

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 10
№ 3 / 2020**

Владикавказ 2020

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

академик РАН **В. А. Бабешко**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
академик РАН **А. Д. Гвишиани**, Геофизический центр РАН, г. Москва
академик РАН **М. Ч. Залиханов**, Высогогорный геофизический институт, г. Нальчик
академик АНГ **Т. Л. Челидзе**, Институт геофизики им. М. Нодия, Грузия
член-корр. НАНА **Г. Д. Етирмишли**, Республиканский Центр Сейсмологической Службы при НАНА, Азербайджан
член-корр. РАН **Д. Р. Каплунов**, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва
член-корр. НАН РА **С. М. Оганесян**, Институт геофизики и инженерной сейсмологии АН РА, Армения
член-корр. РАН **В. А. Снытко**, Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, г. Москва
член-корр. РАН **А. А. Соловьев**, Геофизический центр РАН, г. Москва
член-корр. РАН **П. Н. Шебалин**, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва
Ph. D., проф. **И. А. Береснев**, Университет штата Айова, США

д. г.-м. н., проф. **М. Г. Бергер**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

Ph. D., проф. **Г. П. Ганапати**, Центр по смягчению последствий стихийных бедствий и управлению, Технологический институт Веллур, Индия
д. т. н., проф. **И. Д. Музаев**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

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

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

д. г.-м. н., проф. **Е. А. Рогожин**, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта 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

Х. О. Чотчаев, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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 издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

362027, РСО-Алания, г. Владикавказ,

ул. Маркуса 22

Тел.: 8 (8672) 501841

e-mail: vnrcan@yandex.ru

<http://www.vnrcan.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, 2020

Фото на обложке – Вулкан Казбек (К.С. Харебов)

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

Editor in Chief

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

Deputy Editor in Chief

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

Members of Editorial board

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

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

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

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

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

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

Sevada M. Hovhannisyán, 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

Valerian A. Snyitko, Corresponding Member of RAS,
S.I.Vavilov Institute for the History of Science and
Technology of RAS, Moscow

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

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

Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA
Mikhail G. Berger Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of
the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz

Kuo-Liang Wen, Ph. D., National Central University, Taiwan
Ganapathy Pattukandan Ganapathy, Ph.D, Prof.
Centre for Disaster Mitigation and Management Vellore
Institute of Technology, India

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

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

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

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

Evgeniy A. Rogozhin Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS,
Moscow

Yuriy K. Chernov Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., North
Caucasus Federal University, Stavropol

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

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

Executive Secretary

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

Managing Editor

Khyisa O. Chotchaev, Geophysical Institute of
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy
of Sciences, Vladikavkaz

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 published since 2011.
Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

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

Publisher:

**Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific
Center of the Russian Academy of Sciences**
Publisher and Editorial address:
93a, Markova Str., Vladikavkaz, RNO-Alania,
362002 Russia
Tel.: 8 (8672) 764084; Fax: +7 (8672) 764056
e-mail: southgeo@mail.ru
<http://geosouth.ru>

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2020

Cover photo – Volcano Kazbek (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Газеев В. М., Гурбанов А. Г.

Раннепалеозойские габброиды архызского интрузивного комплекса
(Северный Кавказ): геодинамическая типизация и минерагения 6

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Гиоргобиани Т. В., Закаря Д. П.

Экспериментальное исследование мобилистских механизмов образования
альпийской складчатой структуры Большого Кавказа 23

ГЕОФИЗИКА

Казымова С. Э., Казымов И. Э.

Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов
землетрясений и GPS-станций 40

Морозова Л. И., Николаев А. В., Пулинец С. А.

Облачные аномалии и землетрясения 57

Попов М. Г., Попова О. Г.

Изучение изменений во времени и в пространстве напряженного состояния
геологической среды 79

Заалишвили В. Б., Пинар А., Эрдик М., Бурдзиева О. Г., Мельков Д. А.

К вопросу сейсмического риска территории г. Владикавказ 94

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Дробинский А. А., Гольчикова Н. Н., Камнев П. П.

Особенности строения и перспективы нефтегазоносности палеоканала,
выявленного по данным МОГТ в восточной части Каракульско-Смушковской
зоны поднятий 113

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Гавришин А. И.

Шахтные воды в управлении качеством грунтовых вод в Восточном Донбассе 126

Иванов А. В., Стриженок А. В., Супрун И. К.

Вопросы оценки эффективности внедряемых пылезащитных экранов
на этапе проектирования 138

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

Gazeev V. M., Gurbanov A. G.

- Early Paleozoic gabbroids of the Arkhyz intrusive complex (North Caucasus):
geodynamic typification and mineralogy 6

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Giorgobiani T. V., Zakaraia D. P.

- Experimental study of mobilistic mechanisms of formation of the Alpine folded
structure of the Greater Caucasus 23

GEOPHYSICS

Kazimova S. E., Kazimov I. E.

- Geodynamics of the Talish region according to earthquake source mechanisms
and GPS-stations 40

Morozova L. I., Nikolaev A. V., Pulinets S. A.

- Cloud anomalies and earthquakes 57

Popov M. G., Popova O. V.

- Study of Changes in Time and in Space of Stressed State
of Geological Environment 79

Zalishvili V., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O., Melkov D.

- Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city 94

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

Drobinskiy A. A., Golchikova N. N., Kamnev P. P.

- Structure features and oil and gas prospect of paleochannel revealed with 2D
seismic data in The East of Karakulsko-Smushkovskaya uplift zone 113

GEOECOLOGY

Gavrishin A. I.

- The mine water in the management of groundwater pollution
in the Eastern Donbass 126

Ivanov A. V., Strizhenok A. V., Suprun I. K.

