( $k_h > 0$ ) и долин ( $k_h < 0$ ) [Florinsky, 2016], что позволяет представить линию бровки как последовательность точек, соединяющих локальные максимумы  $k_h$ .

*Создание пикетажной привязки вдоль бровки,* выполненное после ее векторизации, служит для определения пространственного положения элементов, расположенных вдоль линейного объекта. Пикетаж представлен восстановленными через равное расстояние (0,05 м) вдоль бровки точками с атрибутом, содержащим расстояние от начала участка.

*Создание растровой модели расстояний вдоль бровки.* Для решения задачи интерполяции между равноудаленными точками выбран кригинг – геостатистический метод, основанный на статистических моделях, включающих автокорреляцию, и предполагающий, что расстояния между точками отражают пространственную корреляцию [Oliver, Webster, 1990; Калинин и др., 2017]. Методом ординарного кригинга со сферической моделью эмпирической вариограммы построена модель расстояний вдоль бровки с пространственным разрешением равным 0,05 м (рис. 4а).

Следующий этап преобразования – *создание растровой модели расстояний от бровки* – выполняет задачу определения для каждой из точек класса «земля» горизонтального расстояния до соответствующей отметки пикетажа. С помощью инструмента «Euclidean distance» ПО ArcGIS построена растровая модель расстояний от бровки с пространственным разрешением 0,05 м (рис. 4б).

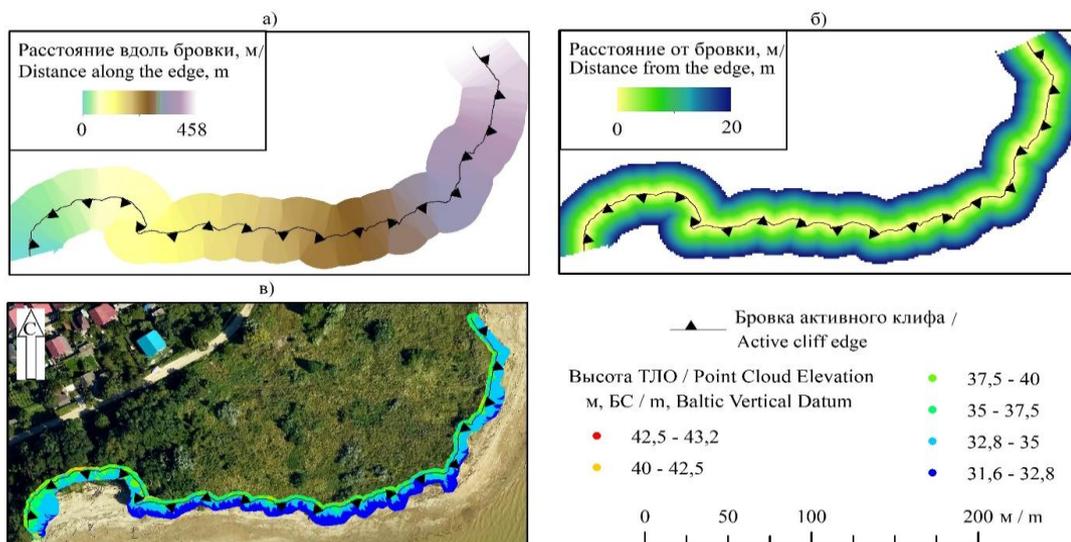


Рис. 4. Растровые модели расстояний вдоль (а) и от (б) бровки активного клифа исследуемого участка. Облако ТЛО класса «земля» активного клифа от бровки до подножия (в) /

Fig. 4. Raster models of distances along (a) and from (b) the edge of the active cliff of the study site. Point cloud of “ground” class of the active cliff from the edge to the base (c)

После построения растровых моделей расстояний необходимо массив ТЛО класса «земля» дополнить атрибутами «расстояние вдоль бровки» и «расстояние от бровки». Задача решена с помощью инструмента «Extract Values to Points» в ПО ArcGIS.

Заключительный этап преобразования – представление ТЛО в системе координат с параметрами, указанными в таблице 2. Это позволяет трансформировать полученную пикетажную привязку ТЛО в координату X и повернуть массив точек вокруг оси абсцисс на минус 90°, тем самым, исключив из ЦМР поверхности с отрицательным уклоном.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры системы координат, созданной для исключения  
отрицательных уклонов /  
Parameters of the coordinate system created to exclude negative slopes**

Ось / Axis	Семантика / Semantics	Единица измерения / Measuring unis
X	Расстояние вдоль бровки / Distance along the edge	м погонные / linear m
Y	Исходная высотная отметка ( $Z_{UTMN37}$ )	м, БС / m, Baltic Vertical Datum
Z	Расстояние от бровки / Distance from the edge	м / m

После трансформации системы координат построена цифровая модель рельефа методом «Nearest Neighbor» с разрешением 0,05 м. Выделение волноприбойных ниш осуществлено на основе индекса превышения (TPI – Topographic Positions Index) [Weiss, 2006; Jenness, 2006]. Индекс широко используется как индикатор положительных и отрицательных форм рельефа в топографии [Черниковский, 2017] и батиметрии [Wilson et al., 2007; Rogorelov et al., 2023]. Для отдельной ячейки TPI определяется как разность между высотой данной ячейки и средним значением высот окружающих ячеек. Размер плавающего окна, ограничивающего используемые для вычисления среднего значения ячейки при вычислении индекса, принят равным 2 м. Расчет уклонов произведен с учетом предшествующего преобразования системы координат и экспозиции формы рельефа.

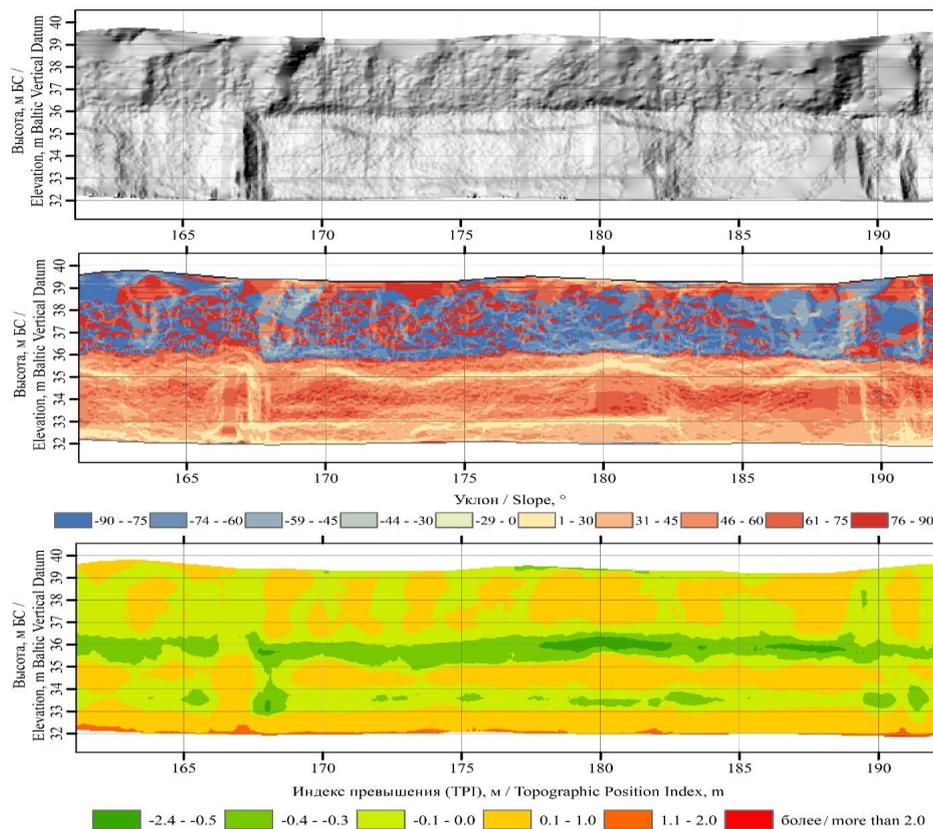
### Результаты работы и обсуждение

В результате моделирования выбранного участка активного клифа правого берега Краснодарского водохранилища определены форма, размеры и пространственное положение волноприбойных ниш. Всего в пределах участка выделено 14 отдельных волноприбойных ниш при общей длине 394,72 м. Такая форма присутствует на 86% общей длины исследуемого участка. Статистические показатели пространственных характеристик выделенных форм рельефа приведены в таблице 3. На рисунке 5 представлен результат моделирования рельефа фрагмента стенки активного клифа.

Таблица 3 / Table 3

**Статистические показатели глубины и высотного положения  
волноприбойных ниш /  
Statistical indicators of the depth and altitude position of wave-cut notches**

Величина / Value	Глубина ниши (TPI) / Notch depth (TPI)	Длина ниши (3D) / Notch length (3D)	Высотная отметка самой глубокой точки ниши / Elevation of the deepest point of the notch	Единица измерения / Measuring unit
Максимальная / Maximum	1,79	84,16	37,82	м / m
Минимальная / Minimum	0,01	3,01	33,89	
Средняя / Average	0,51	28,82	35,64	
Медиана / Median	0,48	21,18	35,71	
Общая / Total	-	403,72	-	
Стандартное отклонение / Standard deviation	0,23	-	0,80	-



*Рис. 5. Моделирование отвесной поверхности активного клифа с использованием светотеневой отмывки (а), уклонов поверхности (б) и индекса TPI (в). По горизонтальной оси – расстояние от начала участка в погонных метрах /*

*Fig. 5. Modeling the vertical surface of an active cliff using a hillshade (a), model of surface slopes (b) and topographic position index (TPI) (c). On the horizontal axis – the distance from the beginning of the section in linear meters*

Получена модель уклонов поверхности откоса (рис. 5б). Средняя величина уклона откоса на участке составляет  $57,97^\circ$ ; средняя положительная равна  $52,12^\circ$ , средняя отрицательная –  $72,58^\circ$ . Площадь трехмерных поверхностей с отрицательным уклоном составляет 40% от общей площади поверхности клифа.

Обращает на себя внимание значительная вариабельность высотного положения волноприбойных ниш на откосе (от 33,89 до 37,82 м при средней отметке 35,64 м БС). Наивысший уровень воды в водохранилище в период половодья 2022 г. составлял 34,08 м, в 2023 г. – не превышал 33,50 м (<http://www.kbvufgu.ru/>). Согласно [Правила ..., 2008] максимальная расчетная высота волны на водохранилище при длине разгона 29 км и расчетной скорости восточного ветра 2% обеспеченности, равной 38,2 м/с, составляет 3,0 м, а наибольшая зарегистрированная по состоянию на 2007 г. высота волны равна 1,95 м. За период наблюдений над волнением скоростей ветра более 20 м/с не отмечено. Об измерениях интенсивности волнения после 2007 г. не известно. Принимая во внимание двукратное сокращение в результате трансформации водоема возможной величины разгона, следует считать достижение проектной высоты волнения 2% обеспеченности крайне маловероятным. При повторении максимальной зарегистрированной высоты волнения наивысшую отметку воздействия прибоя следует ожидать близкой к 36,03 м, что приближается к средней отметке дна волноприбойных ниш на исследуемом участке, однако значительно ниже максимальных отметок. Высотное положение волноприбойных ниш требует отдельного исследования с учетом всех факторов, влияющих на силу волнового воздействия на участке. Локальные вертикальные смещения самых глубоких частей волноприбойных ниш могут быть вызваны локальными процессами (гравитационными, эрозионными), действующими одновременно с абразией.

Известно, что наиболее опасные с точки зрения нарушения прочностных характеристик грунта напряжения расположены над нишей в плоскости ее самой глубокой точки [Гаврюхова, 1998]. Общий объем массы грунта, заключенный над волноприбойной нишей между поверхностью откоса и вертикальной плоскостью, проходящей через самую глубокую точку ниши, в пределах участка работ, составляет  $743,88 \text{ м}^3$  – это минимальный объем подлежащего разрушению массива в «сухом» состоянии без волнового воздействия.

По всему откосу в структуре обнажения наблюдаются вертикальные столбчатые отдельности (блоки) (рис. 2а, 5а, 5в). Согласно [Назаров, Гаврюхова, 2005] наличие таких форм является следствием лессовидности слагающих откос суглинков, резко ослабляющих противозерозионную устойчивость берега.

## Выводы

1. Разработана методика цифрового моделирования поверхности активного клифа с отрицательными уклонами на основе данных мобильного лазерного сканирования.
2. Показана применимость разработанной методики к задаче выделения в отвесном абразионном обрыве волноприбойных ниш и расчета их геометрии.
3. В пределах исследуемого участка берега Краснодарского водохранилища выделено 14 волноприбойных ниш при общей длине 394,72 м. Волноприбойная ниша как форма рельефа присутствует на 86% общей длины участка. Средняя глубина ниш – 0,51 м, максимальная – 1,79 м; средняя длина ниш – 28,82 м, максимальная –

ная – 84,16 м. Глубины ниш определяют наиболее ожидаемое положение плоскости отрыва (средних и максимальных линейных смещений бровки клифа) вне зависимости от уровня воды и наличия волнового воздействия.

4. Средняя абсолютная величина уклона поверхности по участку составляет 57,97°; средний положительный уклон – 52,12°, средний отрицательный уклон – 72,58°. Площадь «нависающих» поверхностей составляет 40,05% от общей площади поверхности абразионного обрыва. Высотное положение волноприбойных ниш на тестовом участке обнаруживает значительную вариабельность: от 33,89 до 37,82 м при средней отметке – 35,64 м БС.

5. Полученные модели позволяют рассчитать объем пород, подверженных вероятному обрушению в процессе абразии. Недолговечность клифообразных форм рельефа, сложенных дисперсными грунтами, очевидна. Оперативность получения данных лидарной съемки открывает возможность организации мониторинга переработки берегов водохранилища и накопления базы данных разновременных ЦМР с последующим анализом взаимосвязей темпов переработки, количества и морфологии волноприбойных ниш с гидрологическим режимом водоема, интенсивностью волнения и рельефом береговой полосы.

Совокупность полученных результатов свидетельствует о продолжающемся активном формировании берегов в пределах исследуемого участка берега Краснодарского водохранилища и разрушении прибрежной части II надпойменной террасы долины р. Кубани.

## Литература

1. Антоненко М.В., Зименко Д.Н., Погорелов А.В. Применение данных воздушного лазерного сканирования при проведении инженерных изысканий. // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 6–11.
2. Гаврюхова Л.Н. Механизм разрушения лессовых берегов водохранилища (на примере Краснодарского водохранилища): автореф. дис. ... канд. географ. наук: 11.00.07 / Гаврюхова Лариса Николаевна. – СПб.: КубГАУ, 1998. – 22 с.
3. Долотов Ю.С. Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. М.: Наука, 1989. – 296 с.
4. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. СПб: Наука, 2001. – 416 с.
5. Калинин В.Г., Суманеева К.И., Русаков В.С. Анализ методов интерполяции пространственного распределения метеорологических характеристик при расчетах весеннего снеготаяния. // Географический вестник. – 2017. – Т. 41. № 2. – С. 126–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-126-137.
6. Лагута А.А., Погорелов А.В. Исследование динамики берегов Краснодарского водохранилища методом лидарной съемки. // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». М.: ИИЕТ РАН, 2023. – С. 539–546. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.93.99.071.
7. Назаров Н.Н., Гаврюхова Л.Н. Морфология и морфодинамика суглинистых берегов водохранилищ. Эрозионные и русловые процессы. / Под редакцией Р.С. Чалова. Вып. 4. М.: МГУ, 2005. – С. 130–141.
8. Погорелов А.В., Бойко Е.С., Вертлиб Э.М. Использование технологий лидарной съемки для создания высокоточной 3D модели города: опыт моделирования города Краснодара, Россия. // Известия Ошского технологического университета. – 2023а. – № 2-1. – С. 70–76.
9. Погорелов А.В., Вертлиб Э.М., Бойко Е.С. 3D-модель древесных насаждений города по данным лидарной съемки. Разработка и анализ. // Сборник материалов VI Кавказского

Международного экологического форума «Комплексное изучение экосистем горных территорий»/ Грозный: ЧГУ, 2023б. – С. 290–297. DOI: 10.36684/102-1-2023-290-297.

10. Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. Краснодар: ПИИ «Кубаньводпроект», 2008. – 158 с.

11. Хабидов А.Ш., Кусковский В.С., Жиндарев Л.А., Хейнс Д.М. и др. Берега морей и внутренних водоемов: Актуальные проблемы геологии, геоморфологии и динамики. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1999. – 272 с.

12. Черниковский Д.М. Оценка связей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов на основе цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM. // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 3. – С. 28–39. DOI: 10.15372/SJFS20170303.

13. Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry. // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2000. – Vol. 33. – pp. 110–117.

14. Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press, 2016. – 486 p.

15. Jenness J. Topographic Position Index (TPI). – 2006. – Vol. 1.2. – 42 p.

16. Oliver M.A., Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. // International Journal of Geographical Information Systems. – 1990. – Vol. 4. Issue 3. – pp. 313–332. DOI: 10.1080/02693799008941549.

17. Ossowski R., Przyborski M., Tysiac P. Stability assessment of coastal cliffs incorporating laser scanning technology and a numerical analysis. // Remote Sensing. – 2019. Vol. 11. Issue 16. Art. No. 1951. DOI: 10.3390/rs11161951.

18. Ossowski R., Tysiac P. A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. // Polish Maritime Research. – 2018. – Vol. 25. Issue 2. – pp. 140–147. DOI: 10.2478/pomr-2018-0065.

19. Pettijohn F.J. Sedimentary rocks. New York: Harper & Row, 1957. – 718 p.

20. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Ntrebin P.B., Lipilin D.A. Analysis of the bottom topography of the reservoir due to sediment trapping (according to the Krasnodar Reservoir, Russia). // Geography, Environment, Sustainability. – 2023. – Vol. 16. No. 3. – pp. 102–112. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-290.

21. Reineck H.E., Singh I.B. Depositional sedimentary environments with reference to terrigenous clastics. Berlin; Heidelberg; New-York: Springer-Verlag, 1957. – 428 p.

22. Weiss A.D. Topographic Positions and Landforms Analysis (Conference Poster). 21st Annual ESRI. International User Conference. San Diego, CA, July 9-13, 2001.

23. Wilson M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. // Marine Geodesy. – 2007. – Issue 30. – pp. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.

## References

1. Antonenko M.V., Zimenko D.N., Pogorelov A.V. Application data of airborne laser scanning during engineering surveys. Oil industry. 2014. No. 11. pp. 6–11. (In Russ.)

2. Gavryukhova L.N. The mechanism of destruction of loess banks of a reservoir (case study of the Krasnodar Reservoir). The abstract of the dissertation of cand. geograph. science. 11.00.07. Saint Petersburg. KubSAU. 1998. 22 p. (In Russ.)

3. Dolotov Yu.S. Dynamic settings of coastal-marine relief formation and sedimentation. Moscow. Nauka. 1989. 296 p. (In Russ.)

4. Ivanov I.P., Trzhtsinsky Yu. B. Engineering geodynamics. Saint Petersburg. Nauka. 2001. 416 p. (In Russ.)

5. Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S. Interpolation of meteorological characteristics spatial distribution for spring snowmelt: analysis of methods. Geographical bulletin. 2017. Vol. 41. No. 2. pp. 126–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-126-137. (In Russ.)

6. Laguta A.A., Pogorelov A.V. Study of the dynamics of the banks of the Krasnodar reservoir using the LiDAR survey method. In: Proceedings of the XIII All-Russian scientific and technical conference with international participation “Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus”. Moscow. IIET RAS. 2023. pp. 539–546. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.93.99.071. (In Russ.)

7. Nazarov N.N., Gavryukhova L.N. Morphology and morphodynamics of loamy banks of reservoirs. Erosion and channel processes. Ed. R.S. Chalov. Issue 4. Moscow. MSU. 2005. pp. 130–141. (In Russ.)

8. Pogorelov A.V., Boyko E.S., Vertlib E.M. Using LiDAR surveying technologies to create a high-precision 3D model of the city: experience in modeling the city of Krasnodar, Russia. In: Proceedings of the Osh Technological University. 2023. Nos. 2-1. pp. 70–76. (In Russ.)

9. Pogorelov A.V., Vertlib E.M., Boyko E.S. 3D model of city tree plantations based on LiDAR survey data. Development and analysis. In: Proceedings of VI Caucasian International Environmental Forum “Comprehensive study of ecosystems in mountain areas”. Grozny. CSU. 2023. pp. 290–297. DOI: 10.36684/102-1-2023-290-297. (In Russ.)

10. Rules for the use of water resources of the Krasnodar Reservoir. Krasnodar. “Kubanvodproekt”. 2008. 158 p. (In Russ.)

11. Khabidov A.Sh., Kuskovsky V.S., Zhindarev L. A., Haynes D.M. et al. Coasts of seas and inland reservoirs: Current problems of geology, geomorphology and dynamics. Novosibirsk. Publishing House SB RAS. 1999. 272 p. (In Russ.)

12. Chernikhovskiy D.M. Assessment of the relationships between morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests using ASTER and SRTM digital terrain models. Siberian Journal of Forest Science. 2017. No. 3. pp. 28–39. DOI: 10.15372/SJFS20170303. (In Russ.)

13. Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2000. Vol. 33. pp. 110–117.

14. Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press. 2016. 486 p.

15. Jenness J. Topographic Position Index (TPI). 2006. Vol. 1.2. 42 p.

16. Oliver M.A., Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems. 1990. Vol. 4. Issue 3. pp. 313–332. DOI: 10.1080/02693799008941549.

17. Ossowski R., Przyborski M., Tysiac P. Stability assessment of coastal cliffs incorporating laser scanning technology and a numerical analysis. Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Issue 16. Art. No. 1951. DOI: 10.3390/rs11161951.

18. Ossowski R., Tysiac P. A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. Polish Maritime Research. 2018. Vol. 25. Issue 2. pp. 140–147. DOI: 10.2478/pomr-2018-0065.

19. Pettijohn F.J. Sedimentary rocks. New York: Harper & Row. 1957. 718 p.

20. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Netrobin P.B., Lipilin D.A. Analysis of the bottom topography of the reservoir due to sediment trapping (according to the Krasnodar Reservoir, Russia). Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. No. 3. pp. 102–112. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-290.

21. Reineck H.E., Singh I.B. Depositional sedimentary environments with reference to terrigenous clastics. Berlin; Heidelberg; New-York: Springer-Verlag. 1957. 428 p.

22. Weiss A.D. Topographic Positions and Landforms Analysis (Conference Poster). 21st Annual ESRI. International User Conference. San Diego, CA, July 9-13, 2001.

23. Wilson M.F.J., O’Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. Marine Geodesy. 2007. Issue 30. pp. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.

УДК 556.18

DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p

Оригинальная статья

## О техногенной деградации речных систем в Восточном Приазовье: гидрографический аспект

А.В. Погорелов <sup>1</sup>, Д.А. Липилин <sup>1, 2, 3</sup>, М.В. Кузякина <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149;

<sup>2</sup> Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13;

<sup>3</sup> Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, e-mail: LipiLin\_dmitrii@mail.ru

Статья поступила: 01.07.2024, доработана: 29.07.2024, принята к публикации: 05.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Исследуемая территория включает бассейны рек Бейсуг, Челбас, Албаши, Ясени, Ея, Чубурка общей площадью более 23 тыс. км<sup>2</sup> с суммарной длиной водотоков 7,66 тыс. км. Непрерывная техногенная деградация этих рек вследствие нарушения дренажа многочисленными перегораживающими сооружениями, распашки и перепланировки поверхности водосборов ведет к утрате реками своего водно-ресурсного потенциала. Гидрографические аспекты деградации указанных речных систем до сих пор слабо изучены. **Цель исследования.** Получение количественных оценок трансформации речных систем на базе гидрографических характеристик (длина водотоков, зарегулированность рек, распаханность водосборов и др.) за последние десятилетия (1999–2021 гг.) для последующей интерпретации в увязке с региональными водно-балансовыми изменениями. **Методы исследования.** Геоинформационные технологии применены при обработке материалов дистанционного зондирования Земли, а также при картографировании. Векторизация контуров частных водосборов и водно-эрозионной сети осуществлялась с помощью инструментов пространственного анализа в среде ГИС. Положение перегораживающих сооружений на реках определялось по данным спутниковых снимков с избирательной верификацией при проведении полевых работ (2018–2024 гг.). Распознавание типов земной поверхности / землепользования выполнено на спутниковых снимках посредством автоматизированной классификации. **Результаты работы.** На водосборах обнаружено около 3 тыс. перегораживающих сооружений со средней плотностью 0,13 ед./км<sup>2</sup>. Техногенные преобразования речных систем характеризуются изменениями структуры землепользования, сокращением длины водотоков и уменьшением густоты водно-эрозионной сети. Суммарная длина водотоков в исследуемых водосборах сократилась на 1618 км или на 17,4 %. Площадь сельскохозяйственных полей в отдельных бассейнах сократилась от 1,2 % (Бейсуг) до 4,7 % (Челбас). Повсеместно на водосборах низшего порядка выявлены «отмирания» верхних участков речной и балочной сети и нарушения дренированности территории. Динамика речной сети свидетельствует о неуклонной водохозяйственной деградации рек в Восточном Приазовье.

**Ключевые слова:** речные системы, Восточное Приазовье, техногенная деградация, водосбор, водно-эрозионная сеть, гидрографические характеристики, цифровая модель рельефа, геоинформационный анализ, спутниковые снимки.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20005 и при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-27-20005.