- Issues of evaluating the effectiveness of the introduced dust screens
at the design stage 138

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI:

Оригинальная статья

Раннепалеозойские габброиды архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ): геодинамическая типизация и минерогения

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

¹Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35;

²Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Владикавказский научный центр РАН», Россия, 362027, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркуса, 22, e-mail: gazeev@igem.ru, ag.gurbanov@yandex.ru

Статья поступила: 03.08.2020, доработана: 25.08.2020, одобрена в печать: 27.08.2020

Резюме: Актуальность работы. На Большом Кавказе известны мезозойские и раннепалеозойские аллохтонные офиолитовые комплексы, приуроченные к разным структурно-формационным зонам. Изучение пород слагающих офиолитовые разрезы проводится в различных регионах земного шара. Однако геохимических исследований на основе анализа распределения редких и редкоземельных элементов все еще недостаточно и, в первую очередь, это касается раннепалеозойских образований Северо-Кавказского региона. **Целью исследования** является получение (количественных) аналитических данных и расшифровка на их основе геодинамических процессов, имевших место в раннем палеозое. Объектом для исследований были выбраны среднеордовикские габброиды архызского комплекса, распространенные в пределах Марухского офиолитового покрова в структурно-формационной зоне Передового хребта Большого Кавказа. **Методы исследования** включали: петрографическое описание пород, количественные анализы методами *RFA*, *ICP-MS*; расчеты геохимических характеристик; анализ дискриминационных диаграмм; сравнение величин усредненных содержаний элементов с их содержанием в породах (эталоны) близкого петрохимического типа из различных геодинамических обстановок. **Результаты.** В результате изучения установлено, что габброиды являются высокоглиноземистыми, низкотитанистыми, умеренномагнезиальными, низкокальциевыми породами с натровым типом щелочности. Предполагается, что они являются производными расплава образовавшегося при плавлении деплетированных шпинелевых перидотитов. Положительные аномалии европия $Eu/Eu^* = 1,27-2,65$, и Sr допускают изначальную аккумуляцию плагиоклаза в исходном расплаве. Несовместимые элементы и *REE*, нормированные по *N-MORB* и хондриту, образуют спектры линий, близких к *N-MORB*, но в целом, с существенно более низкими концентрациями большинства элементов. ΣREE в габбро = 10,5-21,5 г/т. Отмечаются: незначительное повышение содержаний гидромагматофильных, крупноионных элементов *Rb*, *Ba*, *K*, *Sr* и отрицательные аномалии высокозарядных элементов *Nb*, *P*, *Zr*, *Hf*. Анализ петрогенетических диаграмм показал, что фигуративные точки габброидов группируются в полях островодужных толеитов. Их сравнение с породами близких петрохимических типов, показывает, что они наиболее сопоставимы с породами юных островных дуг. Сопутствующее габброидам оруденение подразделяется на образования магматической стадии (титан-магнетитовые и магнетитовые рудные концентрации) и постмагматической стадии (карбонатные прожилки с пиритом, халькопиритом). По совокупности полученных результатов предполагается, что аллохтонная структура, известная как «Марухский покров» Передового хребта, не является классической офиолитовой

ассоциацией, а сформирована в результате серии надвигов, в которых участвуют образования литосферной мантии и юной островной дуги.

Ключевые слова: офиолиты, габброиды, петрография, геодинамическая типизация, островные дуги, минерагения.

Благодарности: Работа подготовлена при поддержке гос. темы регистрационный номер АААА-А19-119040190054-8 в КНИО ВНЦ РАН.

Для цитирования: Газеев В. М., Гурбанов А. Г. Раннепалеозойские габброиды архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ): геодинамическая типизация и минерагения. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 6 – 22. DOI: xx. xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

DOI:

Original paper

Early Paleozoic gabbroids of the Arkhyz intrusive complex (North Caucasus): geodynamic typification and mineralogy

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

¹Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry RAS, 35 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russian Federation;

²Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 22 Markusa Str., Vladikavkaz 362027, Russian Federation, e-mail: gazeev@igem.ru, ag.gurbanov@yandex.ru

Received: 03.08.2020, revised: 25.08.2020, accepted: 27.08.2020

Abstract. Relevance. The Mesozoic and Early Paleozoic allochthonous ophiolite complexes, confined to different structural and formation zones are known in the Greater Caucasus. The study of rocks composing ophiolite sections is carried out in various regions of the globe. However, geochemical studies based on an analysis of the distribution of rare and rare-earth elements are still insufficient and, first of all, this concerns the Early Paleozoic formations of the North Caucasus region. **The aim** of the study is to obtain (quantitative) analytical data and decipher the geodynamic processes that took place in the Early Paleozoic. The Middle Ordovician gabbroids of the Arkhyz complex, which were distributed within the Marukh ophiolite cover in the structural and formation zone of the Front Range of the Greater Caucasus, were chosen as the object of research. **Research methods** included: petrographic description of rocks, quantitative analyzes by RFA, ICP-MS; calculations of geochemical characteristics; analysis of discriminatory charts; comparing the values of the average contents of elements with their content in rocks (standards) of a close petrochemical type from various geodynamic settings. **Results.** As a result of the study, it was found that gabbroids are high alumina, low titanium, moderately magnesian, low potassium rocks with a sodium type of alkalinity. It is assumed that they are derivatives of the melt formed during the melting of depleted spinel peridotites. The positive europium anomalies $Eu / Eu^* = 1.27-2.65$, and Sr allow the initial accumulation of plagioclase in the initial melt. Incompatible elements and REE normalized to N-MORB and chondrite form line spectra close to N-MORB, but in general, with significantly lower concentrations of most elements. $\sum REE$ in gabbro = 10.5-21.5 g / t. The following are noted: a slight increase in the contents of hydromagmatophilic, coarse-ionic elements Rb, Ba, K, Sr and negative anomalies of highly charged elements Nb, P, Zr, Hf. The analysis of petrogenetic diagrams showed that the figurative points of gabbroids are grouped in the fields of island-arc tholeiites. Their comparison with the rocks of close petro-geochemical types shows

that they are most comparable with the rocks of young island arcs. The mineralization associated with gabbroids is subdivided into the formation of the magmatic stage – titanium-magnetite and magnetite ore concentrations and the post-magmatic stage – carbonate veins with pyrite and chalcopyrite. Based on the totality of the results obtained, it is assumed that the allochthonous structure, known as the “Marukh Veil” of the Front Ridge, is not a classical ophiolite association, but is formed as a result of a series of overthrusts in which the lithospheric mantle and young island arc formations.

Keywords: ophiolites, gabbro, petrography, geodynamical typification, arc islandes and minerageny.

Acknowledgments: The work was prepared with the support of state. topics registration number AAAA-A19-119040190054-8 in KNIO VSC RAS.