**Для цитирования:** Погорелов А.В., Липилин Д.А., Кузякина М.В. О техногенной деградации речных систем в Восточном Приазовье: гидрографический аспект. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 243-259. DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p

DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p

Original paper

# On technogenic degradation of river systems in the Eastern Azov region: hydrographic aspect

A.V. Pogorelov<sup>1</sup>, D.A. Lipilin<sup>1, 2, 3</sup>, M.V. Kuzyakina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str.,  
Krasnodar 350040, Russian Federation;

<sup>2</sup> Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin,  
13 Kalinina Str., Krasnodar 350044, Russian Federation;

<sup>3</sup> Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya Str., Krasnodar 350040,  
Russian Federation, e-mail: LipiLin\_dmitrii@mail.ru

Received: 01.07.2024, revised: 29.07.2024, accepted: 05.08.2024

**Abstract: Relevance.** The study area belongs to the catchment area includes the catchment areas of the Beisug, Chelbas, Albashi, Yaseni, Eya, Chuburka rivers with a total area of more than 23 thsd km<sup>2</sup> with a total length of watercourses of 7.66 thsd km. Continuous technogenic degradation of these rivers due to disruption of drainage by numerous partitioning structures, plowing and redevelopment of the surface of watersheds leads to the loss of rivers of their water resource potential. Hydrographic aspects of the degradation of these river systems are still insufficiently studied. **Aim.** Obtaining quantitative assessments of the transformation of river systems based on hydrographic characteristics (length of watercourses, regulation of rivers, plowed watersheds, etc.) over the past decades (1999–2021) for subsequent interpretation in connection with regional water balance changes. **Methods.** GIS technologies are used in the processing of Earth remote sensing materials, as well as in GIS mapping. Vectorization of the watersheds contours and the water-erosion network was carried out using spatial analysis tools in a full-featured GIS environment. The position of the blocking structures on the rivers was determined using satellite images with selective verification during field work (2018–2024). Recognition of land surface/land use types was performed on satellite images through automated classification. **Results.** About 3000 partitioning structures with an average density of 0.13 units/km<sup>2</sup> were found in the studied catchment areas. Technogenic transformations of river systems are characterized by changes in the structure of land use, a reduction in the length of watercourses and decrease in the density of the water-erosion network. The total length of watercourses decreased by 1618 km or 17.4%. The area of agricultural fields in individual watersheds decreased from 1.2% (Beisug) to 4.7% (Chelbas). Everywhere in lower-order watersheds «dying away» of the upper sections of the river and gullies network and disturbances in the drainage of the territory were revealed. The dynamics of the river network indicate the steady water degradation of rivers in the Eastern Azov region.

**Keywords:** river systems, Eastern Azov region, technogenic degradation, watershed, water erosion network, hydrographic characteristics, digital elevation model, GIS analysis, satellite images.

**Acknowledgments:** *The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-27-20005 and with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 24-27-20005.*

**For citation:** Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kuzyakina M.V. On technogenic degradation of river systems in the Eastern Azov region: hydrographic aspect. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(3): 243-259. DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p

## Введение

Речные системы в степной зоне Юга России под влиянием многообразных техногенных воздействий в течение многих десятилетий вовлечены в деградационные процессы, следствием которых являются, в частности, ухудшение естественных качеств компонентов речных систем, изменение их структурной организации, потеря способности самовосстановления. Состояние степных рек Краснодарского края «перешло черту экологического кризиса»<sup>1</sup>, что выражается в обмелении, заболачивании, уменьшении стока, снижении транспортирующей способности рек, усилении эрозионных процессов на водосборах, накоплении загрязняющих веществ в воде и донных отложениях. Так, слой иловых отложений в руслах степных рек достигает 1,5...7 м, что, в свою очередь, приводит к уменьшению глубин, эвтрофикации, ухудшению экологического состояния речных экосистем в целом. Подобная ситуация «не позволяет в полном объеме вести хозяйственную деятельность»<sup>1</sup>. Мероприятия по улучшению состояния рек сводятся к нерегулярной весьма затратной механической расчистке отдельных, небольших по протяженности (первые километры) участков русел некоторых рек. При этом в Краснодарском крае наблюдается устойчивый рост водопотребления на сельскохозяйственные и производственные нужды.

В условиях ограниченности водных ресурсов в рассматриваемом регионе особую озабоченность, наряду с другими аспектами деградации рек, вызывает водохозяйственная деградация [Суздалева, Горюнова, 2014], приводящая к утрате возможностей использования речных ресурсов при осуществлении хозяйственной деятельности.

Исследуемая территория относится к водосбору Азовского моря – внутреннего моря России. Азовская гидрографическая область охватывает площадь 556 км<sup>2</sup> и включает гидрографические районы: Крымский Восточный, Кубанский, Восточный Приазовский, Донской, Северный Приазовский [Ресурсы..., 1973; Лурье, Панов, 2021]. Подавляющая часть Азовской гидрографической области находится в условиях семиаридного климата и испытывает дефицит влаги. В данной работе анализируется трансформация гидрографических характеристик рек Восточного Приазовского района за последние десятилетия (1999–2020/21 гг.).

На территории Восточного Приазовского района, среднее годовое количество осадков довольно однородно и изменяется в пределах 460–600 мм. Слой годового стока (30–60 мм) как минимум в десять раз меньше осадков, что обусловлено величинами испарения (500 мм по данным [Владимиров и др., 1991]) и коэффициентами фильтрации местных почв (1 м/сут. при предельно-полевой влагоемкости 600 мм в слое 2 м согласно [Суслов, 2015]). Водный баланс территории, а также водообмен в Азовском море, определяются текущим состоянием речных систем через прямые (выпадение атмосферных осадков) и опосредующие процессы. Понятно, что составляющие водного баланса (поверхностный и подземный сток, эвапотранспирация, инфильтрация) регулируются техногенными изменениями почвенно-растительного покрова, проницаемости, уклонов поверхности и т.п. Техногенные воздействия в виде агротехнической деятельности на водосборах, влияние гидротехнических сооружений и инженерных мероприятий на русловые процессы име-

<sup>1</sup> Архив документов Краснодарского края. Постановление от 16.02.2011 г. № 2425-П «Об экологическом состоянии степных рек на территории Краснодарского края». Электронный ресурс: <https://krasnodar.gov.ru/> (дата обращения 30.05.2024)

ют, в совокупности, неуправляемый характер. Вклад техногенных преобразований в формирование речного стока на исследуемой территории, предполагающий натурные измерения, к сожалению, слабо изучен.

Настоящая статья продолжает исследования техногенной трансформации речной сети в Краснодарском крае [Погорелов и др., 2022]. Действительно, речные системы (Ея, Челбас, Албаши, Бейсуг и др.) фактически представляют собой природно-техногенные системы с измененными гидрографическими характеристиками, нарушенными показателями вещественного обмена, высокой зарегулированностью стока. Основные причины – огромное количество перегораживающих сооружений на реках, создание искусственной ирригационной сети, перепланировка склонов водосборов, распашка поймы (зачастую до уреза воды) и русел. Отдельную проблему представляет нарушение водоохранных и санитарных зон вдоль водных объектов, характерное для аграрных регионов Юга России. В исследуемых бассейнах нами обнаружено 2991 перегораживающих сооружений (плотин, преимущественно земляных), плотность которых на территории составляет 0,13 ед./км<sup>2</sup>. В соответствии с ландшафтно-гидрологическим подходом [Косолапов и др., 1995; Позаченюк и др., 2022; Сазонов и др., 2022] существует системная взаимосвязь между ландшафтной структурой водосбора, в частности, – между морфологическими свойствами водосбора и характеристиками стока рек, стекающих с этого водосбора.

Понятно, что деградация гидрографической сети оказывает влияние на гидроэкологические показатели местных агроландшафтов (поверхностный сток, влагозапасы в слое активного влагообмена, уровень грунтовых вод) [Голубаш, Сенцова, 2009]. Имеющиеся сведения о трансформации гидрографической сети в степной зоне [Гайдай, 2006; Белюченко, 2010, 2017; Суслов, 2015; Экология речных..., 2017], охватывающие преимущественно биологические, химические, биоэкологические аспекты, недостаточны для получения внятных представлений об изменениях элементов влагооборота и влагообеспеченности местных ландшафтов в связи с техногенным фактором.

В настоящей работе оценка изменений морфометрических и морфологических (гидрографических) характеристик (длина водотоков, площадь водосборов, густота речной сети, распаханность водосборов, урбанизированность и др.)<sup>2</sup> выполняется с использованием данных дистанционного зондирования (спутниковые снимки, цифровые модели рельефа) на основе предлагаемой методики [Погорелов и др., 2022].

### Объект исследования

Восточный Приазовский район расположен в междуречье Дона и Кубани и охватывает северную часть Азово-Кубанской низменности. Район включает 605 маловодных степных рек, из которых река Ея – самая крупная по площади водосбора и длине. Анализируются бассейны рек Бейсуг, Челбас, Албаши, Ясени, Ея, Мокрая Чубурка, расположенные на территории Краснодарского края и отчасти Ростовской области (рис. 1). Азово-Кубанская низменность, занимающая западную часть Предкавказской депрессии, представляет собой слабонаклоненную к северо-западу аккумулятивную равнину с преобладающими абсолютными высотами 20–150 м. Низменность сложена на поверхности лессовидными суглинками и глинами, вблизи побережья – дельтовыми отложениями.

<sup>2</sup> Р 52.08.874-2018. Рекомендации. Определение гидрографических характеристик картографическим способом. Росгидромет. СПб. 2018. 172 с.

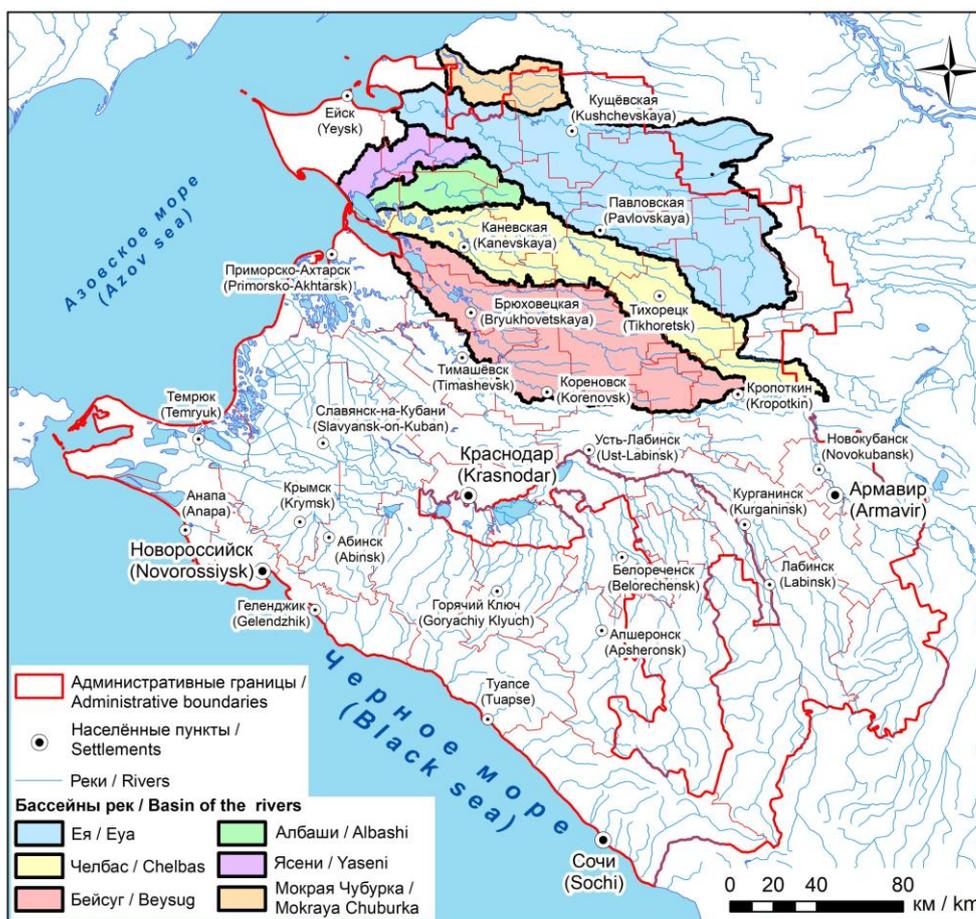


Рис. 1. Расположение исследуемых речных бассейнов на территории Краснодарского края и Ростовской области /

Fig. 1. Location of the studied river basins in the Krasnodar and Rostov territory

Поверхность низменности слабо расчленена. Часть исследуемой территории фактически лишена речной сети (Ейский полуостров, примыкающий к водосборам рек Ея и Ясени) (рис. 1). Существующие речные долины неглубокие; плоские водоразделы представляют собой, скорее, водораздельные пространства. Долины рек, не разработанные в верховьях, расширяются в среднем течении и достигают максимальной ширины в низовьях (у Еи – 10–12 км, Челбаса – 5–6 км). Ширина русел рек меняется в пределах от 5–30 м в верховьях до 60–100 м в среднем течении, достигая наибольшей величины на запруженных участках (300 м и более). Русла рек в большинстве своем неглубокие – 0,5–1,5 м. В западной части низменности уровень рек располагается почти вровень с местностью; на дельтовых участках повсеместно развиты плавни. Береговая линия Азовского моря здесь весьма извилиста и осложнена полуостровами, косами, лиманами.

Особенность гидрогеологического строения – изменчивый по вертикали и горизонтали линзовидный характер залегания водоносных горизонтов, представленных суглинками, песками и галечниками. Грунтовые воды – один из источников питания исследуемых рек – характеризуются повышенной минерализацией. Главный источник питания – атмосферные осадки с максимумом (200–300 мм) в теплое время года. Однако летом участие атмосферных осадков в формировании речного

стока заметно снижается из-за высоких потерь на испарение. Снежный покров характеризуется неустойчивостью и малой продолжительностью залегания. Течение на реках отмечается обычно в период весеннего половодья в марте-апреле с максимальной скоростью не более 0,6–0,7 м/с. Подъёмы уровня во время половодья незначительные, в многоводные годы могут достигать 1–1,5 м и более, что, тем не менее, приводит к затоплению многих плотин. Минимальные уровни наблюдаются в конце лета–начале осени. В целом годовому ходу уровней воды на реках свойственна устойчивость: половодье и паводки сглажены.