For citation: Gazeev V. M., Gurbanov A. G. Early Paleozoic gabbroids of the Arkhyz intrusive complex (North Caucasus): geodynamic typification and mineralogy. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (3): 6 – 22. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

Введение

Большой Кавказ (БК) – область с байкальской (?), позднепалеозойской (герцинской), раннемезозойской (поздний триас – геттанг) и позднекайнозойской (поздний эоцен – квартал) основными орогенениями. С позднего палеозоя БК формировался в составе Скифско-Кавказско-Черноморского региона. Его северная граница проходила по южному краю Восточно-Европейской платформы с дорифейской корой, а южная граница находилась в районеофиолитового пояса Измир-Анкара – Эрзинджан-Севан-Зангезур, который был реальной границей Восточно-Европейского палеоконтинента (континента Балтика) [Никишин и др., 2005]. В результате более чем векового изучения БК выделены десятки разновозрастных структурно – вещественных комплексов, находящихся в сложных тектонических взаимоотношениях и часто включающих характерные только для них проявления магматизма. Например: раннепалеозойские и мезозойские аллохтонные офиолитовые комплексы. Изучение пород, слагающих офиолитовые разрезы, проводится в различных регионах земного шара. Однако геохимических исследований на основе анализа распределения редких и редкоземельных элементов все еще недостаточно и, в первую очередь, это касается раннепалеозойских образований Северо-Кавказского региона.

Цель исследования

Целью исследования является получение (количественных) аналитических данных, и на их основе проведение расшифровки геодинамических процессов проявившихся в раннем палеозое. Объектом для данного исследования были выбраны среднеордовикские габброиды, распространенные в пределах Марухского офиолитового аллохтона в структурно-формационной зоне Передового хребта БК. Впервые архызский интрузивный комплекс был описан в литературе под этим названием Ю. Н. Хильтовым, который в его состав включал ультрабазиты, габброиды, кварцевые диориты, спессартиты, сиенито-диориты и плагиограниты [Хильтов, 1959]. В разные годы XX века эти образования (рис. 1) изучались с целью уточнения возраста, тектонической позиции, оруденения, и были описаны в многочисленных геологических отчетах и публикациях [Каденский, 1956; Михеев, Потапенко, 1972; Ажгирей и др., 1976; Хаин, 1984].

В настоящее время породы, объединявшиеся ранее в единый комплекс, сейчас входят в состав различных комплексов: раннеордовикского кяфарского ультрабазитового; среднеордовикского архызского габбро-габбродиоритового; среднеде-

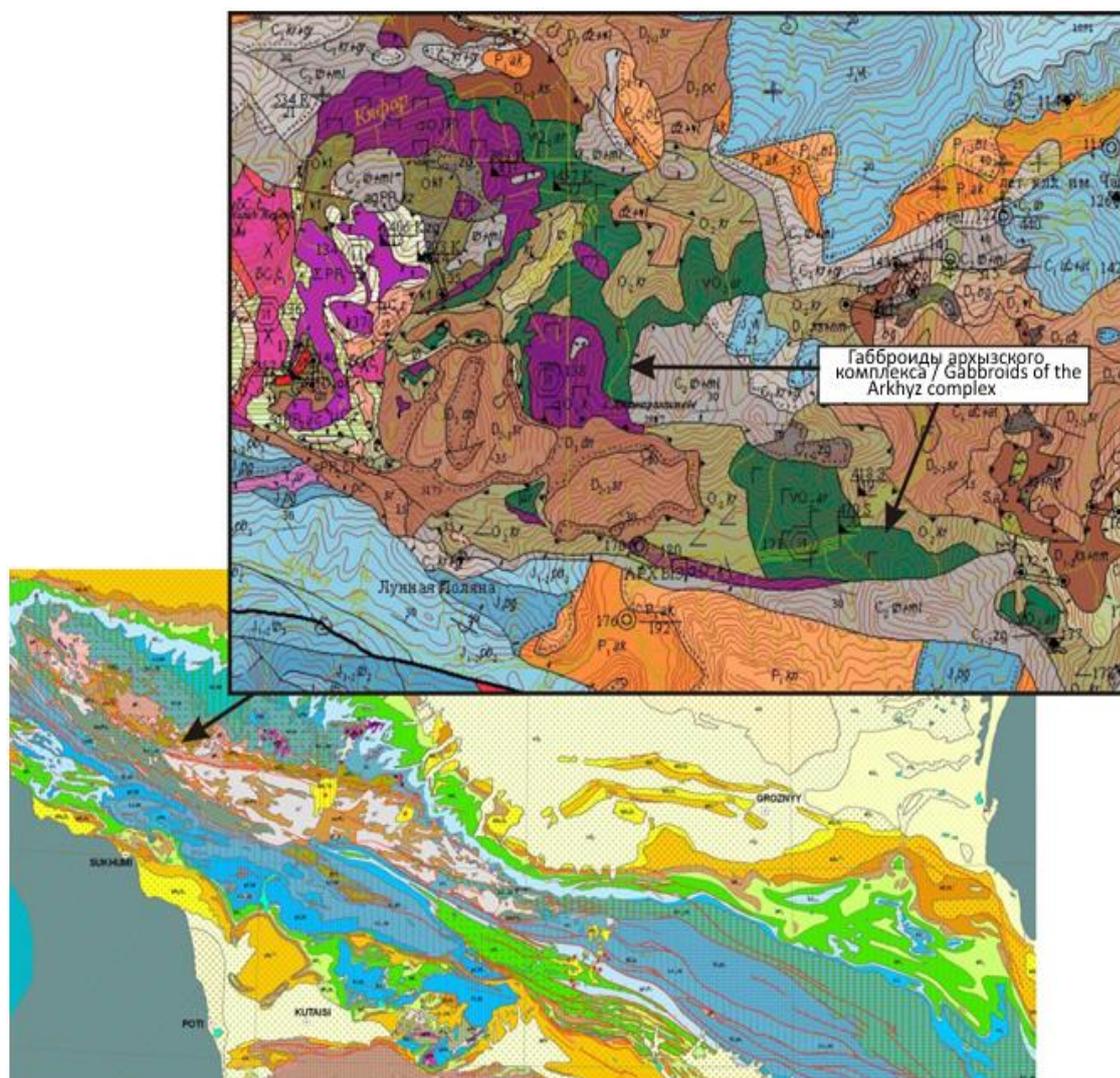


Рис. 1. Геологическая карта с интрузивами архызского комплекса в верховьях рек Большой Зеленчук и Кяфар-Агур (по материалам ФГУГП «Кавказгеолсъёмка» листы К-37-VI, XII 2008 г. Обзорная карта: [Adamia et al., 2010]. /

Fig. 1. Geological map with intrusions of arkhizskogo complex in river head Big Zelenchuk and Kyafar-Agur (from data of FGUGP "Kavkazgeols'emka", maps K-37-VI, XII 2008 year. Reviewian map: [Adamia et al., 2010]

вонского озеро-кяфарского плагиогранитного и нижнекарбонového заканского монцодиоритового. Архызский габбро-габбродiorитовый плутонический комплекс (АГГК) представлен дайками и гипабиссальными интрузиями, которые являются составной частью офиолитовой ассоциации, Марухского покрова. Считается, что в современном, опрокинутом залегании, габброиды расположены под раннеордовикскими гипербазитами и над среднеордовикскими базитами Карабекской свиты, в которых отмечают их дайковые и жильные тела. [Семенуха и др., 2009]. Возраст архызского комплекса считается среднеордовикским. K/Ar 457 ± 13 , 493 ± 15 Ma [Хаин, 1984]; Sm-Nd 470 ± 96 Ma [Семенуха и др., 2009]. В настоящей публикации приведены результаты геохимического изучения пород АГГК, рассмотрена их геодинамическая типизация и минерогения.

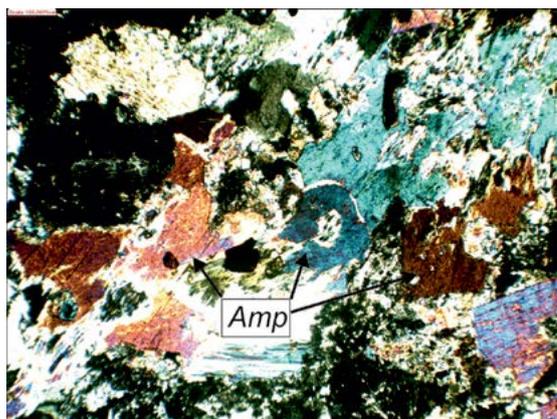


Рис. 2-1. Соссюритовое – амфиболизированное габбро. Д-1,5 мм. / Saussurite-amphibolized gabbro. D-1,5 mm.

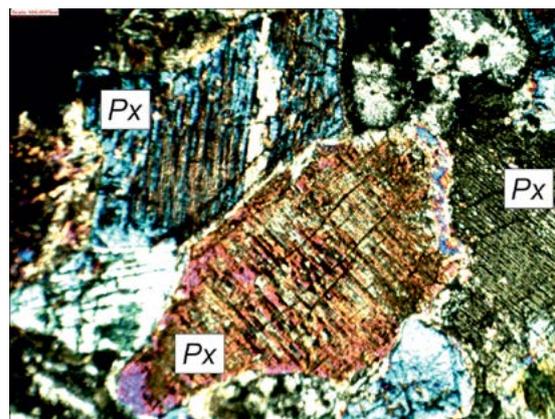


Рис. 2-2. Моноклинный пироксен с диалаговой отдельностью. Д-1,5 мм. / Monoclinic pyroxene with dialagic detachment. D-1,5 mm.

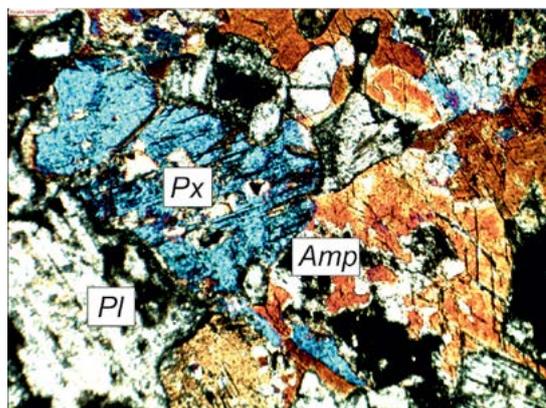


Рис. 2-3. Пироксен корродируемый кристаллами роговой обманки. Д-1,5 мм. / Pyroxene corroded with hornblende crystals. D-1,5 mm.

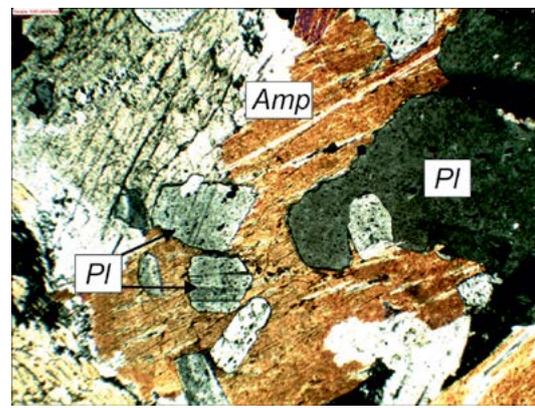


Рис. 2-4. Роговая обманка с включениями плагиоклаза. Д-1,5 мм. / Hornblende with plagioclase inclusions. D-1,5 mm.

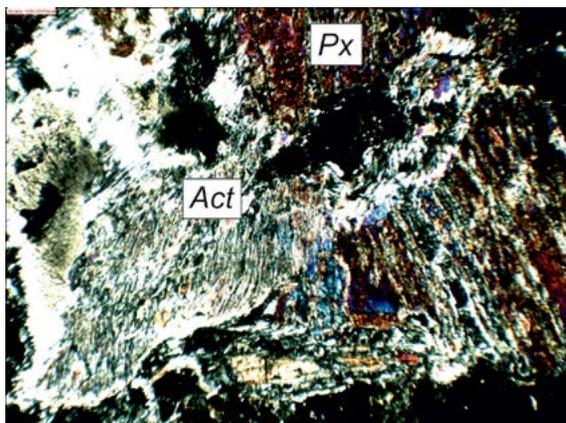


Рис. 2-5. Замещение пироксена актинолитом. Д-1,5 мм. / Replacement of pyroxene with actinolite. D-1,5 mm.

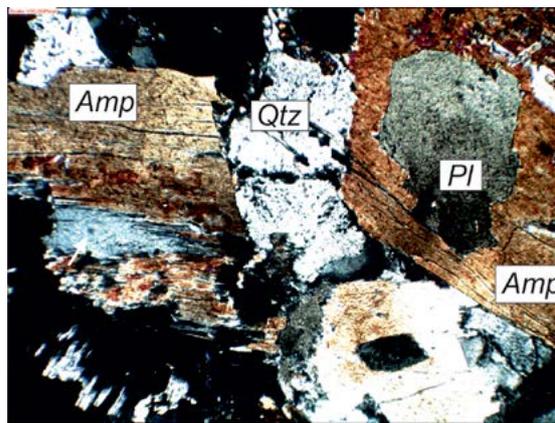


Рис. 2-6. Габбро-пегматит. Д-1,5 мм. / Gabbro-pegmatite. D-1,5 mm.