### Методы исследования

В расчетах характеристик речных систем авторы опирались на приемы гидрографии, при построении карт и проведении пространственных расчетов – на инструменты ГИС-картографирования и геоанализа. Подобные приемы в исследованиях речных бассейнов широко применяются в разных регионах [Погорелов и др., 2022; Ashok, Pravin, 2014; Daramola et al., 2022; Dwivedi et al., 2022; Gura et al., 2021; Kumar et al., 2021; Nikolova et al., 2022; Ragi, Mallikarjuna, 2023; Sondarva et al., 2023; Chhetri, 2023 и др.]. Векторизация сети тальвегов (постоянных и временных водотоков) и границ речных бассейнов проводилась по откорректированной глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM2 [ASTER..., 2009] с пространственным разрешением 30 м. При выделении бассейнов более низкого порядка мы исходили из относительной гомогенности развития водно-эрозионной сети в границах выделяемых бассейнов. Отметим, что плоские междуречья обуславливают неопределенность положения линий водоразделов, что, вместе с различиями в определении конечных створов устьев рек (впадение в Азовское море или в лиман) приводит к расхождению оценок площади речных бассейнов и длин рек в справочных и литературных источниках. Уточнение положения сети постоянных и временных водотоков, а также результатов дешифрирования типов землепользования осуществлялось нами с помощью сервиса Google Earth Pro.

Среди гидрографических характеристик степных рек существенной является распаханность водосборов. Распознавание типов землепользования за анализируемый период 1999–2020/21 гг. выполнено по космическим снимкам Landsat 7/8 (табл. 1), пространственное разрешение которых сопоставимо с разрешением ЦМР ASTER GDEM2. Для соблюдения корректности сравнения разновременных снимков предпочтение отдавалось датам съемки, приходящимся на межень.

*Таблица 1 / Table 1*

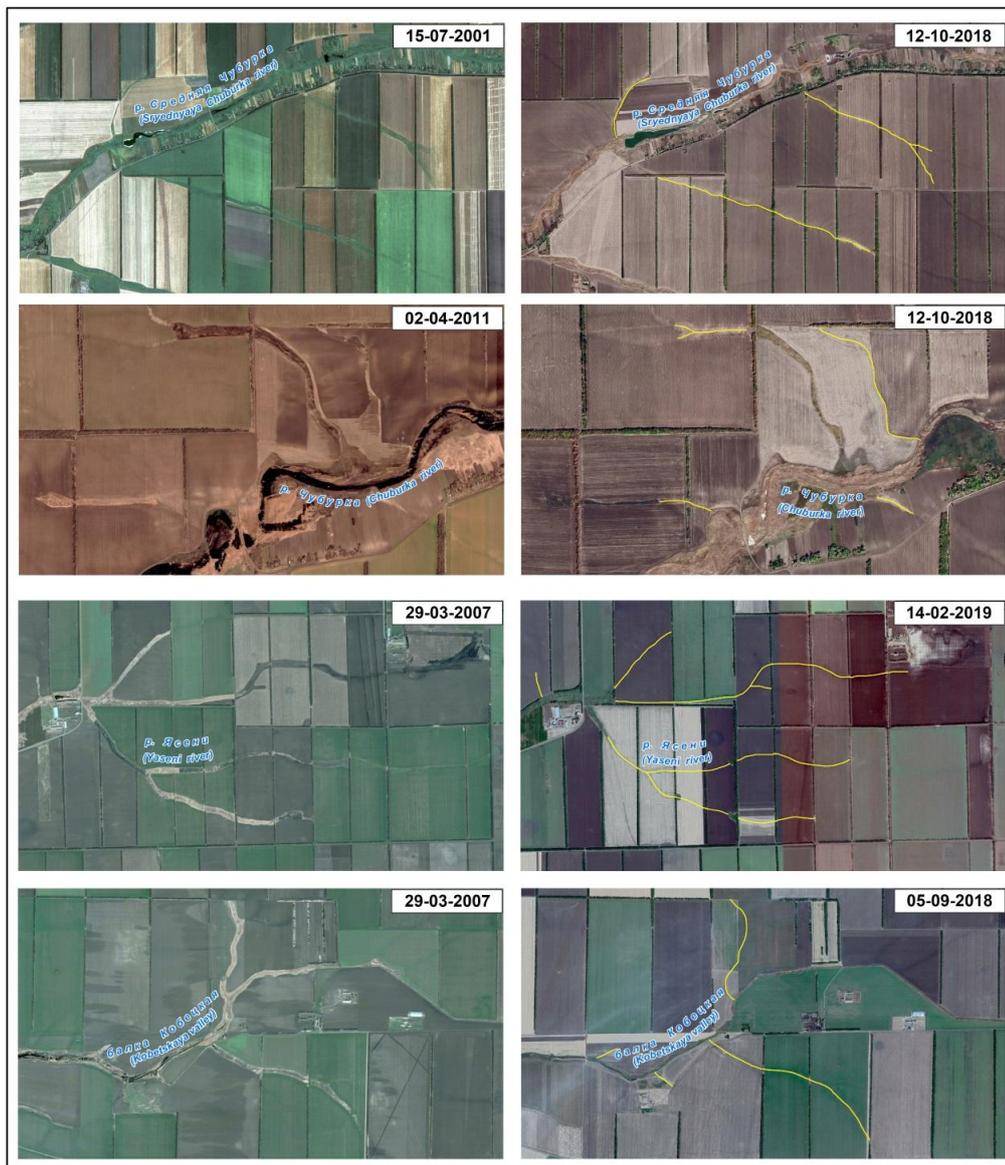
#### Сведения об использованных космических снимках / Information about the used satellite images

Космический аппарат / Satellite	Дата снимка / Date	ID снимка / ID of satellite images
Бассейн р. Ея / Eya River basin		
Landsat 7	01.10.1999	LE71750281999274NSG01
Landsat 7	03.10.1999	LE71730281999276SGS00
Landsat 7	11.11.1999	LE71740281999315SGS00

Landsat 8	10.07.2021	LC81740282021191LGN00
Landsat 8	17.07.2021	LC81750282021198LGN00
Landsat 8	19.07.2021	LC81730282021200LGN00
Бассейны рек Мокрая Чубурка и Ясени / Yaseny and Mokraya Chuburka River basins		
Landsat 7	30.08.1999	LE71750271999242SGS00
Landsat 7	30.08.1999	LE71750281999242SGS00
Landsat 8	18.08.2021	LC81750272021230LGN00
Landsat 8	18.08.2021	LC81750282021230LGN00
Бассейны рек Челбас и Албаши / Chelbas and Albashi River basins		
Landsat 7	01.10.1999	LE71750281999274NSG01
Landsat 7	03.10.1999	LE71730281999276SGS00
Landsat 7	11.11.1999	LE71740281999315SGS00
Landsat 8	18.09.2020	LC81730282020262LGN00
Landsat 8	12.11.2020	LC81740282020317LGN00
Landsat 8	19.11.2020	LC81750282020324LGN00
Бассейн р. Бейсуг / Beysug River basin		
Landsat 7	01.10.1999	LE71750281999274NSG00
Landsat 7	11.11.1999	LE71740281999315SGS00
Landsat 8	09.09.2020	LC81740282020253LGN00
Landsat 8	12.11.2020	LC81740282020317LGN00

За основу классификации принята номенклатура базы данных покрытия / землепользования, разработанная для европейской программы CORINE Land Cover (CLC)<sup>3</sup>. Использование этой номенклатуры свидетельствует о целесообразности ее применения для анализа техногенной деградации речных систем в соответствии с разработанной методикой дешифрирования космических снимков [Погорелов и др., 2022]. Для исследуемой территории выделено четыре типа характерных поверхностей / землепользования: 1) сельскохозяйственные угодья (Agricultural areas), 2) населенные пункты и объекты инфраструктуры (Artificial surfaces), 3) плавни (болота) и лесополосы (Wetland, Forests and semi-natural areas), 4) водные объекты (Water body). Объединение плавней и лесополос в единый тип обусловлено сложностью распознавания болотной и древесной растительности на космических снимках. Приемы оценки техногенных изменений элементов водно-эрозионной сети на снимках иллюстрирует рисунок 2.

<sup>3</sup> <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>



*Рис. 2. Уменьшение длины водно-эрозионной сети в результате распашки и вертикальной планировки поверхности в бассейнах рек Мокрая Чубурка и Ясени. Уничтоженные водотоки выделены желтым цветом /*

*Fig. 2. Decreases in the length of the erosion network as a result of plowing and vertical leveling of the surface in the Mokraya Chuburka and the Yaseny river basin. Eliminated streams are highlighted in yellow*

## Результаты работы и их обсуждение

**Сокращение длины водотоков.** В процессе векторизации границ бассейнов на исследуемой территории выделено 72 речных бассейна низших порядков, площадь которых варьирует от 70 до 609,5 км<sup>2</sup> (рис. 3). Длина водотоков среди гидрографических характеристик наиболее показательна в аспекте деградации речной сети (табл. 2). За анализируемый период произошло повсеместное уменьшение суммарной длины водотоков в каждом исследуемом речном бассейне в интервале от 15,7 % (бассейн р. Челбас) до 32,9 % (бассейн р. Ясени).

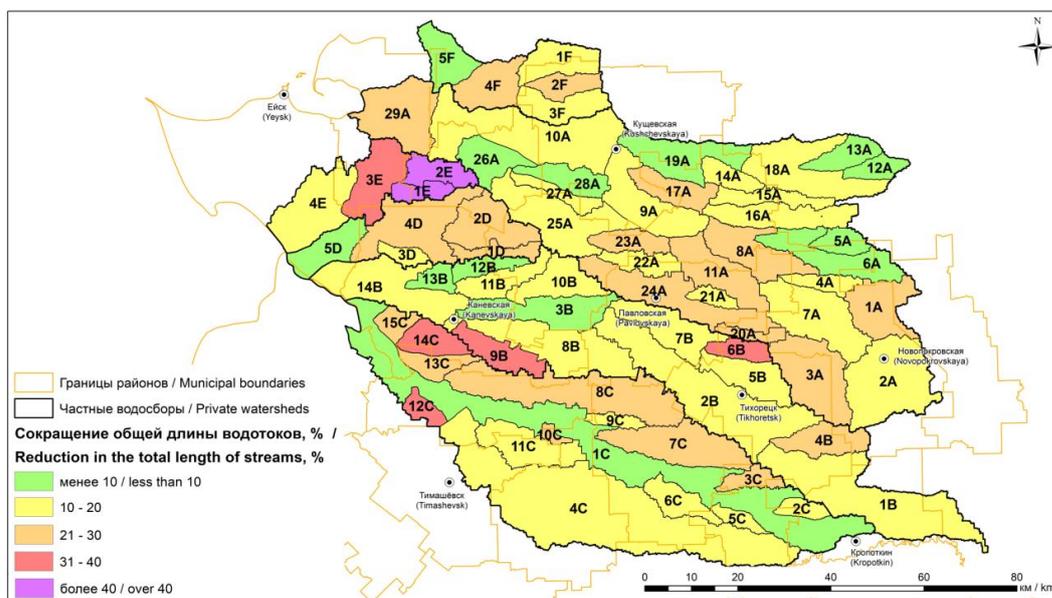


Рис. 3. Выделенные речные бассейны низших порядков. Сокращение общей длины водотоков за период 1999–2021 гг. в исследуемых речных бассейнах /  
 Fig. 3. Allocated river basins of lower orders. Changes in the length of watercourses for the period 1999–2021 in the studied river basins

Таблица 2 / Table 2

**Изменения за 1999–2020/21 гг. длины водотоков в исследуемых бассейнах /  
 Changes for 1999–2020/21 in the length of the studied watercourses**

№	Бассейн / Basin	Площадь, км <sup>2</sup> / Area, km <sup>2</sup>	Длина водотоков, км / Length of water object, km		
			1999 г. / 1999 year	2020/21 г. / 2020/21 year	Изменение за 1999–2020/21 гг., % / Change for 1999-2020/21 year, %
1	Бейсуг / Beysug	5994,60	2721,90	2252,50	-17,20
2	Челбас / Chelbas	5057,05	2215,22	1868,27	-15,66
3	Албаша / Albashi	1210,65	430,11	340,09	-20,93
4	Ясени / Yaseni	1033,60	258,82	173,69	-32,89
5	Ея / Eya	8654,18	3226,52	2674,65	-17,10
6	Мокрая Чубурка / Mokraya Chuburka	1077,53	422,00	347,08	-17,75

Различия в изменениях длины водотоков в частных бассейнах в Восточном Приазовье за 1999–2021 гг. показаны (рис. 3). Как видим (табл. 3), в отдельных бассейнах, в зависимости от ситуации с распашкой и планировкой поверхности, относительные сокращения длины водотоков за 22 года имеют разный порядок (от 3,2 до 43,5 %), что подтверждается данными бассейнов рек Ясени и Мокрая Чубурка.