Рис. 2. Микрофотографии пород (Д – диагональ снимков). / Fig. 2. Microphoto of rocks (D – diagonal of photo)

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужила коллекция проб и образцов, собранная в 2018 г., при посещении массивов АГГК в долинах рр. Большой Зеленчук и Теберда. Из образцов изготовлены шлифы и проведено их петрографическое изучение. Аналитические работы выполнены в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика»: в 13 пробах проведено определение концентраций петрогенных и микроэлементов рентгено-флюоресценным анализом (*XRF*) на спектрометре «Респект-100»; в 7 пробах – рудных, редких и редкоземельных элементов, – методом спектроскопии с индукционно связанной плазмой с масс-спектрометрическим окончанием (*ICP-MS*) на масс-спектрометре X-SeriesII. Используются методики и условия анализов, принятые в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика» и ФГБУН ИГЕМ РАН. Точность анализа контролировалась путем измерения российских и международных стандартных образцов. На основании результатов построены классификационные, дискриминационные диаграммы и графики, которые использовались для уточнения геодинамической обстановки, влиявшей на формирование пород. Дополнительно при построении части диаграмм использовались опубликованные силикатные анализы габброидов [Каденский, 1956; Ажгирей и др., 1976; Хаин, 1984].

Полученные результаты

Изученные тела габброидов представлены среднезернистыми, неравномернозернистыми породами зеленовато-серого цвета, различающимися по структурно-текстурным признакам и количеству темноцветных минералов. Местами они приобретают гнейсовидный, такситовый и пегматоидный облик. Преобладающими петрографическими разновидностями являются: сосюритовые амфиболизированные габброиды и габбро-пегматиты, реже встречаются габбро-диориты. Сосюритовые амфиболизированные габброиды имеют преимущественно бластогаббровую микроструктуру и состоят из реликтовых минералов, отмечаемых не во всех образцах, и преобладающих вторичных минералов. Реликтовый минеральный парагенезис представлен моноклинным пироксеном, лабрадором и титаномagnetитом. Моноклинный пироксен (диопсид) по периферии зерен замещается роговой обманкой и более поздним актинолитом, иногда в его кристаллах отмечается диалоговая отдельность. Лабрадор присутствует в виде включений в роговой обманке и реликтов в сосюритовой массе. Среди вторичных минералов выделяются главные минералы: роговая обманка, сосюритовый агрегат по плагиоклазу, актинолит, эпидот, цоизит и второстепенные – тремолит, хлорит, кальцит, альбит иногда сфен, лейкоксен, пренит, апатит, пирит, кварц. Габбро-диориты отличаются от габброидов меньшим количеством темноцветных минералов. Габбро-пегматиты встречаются в габброидах в виде участков неправильной формы с крупно- и гигантозернистой структурой и жил мощностью от 0,01-0,02 до 1-2 метров. По минеральному составу они близки с вмещающими габброидами и состоят из роговой обманки, клинопироксена, сосюритового агрегата, олигоклаза, кварца, цоизита, клиноцоизита, и примеси хлорита, сфена, карбоната, апатита.

На классификационных диаграммах (рис. 3), учитывающих отношения петрогенных оксидов, фигуративные точки составов (ФТС) изученных пород расположены: на $(\text{Na}^2+\text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ (рис. 3-1) в поле габбро, реже габбро-диоритов и диоритов нормальной щелочности; на АФМ – компактно, вблизи стороны треугольника $\text{FeO}t - \text{MgO}$ (рис. 3-2); на $\text{FeO}t/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ – в поле известково-щелочной серии (рис. 3-3).

Породы АГГКв большинстве случаев низко-титанистые, высоко-глиноземистые $Al^I=0,75-1,46$ ($\Sigma/n=1,03$), умеренно-магнезиальные $Mg\#=0,44-0,77$ ($\Sigma/n=0,68$) и низкокальциевые с натровым типом щелочности $Na_2O/K_2O=7,3-25,3$. $U/Th=0,3-0,5$, указывает на неизменность составов пород наложенными процессами. Отмечающиеся умеренно-титанистые разновидности относятся к габбро-пегматиту и габбро с повышенным количеством рудного минерала. Высокая магнезиальность некоторых образцов, возможно, связана с их контаминацией раннеордовикскими ультрабазитами, крупные тела которых известны в габброидах. На диаграммах SiO_2 – петрогенные элементы (рис. 4; табл. 1) отмечаются корреляционные тренды: отрицательные для CaO и MgO и положительные для Na_2O .

На петрогенетических и дискриминационных диаграммах мафических пород (рис. 5) ФТСАГГК, концентрируются в следующих полях: La/10 – Y/15 – Nb/8 [Cabanis, Lecolle, 1989] – толеитов вулканических дуг; Hf/3 – Th – Nb/16 [Wood, 1980] – толеитов островных дуг; Ti – Zr [Pearce, Cann, 1973] – островодужных толеитов; V – Ti/1000 [Shervais, 1982] – островодужных толеитов [Скляровидр., 2001]. На диаграмме разграничения мантийных источников Nb/Y – Zr/Y [Condie, 2005] – в поле базальтов N-MORB типа вблизи с точками ДЕР (компонента деплетированной глубинной мантии) и ДМ (компонента верхней деплетированной мантии). На

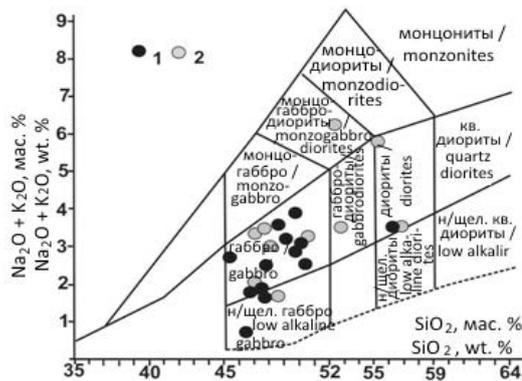


Рис. 3-1. $(Na^2O+K_2O) - SiO_2$

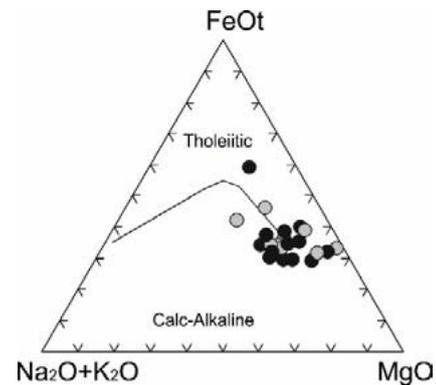


Рис. 3-2. $(Na^2O+K_2O) - FeOt - MgO$

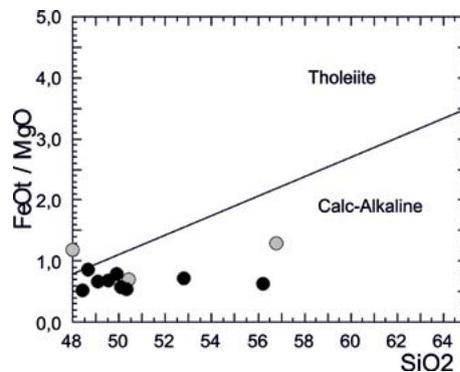


Рис. 3-3. $FeOt/MgO - SiO_2$

Рис. 3. Составы пород на классификационных диаграммах.

Условные обозначения: 1 – RFA «ИГЕМ-Аналитика»; 2 – анализы литературных источников. /

Fig. 3. Composition of rocks on the classificational diagrams.

Legend: 1 – XRF analysis from CCU; 2 – analysis from literature.

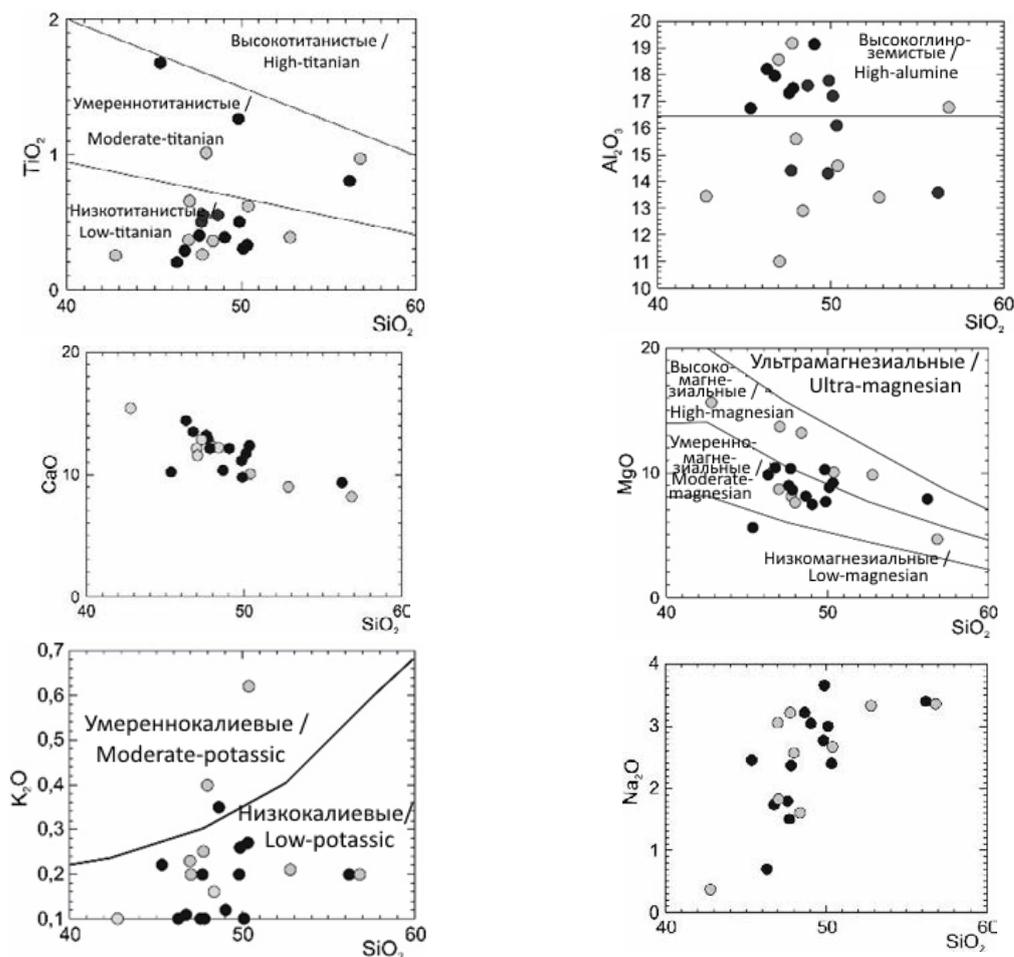


Рис. 4. Диаграммы концентраций петрогенных компонентов (в мас. %). /
 Fig. 4. Diagrams of petrogenic components concentration (in wt. %)

диаграмме Sm/Yb-La/Sm ФТС группируются вдоль тренда плавления шпинелевых перидотитов [Школьник и др., 2009]. Степень плавления составляет 7-15%. Ni/Co отношение в габброидах= 3,3-7,2 ($\Sigma/n=4,5$), а для мантийных выплавов этот показатель в пределах 2,5-5,0.

Редкоземельные элементы (табл. 1, 2), нормированные по хондриту [Sun, McDonough, 1989], образуют спектр линий, подобных *N-MORB*, но с более низкими концентрациями. На профилях габбро заметна слабо выраженная положительная аномалия европия (рис. 6). La_n/Yb_n отношение (показатель степени фракционирования *REE*) варьирует от 0,57 до 0,92; La_n/Sm_n – в пределах 0,57-0,96; Gd_n/Yb_n – 0,9-0,99. Величина Eu/Eu^* где ($Eu^* = (Sm_n + Gd_n)/2$) составляет 1,27-2,65. Известно, что отклонение нормированного по хондриту содержания *Eu* в конкретном образце от ожидаемого, вычисляемого интерполяцией нормированных содержаний соседних РЗЭ (*Sm* и *Gd*), связано с различиями в поведении в геологических процессах атомов *Eu* с разной валентностью. Мера обеднения или обогащения *Eu* выражается отношением Eu/Eu^* . Значения отношения $Eu/Eu^* < 0,95$ указывают на обеднение, а $Eu/Eu^* > 1,05$ – на обогащение европием. Считается, что отрицательная *Eu* аномалия, как правило, характерна для верхней континентальной коры, а положительная – для нижней коры и верхней мантии [Тейлор, Мак-Леннон, 1988].