Наибольшему сокращению длины водотоков подвержены водосборы, где ползучая экспансия пашни приводит к уничтожению верхних звеньев водно-эрозионной сети (рис. 2, табл. 3). Последнее обусловлено еще и тем, что в своих верховьях реки зачастую не имеют постоянного стока. Полученные результаты указывают на деградацию речной сети, свойственную в целом речным системам Азово-Кубанской равнины (рис. 3, табл. 2). Подобные изменения, вызванные «отмиранием» верховий рек в водосборах за последние десятилетия, предопределяют последующее нарушение активности флювиальных процессов и дренированности территории.

Таблица 3 / Table 3

**Изменения за 1999–2021 гг. длины водотоков в бассейнах рек  
Ясени и Мокрая Чубурка /  
Changes for 1999–2021 in the length of watercourses in the basins  
of the Yaseni and Mokraya Chuburka rivers**

№	Частные бассейны / Local basins	Площадь, км <sup>2</sup> / Area, km <sup>2</sup>	Длина водотоков, км / Length of watercourses, km		
			1999 г. / 1999 year	2021 г. / 2021 year	Изменение за 1999–2021 гг., % / Change for 1999–2021 year, %
Бассейн р. Ясени / Yaseny River basin					
1E	Балка Кобецкая / Kobetskaya valley	99,8	31,21	17,63	-43,51
2E	Ясени (верхнее течение) / Yaseni (upper flow)	164,75	62,69	36,69	-41,47
3E	Ясени (среднее течение) / Yaseni (middle flow)	322,37	101,45	66,65	-34,3
4E	Ясени (нижнее течение) / Yaseni (down flow)	446,68	63,47	52,72	-16,94
Бассейн р. Мокрая Чубурка / Mokraya Chuburka River basin					
1F	Чубурка / Chuburka	234,36	107,29	89,19	-16,87
2F	Средняя Чубурка / Middle Chuburka	136,18	64,4	48,78	-24,25
3F	Мокрая Чубурка (верхнее течение) / Mokraya Chuburka (upper flow)	225,11	104,07	89,47	-14,03
4F	Мокрая Чубурка (среднее течение) / Mokraya Chuburka (middle flow)	261,09	95,20	70,21	-26,25
5F	Мокрая Чубурка (нижнее течение) / Mokraya Chuburka (down flow)	218,79	51,04	49,43	-3,15

**Изменение структуры землепользования.** На рисунках 4 и 5 на материалах бассейнов рек Мокрая Чубурка и Ясени представлены некоторые результаты распознавания на спутниковых снимках типов землепользования в их динамике на отдельных участках водосборов. Обобщенные сведения о распределении типов поверхности в речных бассейнах, рассматриваемые с позиции гидрографических характеристик (распаханность, урбанизированность), приведены в таблице 4.

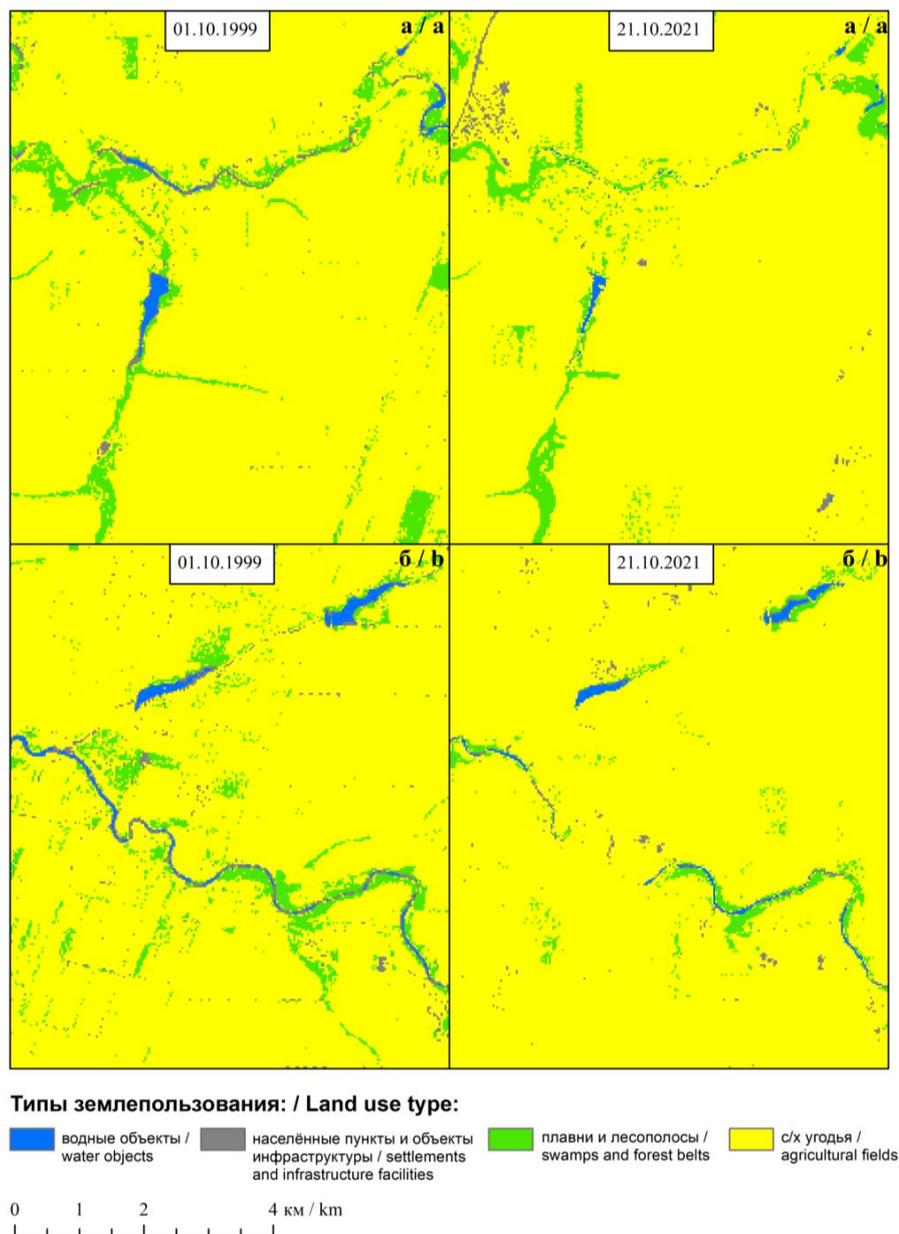
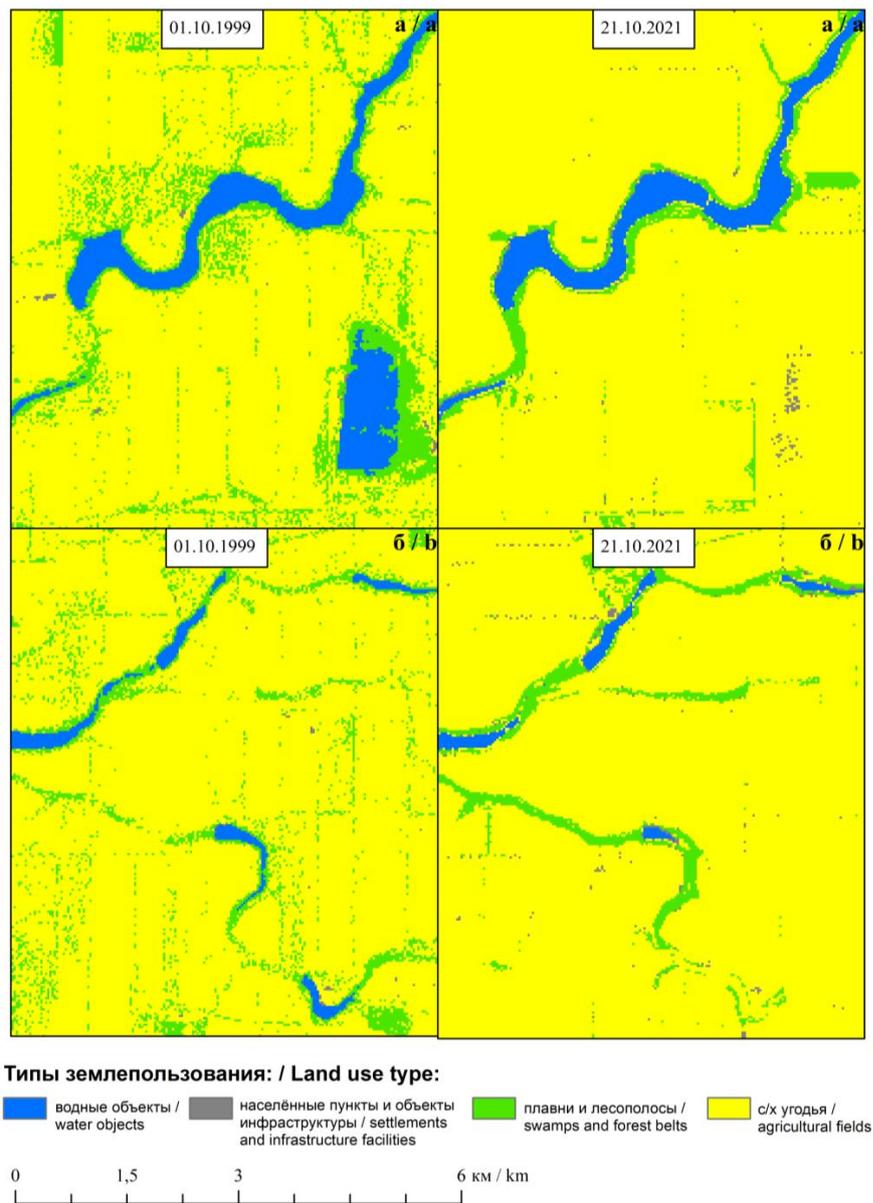


Рис. 4. Дешифрирование типов землепользования по данным спутников Landsat и примеры изменений землепользования в 1999–2021 гг. в бассейне р. Мокрая Чубурка в районе населенных пунктов х. Христичево (а) и х. Марков (б) /

Fig. 4. Recognition of land use types from Landsat satellites and examples of land use changes in 1999–2021 in the Mokraya Chuburka river basin in the area of settlements Khristichevo (a) and Markov (b)



*Рис. 5. Дешифрирование типов землепользования по данным спутников Landsat и примеры изменений землепользования в 1999–2021 гг. в бассейне р. Ясени в районе населенных пунктов с. Новошчебиновская (а) и с. Новоясенская (б) /*

*Fig. 5. Recognition of land use types from Landsat satellites and examples of land use changes in 1999–2021 in the Yaseni river basin in the area of settlements Novoshchebinovskaya (a) and Novoyasenskaya (b)*

Структуре землепользования свойственны следующие особенности. Подавляющая часть территории анализируемых бассейнов занята сельскохозяйственными полями (82,5–94,2 % по данным 2021 г.). При этом доля пашни за 1999–2021 гг. в бассейнах рек Бейсуг, Челбас, Албаши, Ея сократилась на 1,2–4,7 %, а в бассейнах рек Мокрая Чубурка и Ясени возросла на 0,7–11,1 %. Сокращение площади пашни объясняется отчасти ростом площади земель населенных пунктов (бассейны рек Бейсуг, Челбас, Албаши). Показательно, что во всех бассейнах одновременно с сокращением длины водотоков наблюдается и сокращение площади, занятой водны-

ми объектами (табл. 4), что дополнительно указывает на техногенную перестройку водообменных процессов в регионе.

Таблица 4 / Table 4

**Распределение типов поверхностей в частных бассейнах  
в исследуемых речных бассейнах /  
Distribution of surface types in basins in the in the studied river basins**

№	Бассейн / Basin	Площадь, км <sup>2</sup> / Area, km <sup>2</sup>	Количество частных бассейнов / Amount of local basins	1999 г. / 1999 year				2020/21 гг. / 2020/21 year			
				Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %	Населенные пункты, % / Settlements, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %
1	Бейсуг / Veysug	5994,60	15	2,09	9,24	1,95	86,71	2,87	10,09	1,54	85,49
2	Челбас / Chelbas	5057,05	16	3,49	3,64	2,57	90,30	8,03	4,12	2,24	85,61
3	Албаша / Albashi	1210,65	3	2,18	5,32	8,20	84,30	3,64	5,70	8,14	82,52
4	Ясени / Yaseni	1032,77	4	0,55	16,72	4,32	78,41	0,80	5,86	3,99	89,35
5	Ея / Eya	8654,18	29	5,84	4,22	1,37	88,58	5,57	9,17	1,16	84,10
6	Мокрая Чубурка / Mokraya Chuburka	1076,67	5	1,76	4,01	0,76	93,47	1,95	3,3	0,58	94,17

Установленное распределение типов земной поверхности (табл. 4) отражает сложившуюся структуру землепользования на территории Азово-Кубанской равнины и одновременно показывает безусловное доминирование агрофитоценозов (пашни) в ландшафтообразовании при подчиненной роли земель, занятых водными объектами, лесополосами и застройкой.