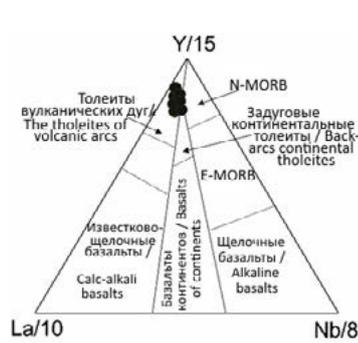


Рис. 5-1. La/10 – Y/15 – Nb/8

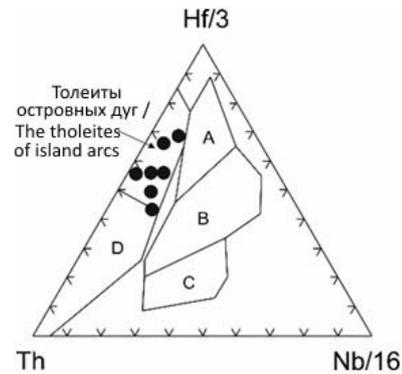


Рис. 5-2. Th- Hf/3 – Nb/16

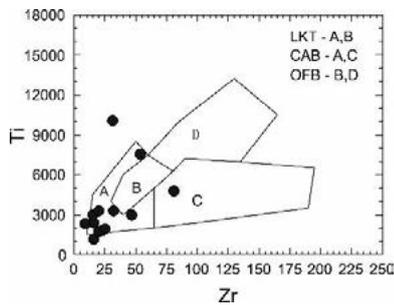


Рис. 5-3. Ti– Zr

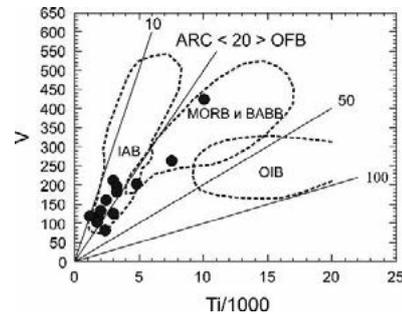


Рис. 5-4. V – Ti/1000

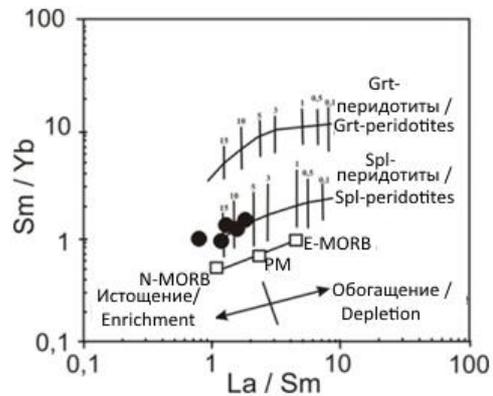
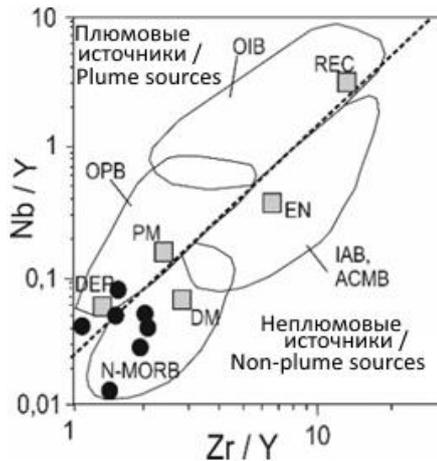


Рис. 5. Составы габброидов на петрогенетических и дискриминационных диаграммах. /
 Fig. 5. The compositions of gabbros nitrogenetics and discriminatory diagrams.

Eu-аномалия довольно часто встречается в минералах – в плагиоклазах она положительная, в других породообразующих минералах, а также в породах, как правило, наблюдается отрицательная Eu-аномалия. Eu²⁺ является высоко совместимым катионом по отношению к плагиоклазу, а его вхождение в плагиоклаз на место Ca, помимо близости ионного радиуса Eu²⁺ и размера позиции, облегчается совместным изоморфизмом (камуфлированием) со Si²⁺. Поэтому для пород со значительным количеством плагиоклаза (лейкогаббро, анортозиты) характерна положительная Eu-аномалия. $\sum REE$ г/т: в габбро = 10,5-21,5^Σ/n16,3; в габбро – пегматите 30,8-40,6^Σ/n=35,7.

Таблица 1. / Table 1.

Результаты RFA габброидов и габбро-пегматитов архызского комплекса (оксиды в масс.%; элементы в г/т). / RFA results for gabbroids and gabbro-pegmatites of the Arkhyz complex (oxides, wt. %; elements, g/t).

	35/18	36/18	37/18	38/18	40/18	41/18	42/18	43/18	44/18	54/18	55/18	56/18	58/18
SiO₂	50,05	47,61	56,16	47,74	46,30	49,83	46,76	45,36	49,89	49,06	47,84	48,65	50,34
TiO₂	0,31	0,40	0,78	0,46	0,24	1,26	0,29	1,68	0,50	0,39	0,55	0,55	0,33
Al₂O₃	17,15	17,30	13,58	14,43	18,16	14,30	17,95	16,73	17,79	19,14	17,49	17,60	16,10
Fe₂O₃	5,74	7,22	6,62	9,09	6,55	7,97	6,19	13,85	7,49	5,64	7,95	8,10	6,50
MnO	0,12	0,13	0,12	0,16	0,13	0,13	0,11	0,14	0,15	0,10	0,14	0,14	0,13
MgO	8,80	9,04	7,91	10,34	9,84	10,25	10,37	5,59	7,65	7,46	8,61	8,09	9,21
CaO	11,68	13,20	9,25	12,78	14,42	11,09	13,45	10,19	9,72	12,15	12,13	10,33	12,30
Na₂O	3,04	1,80	3,36	1,47	0,66	2,76	1,74	2,45	3,66	3,04	2,37	3,21	2,39
K₂O	0,12	0,09	0,16	0,20	0,05	0,20	0,11	0,22	0,26	0,12	0,10	0,35	0,27
P₂O₅	0,03	0,02	0,07	0,02	0,02	0,12	0,03	0,04	0,05	0,01	0,03	0,04	0,02
nnn	2,76	3,02	1,81	3,15	3,49	1,86	2,81	3,58	2,68	2,73	2,60	2,73	2,22
Сумма / Sum	99,8	99,83	99,82	99,84	99,86	99,77	99,81	99,83	99,84	99,84	99,81	99,79	99,81
Cr	555	100	340	195	155	483	386	44	102	322	295	359	522
V	119	160	204	213	120	264	103	424	127	82	195	181	134
Co	26	30	24	36	30	34	32	46	32	21	33	28	25
Ni	141	130	105	122	165	202	211	28	62	153	113	115	164
Cu	<10	173	29	65	113	<10	79	64	74	55	88	37	<10
Zn	40	46	48	52	48	47	38	60	50	40	52	56	46
Pb	<10	<10	12	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	81	<10	<10
Rb	<10	<10	<10	<10	<10	10	<10	10	11	<10	<10	15	11
Sr	206	205	144	188	180	195	189	242	208	253	232	226	190
Ba	61	58	69	96	51	94	22	55	197	63	58	106	96
Nb	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Zr	23	16	81	15	16	54	20	31	47	9	20	32	25
Y	14	12	23	11	7	33	7	21	18	9	13	17	12