### Выводы

1. Признаками деградации гидрографической сети в бассейнах рек Бейсуг, Челбас, Албаша, Ясени, Ея, Мокрая Чубурка на площади более 23 тыс. км<sup>2</sup> является постепенное разрушение структурной (в гидрографическом понимании) и функциональной организации рек как экосистем. По данным полевых исследований и анализа спутниковых снимков в каждом речном бассейне за 1999–2020/21 гг. отмечено сокращение суммарной длины водотоков от 15,7 (бассейн р. Челбас) до 32,9 % (бассейн р. Ясени). В бассейнах низшего порядка уменьшение общей длины водо-

токов колеблется от 3,2 до 43,5 %. Подобное уменьшение вызвано, главным образом, «отмиранием» верхних звеньев водно-эрозионной сети при экспансии пахотных земель. В исследуемых речных бассейнах одновременно с сокращением длины водотоков зафиксировано и сокращение площади, занятой водными объектами.

2. При весьма низких коэффициентах стока у исследуемых степных рек (около 3,5–7,5 %) отмирание верховий рек приводит к местным нарушениям горизонтальной и вертикальной фильтрации и ухудшению условий питания грунтовых вод, что неблагоприятно сказывается на питании рек в Восточном Приазовье в целом.

3. Спутниковые снимки позволяют отслеживать динамику землепользования в речных бассейнах в показателях гидрографических характеристик, включая распаханность и урбанизированность. В структуре землепользования во всех бассейнах доминируют пахотные земли (82,5–94,2 % площади); доля пашни за 1999–2021 гг. в крупных речных бассейнах (Бейсуг, Челбас, Ея, Албаши) сократилась на 1,2–4,7 %, главным образом, за счет увеличения площади застройки. Доля площади населенных пунктов и объектов техногенной инфраструктуры практически везде растет, достигая в разных бассейнах 0,8–8 %.

4. Техногенные воздействия на экосистемы рек Восточного Приазовья (агротехническая и инженерная деятельность на водосборах, влияние гидротехнических сооружений на русловые процессы) и вызванные ими изменения гидрографических характеристик носят неуправляемый характер. При сохранении эффектов деградации речных систем водохозяйственная ситуация в регионе будет в обозримой перспективе обостряться.

## Литература

1. Белюченко И.С. Функционирование степных рек Краснодарского края и перспективы их развития. // Экология речных ландшафтов. Сборник статей по материалам I Международной экологической конференции. / Отв. за вып. Н.Н. Мамась. Краснодар: КубГАУ, 2017. – С. 28–43.
2. Белюченко И.С. Экологическое состояние бассейнов степных рек Кубани и перспективы их развития. // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2010. – Т. 6. № 2. – С. 5–12.
3. Владимиров Л.А., Гигинейшвили Г.Н., Джавахишвили А.И., Закарашвили Н.Н. Водный баланс Кавказа и его географические закономерности. Тбилиси: Мецниереба, 1991. – 141 с.
4. Гайдай А.А. Оценка экологического состояния бассейна реки Бейсуг и предложения по улучшению его функционирования: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. / Гайдай Андрей Александрович. – Краснодар: КГАУ, 2006. – 179 с.
5. Голубаш Т.Ю., Сенцова Н.И. Количественная оценка изменения компонентов водного баланса агроландшафта как основа рационального водопользования. // Природообустройство. – 2009. – № 1. – С. 15–23.
6. Косолапов А.Е., Кувалкин А.В. Мордвинцев М.М., Магомедзагиров З.М. Ландшафтно-гидрологический подход к обоснованию сети мониторинга и управления малым водосбором. // Мелиорация и водное хозяйство. – 1995. – № 6. – С. 25–26.
7. Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: Гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2021. – 672 с.
8. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Дудкина А.А., Копанева О.В. О техногенных преобразованиях речной сети на Азово-Кубанской равнине (реки Челбас, Албаши). // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». – 2022. – Т. 28. № 2. – С. 567–582. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582.

9. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Киселёв Е.Н. Об изменении гидрографических характеристик рек в степных агроландшафтах за последние десятилетия (на примере бассейна р. Бейсуг, Краснодарский край). // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». – 2021. – Т. 27. № 4. – С. 19–32. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32.
10. Позаченюк Е.А., Тимченко З.В., Кутикова Е.В. Ландшафтно-гидрологический подход к изучению речных ландшафтов Алуштинского амфитеатра. // Учёные записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8(74). № 1. – С. 70–82.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. / Под редакцией В.В. Куприянова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 447 с.
12. Сазонов А.Д., Закруткин В.Е., Решетняк О.С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 117–130. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.47.009.
13. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: ООО ИД ЭНЕРГИЯ, 2014. – 456 с.
14. Суслов О.Н. Степные реки Краснодарского края. Краснодар: Куб ГАУ, – 2015. 256 с.
15. Экология речных ландшафтов. Сборник статей по материалам I Международной экологической конференции. Отв. за вып. Н.Н. Мамась. Краснодар: КубГАУ, 2017. – 267 с.
16. Ashok S.S., Pravin L.Y. Morphometric Analysis of Watershed using GIS and RS: A Review. // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2014. – Vol. 3. Issue 11. – pp. 599–602.
17. ASTER Global DEM Validation. Summary Report. ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. – 2009. 28 p.
18. Chhetri B.A. Quantitative Analysis of Morphometric Parameters Using Remote Sensing and GIS Techniques in the Geil River Basin of Darjeeling Himalaya. // Ecology, Environment and Conservation. – 2023. – Vol. 29. No. 4. – pp. 1940–1948. DOI: 10.53550/eec.2023.v29i04.082.
19. Daramola J., Lam K.C., Ekhwan T.M., Mokhtar J., Salihu Y.M., Babayahaya A.M. Assessment of landuse/landcover dynamics of Kaduna watershed, using remote sensing data and GIS techniques. // Malaysian Journal of Society and Space. – 2022. – Vol. 18. No. 2. – pp. 32–47. DOI: 10.17576/geo-2022-1802-03.
20. Dwivedi L., Pandey R., Tripathi Sh. Remote sensing and GIS based morphometric characterization of Bichiya river watershed of Rewa district, MP. // International Journal of Applied Research. – 2022. – Vol. 8. No. 6. – pp. 101–107. DOI: 10.22271/allresearch.2022.v8.i6b.9829.
21. Gura D.A., Markovskii I.G., Pshidatok S.K. Methods of monitoring real estate objects using three-dimensional laser scanning in the specifics of urban lands. // Geodezia i Kartografia. – 2021. – Vol. 82. No. 4. – pp. 45–53. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-970-4-45-53.
22. Kumar V., Sen S., Chauhan P. Geo-morphometric prioritization of Aglar micro watershed in Lesser Himalaya using GIS approach. // Modeling Earth Systems and Environment. – 2021. – Vol. 7. No. 2. – pp. 1269–1279. DOI: 10.1007/s40808-020-01000-8.
23. Nikolova V., Mitova M., Dimitrov E. Topographic factor of water erosion – analysis of watershed morphometry and RUSLE LS factor in GIS environment. // Review of the Bulgarian Geological Society. – 2022. – Vol. 83. No. 1. – pp. 3–14. DOI: 10.52215/rev.bgs.2022.83.1.3.
24. Ragi R., Mallikarjuna V. Watershed Delineation and Morphometric Analysis Using GIS and Remote Sensing. // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 399. Art. No. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202339902002.
25. Sondarva K.N., Shrivastava P.K., Jayswal P.S. Basic morphometric analysis of watershed or River basin using GIS: a review. // Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences. – 2023. – Vol. 25. No. 3. – pp. 87–92.

## References

1. Belyuchenko I.S. Functioning of the steppe rivers of the Krasnodar territory and prospects for their development. Ecology of river landscapes. In: Collection of articles on the materials of the I International Ecological Conference. Responsible for release N.N. Mamas. Krasnodar. KubGAU. 2017. pp. 28–43. (In Russ.)
2. Belyuchenko I.S. Ecological state of the basins of the steppe rivers of the Kuban and prospects for their development. Ecological Bulletin of the North Caucasus. 2010. Vol. 6. No. 2. pp. 5–12. (In Russ.)
3. Vladimirov L.A., Gigineishvili G.N., Javakhishvili A.I., Zakarashvili N.N. Water balance of the Caucasus and its geographical patterns. Tbilisi. Metsniereba. 1991. 141 p. (In Russ.)
4. Gaidai A.A. Assessment of the ecological state of the Beisug river basin and proposals for improving its functioning. Dissertation of candidate of biological sciences. 03.00.16. Krasnodar. KSAU. 2006. 179 p. (In Russ.)
5. Golubash T.Yu., Sentsova N.I. Quantitative assessment of changes in the components of the water balance of the agricultural landscape as the basis for rational water use. Nature Management. 2009. No. 1. pp. 15–23. (In Russ.)
6. Kosolapov A.E., Kuvalkin A.V., Mordvintsev M.M., Magomedzagirov Z.M. Landscape-hydrological approach to substantiating a network for monitoring and managing a small watershed. Melioration and Water Management. 1995. No. 6. pp. 25–26. (In Russ.)
7. Lurie P.M., Panov V.D. Rivers of the Azov Sea basin: Hydrography and runoff regime. Rostov-on-Don. Donskoy publishing house. 2021. 672 p. (In Russ.)
8. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Dudkina A.A., Kopaneva O.V. On technogenic transformations of the river network in the Azov-Kuban Plain (Chelbas, Albashi rivers). In: Proceedings of the International Conference “InterCarto. InterGIS”. 2022. Vol. 28. No. 2. P. 567–582. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582. (In Russ.)
9. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kiselev E.N. Changes in the hydrographic characteristics of rivers in steppe agrolandscapes over the past decades (on the example of the Beysug river, Krasnodar territory). In: Proceedings of the International Conference “InterCarto. InterGIS”. 2021. Vol. 27. No. 4. pp. 19–32. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32. (In Russ.)
10. Pozachenyuk E.A., Timchenko Z.V., Kutikova E.V. Landscape-hydrological approach to the study of river landscapes of the Alushta amphitheater. Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. 2022. Vol. 8 (74). No. 1. pp. 70–82. (In Russ.)
11. Surface water resources of the USSR. Vol. 8. North Caucasus. Ed. V.V. Kupriyanov. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1973. 447 p. (In Russ.)
12. Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S. Temporal variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoi Egorlyk River basin under anthropogenic impact and climate change. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 117–130. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.47.009. (In Russ.)
13. Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. Technogenesis and degradation of surface water bodies. Moscow. LLC ID ENERGY. 2014. 456 p. (In Russ.)
14. Suslov O.N. Steppe rivers of the Krasnodar Territory. Krasnodar. KubSAU. 2015. 256 p. (In Russ.)
15. Ecology of river landscapes. In: Collection of articles on the materials of the I International Ecological Conference. Ed. N.N. Mamas. Krasnodar. KubGAU. 2017. 267 p. (In Russ.)
16. Ashok S.S., Pravin L.Y. Morphometric Analysis of Watershed using GIS and RS: A Review. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2014. Vol. 3. Issue 11. pp. 599–602.
17. ASTER Global DEM Validation. Summary Report. ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. 2009. 28 p.

18. Chhetri B.A. Quantitative Analysis of Morphometric Parameters Using Remote Sensing and GIS Techniques in the Geil River Basin of Darjeeling Himalaya. *Ecology, Environment and Conservation*. 2023. Vol. 29. No. 4. pp. 1940–1948. DOI: 10.53550/eec.2023.v29i04.082.
19. Daramola J., Lam K.C., Ekhwan T.M., Mokhtar J., Salihu Y.M., Babayahaya A.M. Assessment of landuse/landcover dynamics of Kaduna watershed, using remote sensing data and GIS techniques. *Malaysian Journal of Society and Space*. 2022. Vol. 18. No. 2. pp. 32–47. DOI: 10.17576/geo-2022-1802-03.
20. Dwivedi L., Pandey R., Tripathi Sh. Remote sensing and GIS based morphometric characterization of Bichiya river watershed of Rewa district, MP. *International Journal of Applied Research*. 2022. Vol. 8. No. 6. pp. 101–107. DOI: 10.22271/allresearch.2022.v8.i6b.9829.
21. Gura D.A., Markovskii I.G., Pshidatok S.K. Methods of monitoring real estate objects using three-dimensional laser scanning in the specifics of urban lands. *Geodezia i Kartografia*. 2021. Vol. 82. No. 4. pp. 45–53. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-970-4-45-53.
22. Kumar V., Sen S., Chauhan P. Geo-morphometric prioritization of Aglar micro watershed in Lesser Himalaya using GIS approach. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2021. Vol. 7. No. 2. pp. 1269–1279. DOI: 10.1007/s40808-020-01000-8.
23. Nikolova V., Mitova M., Dimitrov E. Topographic factor of water erosion – analysis of watershed morphometry and RUSLE LS factor in GIS environment. *Review of the Bulgarian Geological Society*. 2022. Vol. 83. No. 1. pp. 3–14. DOI: 10.52215/rev.bgs.2022.83.1.3.
24. Ragi R., Mallikarjuna V. Watershed Delineation and Morphometric Analysis Using GIS and Remote Sensing. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 399. Art. No. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202339902002.
25. Sondarva K.N., Shrivastava P.K., Jayswal P.S. Basic morphometric analysis of watershed or River basin using GIS: a review. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*. 2023. Vol. 25. No. 3. pp. 87–92.

## Юбилей Владислава Борисовича Заалишвили



23 сентября 2024 года исполняется 75 лет со дня рождения известного российского ученого, научного руководителя, зав. отделом геофизики, инженерной сейсмологии и геоинформатики Геофизического института – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (ГФИ ВНЦ РАН), зав. кафедрой геофизики и геоинформатики Северо-Осетинского государственного университета имени К.Л. Хетагурова (СОГУ), профессора Грозненского государственного нефтяного технологического университета имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ), доктора физико-математических наук, профессора В.Б. Заалишвили.

Заалишвили В.Б. работает в области геофизики, геологии, геоэкологии и горного дела. Он создал новое научное направление «оценка сейсмической опасности территории на основе учета нелинейных свойств горных пород мощными невзрывными источниками», им впервые введены простые и эффективные показатели движения в виде площадей нормализованного и реального спектров колебаний, определяющие поглощение и нелинейность среды, универсальность которых обусловила их широкое использование на практике, он ввел понятия «средневзвешенного периода колебаний» и коэффициента «рельефности», разработал ряд современных технологий оценки сейсмической опасности горных пород, не имеющих аналогов в мире, предложил новый инструментально-расчетный метод сейсмического микрорайонирования, разработал методологию трансформации состояния горной породы в условиях интенсивных изменяющихся нагрузок, создал уникальную систему инструментального мониторинга Казбекского вулканического центра, разработал универсальную систему мониторинга природно-техногенных опасностей и методологию оценки их риска. Заалишвили В.Б. один из основоположников современной школы инженерной сейсмологии Южного Кавказа, активно развивает научную школу инженерной сейсмологии в Северной Осетии, на Северном Кавказе и, в целом, на Кавказе.

Заалишвили Владислав Борисович родился 23 сентября 1949 года в Грузии, в г. Тбилиси. В 1969 г. окончил музыкальное училище по классу скрипки и получил квалификацию «артист оркестра». В 1972 г. окончил физический факультет Тбилисского государственного университета и получил квалификацию «физика».

Заалишвили Владислав Борисович родился 23 сентября 1949 года в Грузии, в г. Тбилиси. В 1969 г. окончил музыкальное училище по классу скрипки и получил квалификацию «артист оркестра». В 1972 г. окончил физический факультет Тбилисского государственного университета и получил квалификацию «физика».

В 1964 начал трудовую деятельность рабочим. В 1966-1968 гг. работал в Институте физической и органической химии АН ГССР, физиком-механиком. С 1968 по 1969 год работал в Тбилисском конструкторском бюро, техником. В 1969-1991 гг. работал в Институте строительной механики и сейсмостойкости АН ГССР (ИСМИС) им. К.С. Завриева, ст. техником, инженером, ст. инженером, мнс, научным сотрудником. В 1973-1974 гг. служил в рядах Советской армии. В 1975, будучи секретарем комсомольской организации, был направлен, и в 1977 г. окончил, получив высшее экономическое образование, университет при ГК г. Тбилиси КП ГССР. В 1976-1980 гг. учился в аспирантуре ИСМИС АН ГССР по двум специальностям: «Испытание сооружений» и «Механика грунтов».

Под руководством член-корр. АН ГССР Ш.Г. Напетваридзе подготовил в ИСМИС и в 1986 г. в Институте геофизики АН Грузии им. М.В. Нодия защитил диссертацию «Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 04.00.22 «Физика твердой Земли».

С 1991 по 1994 гг. находился в докторантуре Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН (научный консультант член-корр. РАН, А.В. Николаев). В 1991-1994 работал ассистентом кафедры «Геоинформатика» в Московском геологоразведочном институте им. Серго Орджоникидзе. В 1994-1996 гг. работал в Институте сейсмологических и геофизических исследований, зав. лабораторией инженерной сейсмологии.

В 1996 г. в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова на физическом факультете защитил диссертацию «Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств искусственными источниками» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 04.00.22 «Физика твердой Земли».

В 2005 г. в Институте геофизики им. М. Нодия АН Грузии с целью нострификации успешно защитил диссертацию «Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств искусственными источниками» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 04.00.22 «Физика твердой Земли».

В 1996-2005 гг. он продолжил работу в Институте Строительной Механики и Сейсмостойкости им. К.С. Завриева АН Грузии нс, снс (1997), внс (1998), зав. лабораторией инженерной сейсмологии (1999).

В 1997 г. Заалишвили В.Б. создал и возглавлял по 2005 г. общественную организацию «Центр прикладной геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмической защиты сооружений» в Грузии (AGESAS), в составе которой объединил молодых грузинских ученых. Именно от имени указанной организации при его бессменном руководстве в период 1998-2000 гг. вместе с коллегами им был получен ряд серьезных международных грантов: ИНТАС (ЕЭС), ЕВРАЗИЯ, ТАСИС, НАТО. В проектах ИНТАС и НАТО активное участие принимали российские ученые под руководством профессора А.Д. Гвишиани, а также ученые из Испании, Франции, Великобритании. Проекты «ЕВРАЗИЯ» и «ТАСИС» курировались учеными США и Италии/Греции, соответственно.

В 2000 г. он организовал Северо-Кавказское отделение (на правах филиала) Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, директором которого являлся до 2007 г.

В 2003-2015 гг. работал директором ФГБУН Геофизического института ВНЦ РАН. С июня 2015 г. был научным руководителем, с марта 2017 г. по март 2021 г. – директором Геофизического института – филиала ВНЦ РАН. С апреля 2021 г. – научный руководитель института.

В 2016-2018 гг. Заалишвили В.Б. работал главным научным сотрудником в Комплексном научно-исследовательском институте (КНИИ РАН) им. Х. И. Ибрагимова РАН. В 2003-2015 гг. работал профессором Северо-Кавказского горно-металлургического института (Государственный технический университет) (СКГМИ (ГТУ)). В 2006 году создал и возглавил базовую кафедру прикладной геофизики на базе СКГМИ (ГТУ). В сентябре – ноябре 2015 г. был и. о. зав кафедрой прикладной геологии СКГМИ (ГТУ).

С 2004 г. он является профессором на кафедре строительных конструкций Грозненского государственного нефтяного технологического университета имени академика М.Д. Миллионщикова.

В 2007 г. по представлению Ученого Совета Грозненского государственного нефтяного технологического университета имени академика М.Д. Миллионщикова присвоено ученое звание профессора по кафедре строительных конструкций.

Заалишвили В.Б. с 1969 г. по настоящее время принимал активное участие в 256 научно-исследовательских работах.



*Изучение грунтов с помощью георадара при восстановлении г. Грозного, 2006 г.*

В 2002 г. организовал Национальный комитет Грузии по сейсмостойкому строительству и инженерной сейсмологии и при поддержке российских коллег ввел в Европейскую ассоциацию. Был его первым вице-президентом в 2002-2008 гг.

В.Б. Заалишвили – автор/соавтор более 819 опубликованных работ, в том числе 28 научных монографий, учебных пособий, 86 патентов, 15 баз данных, 11 Программ для ЭВМ.

В 2003 г. руководил созданием системы мониторинга за опасными природно-техногенными процессами «Кармадонский параметрический полигон» (сейсмологические и гравиметрические наблюдения, GPS-измерения) и первой на Северном Кавказе сети сейсмических наблюдений на урбанизированной территории «Влади-

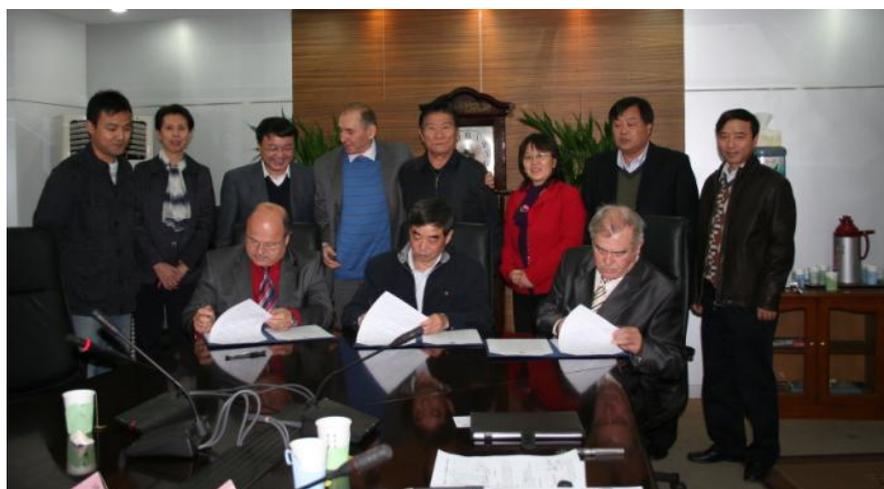
кавказ» (2004). С 2012 г. функционирует сейсмическая станция в районе ледника Колка, записавшая сход ледника Девдорак 17 мая 2014 года.

В 2004 г. на основе анализа инструментальных данных обосновал основные этапы процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 года в РСО-А. В 2005 г. вместе с Мельковым Д.А. разработал новый расчетно-инструментальный метод сейсмического микрорайонирования.

В 2012 г. он руководил созданием карты СМР территории Чири-Юртской ГЭС в Чечне. В 2010-2013 гг. Заалишвили В.Б. руководил созданием первых в России вероятностных карт сейсмической опасности территорий гг. Владикавказ, Беслан, Ардон, Алагир, Дигора, Моздок, с. Чикола, завода «Электроцинк», которые являются непосредственной основой сейсмостойкого проектирования и строительства.

Заалишвили В.Б. был научным руководителем проекта ИНТАС «Оценка сейсмического риска больших городов Грузии на основе современной концепции сейсмического микрорайонирования с учетом нелинейных свойств грунтов» (1999-2001); директором проекта ТАСИС «Оценка сейсмического риска портовых сооружений г. Потти» (2000); директором проекта Программы ЕВРАЗИЯ «Разработка методики страхования в сейсмостойком строительстве с учетом особенностей экономического развития Грузии» (1999-2002); содиректором от России проекта Программы НАТО «Наука за мир»: Сейсмический риск больших городов Кавказа. Способы управления риском (2000-2005), руководитель ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, руководитель российской стороны международного Проекта Программы BSEC (Организация Черноморского Экономического Сотрудничества): «Разработать и изготовить экспериментальный образец накопителя данных радонометрических измерений, создать сеть с центром сбора данных» (2015-2016).

В рамках Программы долгосрочного экономического сотрудничества Российской Федерации и Республики Армения на 2014-2025 гг. Заалишвили В.Б. руководитель от России проектов «Разработка модели динамического регионального показателя инженерно-сейсмологических условий территории на основе анализа инструментальных записей сильных и разрушительных землетрясений» и «Разработка комбинированной системы велосиметров/акселерометров для наблюдений за опасными природно-техногенными геологическими процессами» и др.



*Подписание договора о сотрудничестве между ГФИ ВНЦ РАН и Китайским геологическим университетом, Пекин, 2009 г.*

В 2003 г. руководимое им Северо-Кавказское Отделение Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, заняло I место в конкурсе Госстроя РФ.

В 2010 г. созданный им на базе СКГМИ (ГТУ) и ГФИ ВНИЦ РАН научно-образовательный центр «Геоинжиниринг», победил в 5 конкурсах ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

В 2010, 2016, 2018, 2021, 2023 гг. молодые ученые Института Дзеранов Б.В., Мельков Д.А., Кануков А.С., Дзобоев Б.А., Габараев А.Ф., Бурдзиева О.Г., Майсурадзе М.В., Архиреева И.Г., Фидарова М.И., Туаев Г.Э., Корбесова К.В., Дзобелова Л.В. за исследовательские работы, выполненные под руководством Заалишвили В.Б., получали «Премии Главы Республики Северная Осетия-Алания в области науки и техники для учащихся общеобразовательных школ, молодых ученых и специалистов».

Его аспирант Н.А. Громова в 2005 г. заняла II место на конкурсе научных работ молодых ученых российских вузов по геологии. Его аспирант А.К. Харебов и докторант к.ф.-м.н. Ж.Д.Туаева, дважды в 2006 и 2007 гг. стали победителями в номинации «Лучший аспирант РАН» и «Кандидаты и доктора наук РАН». Его ученик к.т.н. Д.А. Мельков стал победителем Конкурса грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук на 2014 г.

В июне 2010 г. на I международной, специализированной выставке «Инновации для XXII зимних олимпийских игр» разработка ГФИ ВНИЦ РАН «Комплексный метод оценки сейсмической опасности», выполненная под руководством В.Б. Заалишвили, «по решению международного жюри» была удостоена золотой медали.

В 2010-2014 гг. на конкурсах Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД» разработки ГФИ ВНИЦ РАН получили 8 золотых и две серебряных медалей, два кубка «За развитие изобретательства в регионе», кубок Бахрейна, а Заалишвили В.Б. был награжден орденом «Золотой Архимед» от салона и золотой медалью Н.Тесла от сербской делегации «За большой вклад в международное развитие науки и техники».

Под его руководством защищены две докторские и 14 кандидатских диссертаций, в том числе, 4 кандидатские работы в Грузии. Он – зам. председателя Объединенного диссертационного совета 99.0.075.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе Владикавказского научного центра РАН, Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова, Чеченского государственного университета. Он председатель ГЭК по специальности 130404 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» СКГМИ (ГТУ).

Заалишвили В.Б. – главный редактор журнала «Геология и геофизика Юга России», член редколлегии журналов «Вестник ВНИЦ РАН», «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений», «Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений», «Open Construction & Building Technology Journal» и др.

Он неоднократно был председателем/членом оргкомитетов/научных комитетов международных конференций в России и за рубежом, научным редактором 15 сборников конференций и монографий.



*Ученые вузов Австрии, Италии, ФРГ, Вьетнама (проект Эразмус)  
в Геофизическом институте ВНИИ РАН, 2018 г.*

Заалишвили В.Б. – член Российской ассоциации по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (1992), Американского сейсмологического общества (1999), Грузинского геофизического общества (1993), Российского общества инженеров строительства (2007), Русского географического общества (2017), Ассоциации специалистов и преподавателей безопасности (2010), Рабочей группы комиссии СНГ по сейсмостойкому строительству и уменьшению природно-техногенных воздействий (1999). Он – действительный член Европейской академии естественных наук (2007), Российской академии естественных наук (2007), Академии горных наук (2007), Международной академии наук Экологии и Безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ) – ассоциированного члена ООН (2005).

С 2013 г. Заалишвили В.Б. входит в федеральный реестр экспертов научно-технической сферы РФ, эксперт подкомитета 7 «Сейсмобезопасность в строительстве» (2013), эксперт международной Премии «Глобальная энергия» (2011), эксперт РАН (2019), член Экспертного Совета ВАК (2020), эксперт РНФ (2021).

В.Б. Заалишвили – лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники (2022), Заслуженный изобретатель РФ (2019), Заслуженный деятель науки РСО-А (2006), Почетный работник науки и техники РФ (2014), Почётный учёный города Рима (2007), Ветеран труда (2010), Почетный академик АН ЧР (2014), Почетный доктор КНИИ РАН (2014).

Он награжден Благодарностью Президента РФ (2014), медалью «Во славу Осетии» (2017), Почётными грамотами Президиума РАН (2010, 2012), Президиума и Профсоюза РАН (2010, 2014, 2019, 2021), Почетной грамотой Парламента РСО-А (2014), Юбилейной медалью «100 лет профсоюзам России» (2011), Благодарственным письмом Общественной палаты Чечни (2014), Почетной грамотой международного общественного движения «Высший Совет Осетин» (2015), Почетной гра-

мотой Центра обеспечения деятельности по защите населения и территории РСО-А от ЧС (2016), Почетной грамотой Президиума АН ЧР (2016), Иконой равноапостольной св. Нино от настоятеля и прихода восстанавливаемой Грузинской церкви в г. Владикавказе и др. ведомственными и общественными наградами.

В.Б. Заалишвили – более 10 лет является заместителем председателя грузинского общества «Единство». Заалишвили В.Б. провел большую работу по исследованию технического состояния грузинской церкви святой равноапостольной Нины, просветительницы Грузии, и составлению технического регламента ее восстановления.



*Исследование технического состояния грузинской церкви святой равноапостольной Нины*

Здесь по его приглашению побывали ведущие ученые и специалисты в области инженерной строительной науки из Москвы, Грозного, Ариэльского университета (Израиль), Тбилиси. При этом ученые из Тбилиси под руководством Константина Одишвили привезли, подготовленные ими безвозмездно, детальные проекты восстановления не только Храма, но и фамильной Осетинской башни в Куртатинском ущелье Северной Осетии. Общество многое делает для того, чтобы представители грузинской диаспоры жили, в заслуженных ими десятками лет самоотверженной работы на благо Северной Осетии и России, достойных условиях.

Заалишвили В.Б. успешно совмещает высокопрофессиональную практическую деятельность с эффективной организационной и научной работой в области геофизики, геологии, экологии и горного дела, а также в активной защите объектов интеллектуальной собственности. Руководит и принимает участие в создании новых методов и способов, решении научных задач, связанных с обеспечением безопасности населения и снижения уязвимости горных территорий к опасностям различной природы, использовании в практике работы современных достижений науки и тех-

ники, активно работает над выявлением и становлением молодых ученых. Все это обеспечивает стремительное развитие наук о Земле в Северной Осетии и, в целом, на Северном Кавказе.

От лица коллег, друзей и товарищей поздравляем глубокоуважаемого Владислава Борисовича с 75-летием и желаем ему здоровья, долгих лет жизни, простых человеческих радостей и новых творческих свершений!

*Зам.главного редактора*

***И.А. Керимов***

## Юбилей Юрия Константиновича Чернова



13 сентября 2024 года исполняется 75 лет со дня рождения известного российского ученого, главного научного сотрудника отдела геофизики, инженерной сейсмологии и геоинформатики Геофизического института – филиала Владикавказского научного центра Российской академии наук.

Чернов Ю.К. профессионально занимается научными исследованиями и проектными разработками в области инженерной сейсмологии, прогноза долговременной сейсмической опасности и сейсмического риска, сейсмического районирования и микрорайонирования, оценок природных и техногенных опасностей и рисков, связан-

ных с землетрясениями (разжижение грунтов, просадки, оползни).

Чернов Юрий Константинович родился 13 сентября 1949 г. в г. Ташкенте Узбекской ССР. В 1967 году поступил на геологический факультет Ташкентского Государственного университета по специальности «Геофизика», который окончил с отличием в 1972 г.

В 1972 начал трудовую деятельность в Институте сейсмологии АН УзССР (г. Ташкент) на должности инженера в лаборатории «Сейсмического микрорайонирования», в которой проработал до 1990 г. в должностях младшего, старшего и ведущего научного сотрудника. В этот период в Институте физики Земли АН СССР защитил две диссертации – на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук (в 1980 г.) и доктора физ.-мат. наук (в 1989 г.). В 1989 г. Чернову Ю.К. присвоено научное звание старшего научного сотрудника по специальности «Геофизика».

В 1990 г. по приглашению перевелся в Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения АН СССР (г. Южно-Сахалинск), где проработал до 1996 г. сначала по основному месту работы, затем по совместительству, в должности зав. лабораторией «Сейсмической опасности и риска». С 1993 г. по совместительству работал в Южно-Сахалинском Государственном педагогическом институте (позднее Сахалинском государственном университете), на кафедре физики, профессором. В 1994 г. переводом перешел туда на основную работу, на должность проректора по научной работе и профессора. В 1996 г. получил звание профессора.

В 1996 г. по приглашению перевелся в Северо-Кавказский филиал ПНИИИС Госстроя России (г. Ставрополь) на должность зам. директора по научной работе и зав. лабораторией «Инженерной сейсмологии», где по основному месту работы, а

затем по совместительству работал до 2016 г. В период 2006-2011 гг. работал главным научным сотрудником ПНИИИС Минстроя РФ (г. Москва).

Начиная с 1998 г. по 2011 г. Чернов Ю.К. работал профессором на строительном факультете СевКавГТУ. В период с 1995 г. по настоящее время по контрактам и по совместительству работал в отечественных и зарубежных компаниях в должностях эксперта-консультанта, главного сейсмолога, главного геофизика.

С 2017 г. работает главным научным сотрудником Геофизического института ВНИЦ РАН (г. Владикавказ). Он является автором метода вероятностного прогнозирования возможных сейсмических воздействий, успешно примененного для сейсмического районирования разных масштабов (ОСР, ДСР, СМР) и расчетов сейсмического риска в Узбекистане (Приташкентский район, Ферганская долина, Западный Узбекистан и др.), на Дальнем Востоке, на Кавказе, в Северной Африке, на Тайване и других районах мира. В частности, на основании этих разработок в 1990 г. впервые выявлена недооценка нормативными документами СССР сейсмической опасности на Сахалине, что затем подтвердилось Нефтегорским землетрясением 1995 г.

Чернов Ю.К. – один из основных исполнителей Государственной программы РФ по изучению сейсмичности северо-восточной Евразии, а также Государственной программы РФ по повышению безопасности строительства и других действий в сейсмоактивных районах.

Им разработано свыше 20 карт сейсмического микрорайонирования территорий городов и крупных объектов в Республике Узбекистан, на Сахалине, Курильских островах, в Приморском, Хабаровском, Ставропольском и Краснодарском краях. Разрабатываются новые карты ДСР для территории Северной Осетии.

По заданию разработчиков сахалинских нефтегазовых проектов (Sakhalin Energy Investment Company Ltd., Exxon, Mobil) выполнены оценки возможных сейсмических воздействий на морские добывающие платформы и береговые сооружения. Разработаны критерии антисейсмического проектирования. Разработана комплексная инженерно-сейсмологическая программа Ставропольского края, в рамках которой произведены оценки вероятных параметров сейсмических воздействий и сейсмического риска для десятков промышленных и гражданских объектов.

По заданию Госстроя России в рамках ФЦП «Сейсмобезопасность территорий России» разработаны усовершенствованные модели сейсмических воздействий и комплексная методика оценки сейсмической опасности и сейсмического риска для целей строительства, охраны окружающей среды, управления и других задач.

По заданию ОАО «Институт Мосгипротранс» проведены оценки расчетных сейсмических воздействий на суше и на дне моря, а также вероятностей сейсмогенного разжижения грунтов оснований на участке проектируемого железнодорожного перехода через пролив Невельского для различных сочетаний предполагаемых вариантов расположения створов и конструктивных решений (мост, тоннель).

В настоящее время является научным руководителем и ответственным исполнителем проводимых в ГФИ ВНИЦ РАН исследований по созданию новой версии Карты детального сейсмического районирования (ДСР) территории РСО-Алания.

В результате этих исследований создана научно-методическая база и разработана новая вероятностная Карта детального сейсмического районирования территории РСО-Алания, где впервые с единых методологических позиций получены уточненные вероятностные оценки широкого перечня параметров опасных сейсми-

ческих воздействий, а также исследованы зависимости макросейсмической интенсивности (балльности) землетрясений от скорости нарастания амплитуд колебаний грунта и вопросы влияния различных типов грунтов на спектры их колебаний. На основе полученных ранее результатов мною предложен новый подход, позволяющий более точно и детально учитывать «грунтовый фактор» в вероятностных оценках сейсмической опасности территорий.

В целом, полученные в процессе данных исследований новые знания позволяют повысить точность и надежность прогнозных оценок сейсмической опасности и сейсмического риска, как в исследуемом регионе, так и в других сейсмоактивных районах, что, в свою очередь, способствует лучшему обеспечению безопасности населения, защите инфраструктуры и окружающей среды.

Чернов Ю.К. является автором 3 монографий и более 110 научных статей в области инженерной сейсмологии. Является членом редколлегии журнала Геология и геофизика Юга России (перечень ВАК, Scopus).

За время работы в гг. Ташкенте, Южно-Сахалинске, Ставрополе, Москве и Владикавказе входил в состав различных Советов и Комиссий при органах власти. Так в 1995 г. организовал и возглавил Консультативный совет при областной Думе, а затем при губернаторе Сахалинской области.

В этот день хочу от всей души поздравить юбиляра, моего замечательного друга, Юрия Константиновича Чернова со знаменательным днем в его жизни – 75 летним юбилеем и пожелать ему здоровья, успешности в насущных делах и семейного благополучия!

Пожелаем ему и в дальнейшем жить активной научной, общественной жизнью, и еще многое реализовать из задуманного им на благо людям!

*Главный редактор*

***В.Б. Заалишвили***

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 1.6.1 Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика; 1.6.4 Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых; 1.6.6 Гидрогеология; 1.6.9 Геофизика; 1.6.10 Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 1.6.11 Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1.6.12 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 1.6.20 Геоинформатика, картография; 1.6.21 Геоэкология; 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика; 2.8.8 Геотехнология, горные машины, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

– статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;

– краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3–5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);

– обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20–25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, резюме (аннотации) на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи.

Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

### Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <https://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Резюме (аннотация) с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

### Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов (кегль 14 полужирный, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки и ответственного автора.

Резюме (аннотация) должна быть объемом 250–300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то резюме (аннотация) должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если

рукопись подается на английском языке, необходимо привести также резюме (аннотацию) на русском. Резюме (аннотация) печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце резюме (аннотации) обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Благодарности/Acknowledgements. В этом разделе следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовки – 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  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$  и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и единицах измерений ( $\text{МВт/см}^2$ ) – прямым (обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Все надписи на русском языке на рисунках и в таблицах дублируются на английский. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем - на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

#### Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВЦ 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 Russian South» publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth's crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 1.6.1 General and regional geology. Geotectonics and geodynamics; 1.6.4 Mineralogy, crystallography. Geochemistry, geochemical methods of prospecting for minerals; 1.6.6 Hydrogeology; 1.6.9 Geophysics; 1.6.10 Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 1.6.11 Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields; 1.6.12 Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 1.6.20 Geoinformatics, cartography; 1.6.21 Geoecology; 2.8.6 Geomechanics, rock destruction, mine aerogas dynamics and mining thermal physics; 2.8.8 Geotechnology, mining machines and related scientific directions.

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal «Geology and Geophysics of Russian South» publishes:

– articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

#### Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <https://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),
- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

### The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$ , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements ( $\text{H}_2\text{O}$ ) and measurement units ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ ) 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  $\nu$ , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for

the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova Str., Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal « Geology and Geophysics of Russian South». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76 40 56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА  
ЮГА РОССИИ  
(№ 3. 2024 г. Том 14)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 20.09.2024 г. Дата фактического выхода 30.09.2024 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Усл. печ. лист 32,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 81.

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