Примечание: р. Большой Зеленчук: 35, 36, 38, 40, 42, 43, 44/18 – габбро; 37, 41/18 – габбро-пегматит; р. Теберда 54, 55, 56, 58/18 – габбро. / Note: river Bol'shoi Zelenchuk: 35, 36, 38, 40, 42, 43, 44/18 – gabbro; 37, 41/18 – gabbro-pegmatite; river Teberda 54, 55, 56, 58/18 – gabbro.

Таблица 2. / Table 2.

Результаты ICP-MS анализа габброидов и габбро-пегматитов архызского комплекса. / Results of ICP-MS analysis of gabbroids and gabbro-pegmatites of the Arkhyz complex.

Элементы В г/т / Elements. g/t	Номера проб / Sample numbers						
	35/18	37/18	38/18	41/18	43/18	54/18	56/18
Li	8,1	6,5	10,2	2,9	12,5	9,0	9,2
Be	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
Sc	48,9	51,5	60,6	62,3	49,2	36,2	44,9
Ti	2290	5482	3103	8368	11560	2783	3790
V	189,4	292,8	333,0	363,2	640,6	121,3	262,1
Cr	561,5	357,2	181,6	502,4	46,4	324,2	323,0
Mn	1060	1033	1407	1123	1179	879	1163
Co	34,1	32,1	47,0	40,7	40,7	27,4	31,4
Ni	152,0	114,3	117,5	200,0	27,0	152,9	106,7
Cu	11,6	31,8	66,5	19,3	69,2	54,6	38,6
Zn	43,4	54,1	54,0	57,3	69,4	38,9	61,5
Rb	3,2	3,1	4,5	5,2	4,8	3,3	9,7
Sr	263	170	221	223	269	309	262
Y	10,0	16,9	8,9	24,6	12,4	5,8	11,2
Zr	19,4	24,6	12,4	25,7	25,4	8,7	24,0
Nb	0,3	1,0	0,1	1,2	0,6	0,5	0,6
Mo	1,0	1,0	0,6	0,7	1,1	2,7	1,5
Ag	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Cd	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
Cs	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Ba	45,2	55,3	71,7	97,6	44,0	48,5	71,7
La	1,1	2,8	0,8	3,1	1,5	0,9	1,5
Ce	3,4	7,3	2,3	8,8	4,3	2,2	4,7
Pr	0,5	1,1	0,4	1,4	0,7	0,3	0,7
Nd	3,1	5,8	2,3	7,8	4,3	1,9	4,1
Sm	1,1	2,0	0,9	2,8	1,5	0,6	1,3
Eu	0,5	0,8	0,5	0,9	0,7	0,6	0,6
Gd	1,3	2,4	1,1	3,4	1,8	0,8	1,6
Tb	0,3	0,5	0,3	0,7	0,4	0,2	0,3
Dy	1,8	3,1	1,6	4,6	2,5	1,1	2,1
Ho	0,4	0,7	0,4	1,0	0,5	0,3	0,5
Er	1,2	2,0	1,1	2,8	1,6	0,7	1,4
Tm	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0,1	0,2
Yb	1,1	1,8	1,0	2,5	1,5	0,7	1,4
Lu	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0,1	0,2
Hf	0,7	1,0	0,4	1,1	0,9	0,3	0,9
Ta	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1
W	0,5	0,9	0,4	0,6	0,5	1,0	0,7
Pb	9,9	18,2	9,0	9,5	23,2	17,3	17,3
Th	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,0	0,2
U	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
ΣREE	16,1	30,8	12,9	40,6	21,5	10,5	20,7

Концентрации несовместимых элементов, нормированные по *N-MORB* [Sun, McDonough, 1989], образуют спектр криволинейных линий, располагающихся вдоль профиля *N-MORB*. В габбро отмечаются: незначительное повышение содержаний гидромагматофильных, крупноионных элементов *Rb*, *Ba*, *K*, *Sr* и отрицательные аномалии высокозарядных элементов *Nb*, *P*, *Zr*, *Hf* – элемента индикатора участия субдукционного осадка в магмагенезисе [Мартынов, 2010]. Аналогичная картина, за исключением фосфора, повторяется и в габбро-пегматитах. Для уточнения геохимической специализации пород АГГК составлены ранжированные ряды кларков концентрации ($Kk > 1,1$) и они имеют следующий вид: габбро $Pb_{2,5}Ag_{2,0}Sc_{1,6}Ni_{1,4}Cr_{1,3}Co_{1,0}(Cu_{0,5})$; габбро-пегматиты – $Pb_{2,3}Ag_{2,0}Sc_{1,9}Ni_{1,9}Cr_{1,8}Co_{1,0}(Cu_{0,3})$. Их сравнение с породами близкого петрогеохимического типа, двенадцати геодинамических обстановок [Гусев и др., 1999] показывает, что они наиболее близки с породами юных островных дуг ($Cr_{1,5}Sc_{1,5}Co_{1,3}Ni_{1,2}Cu_{1,1}$) и в меньшей степени с породами задуговых котловин ($Co_{1,6}Ni_{1,4}$). Геохимическая специализация подобных объектов халькофильно – сидерофильная. Для оценки рудогенерирующей способности пород АГГК рассчитаны коэффициенты накопления (Кн) рудных и редких элементов как отношение средних содержаний в последующей фазе (габбро-пегматит) к предыдущей (габбро). Известно, что величина этого коэффициента отражает такую важную особенность, как преобладающее рассеивание этих элементов в кристаллических решетках минералов ранних этапов кристаллизации (Кн < 1), или их отторжение и накопление в продуктах поздних этапов (Кн > 1) [Ляхович, 1983]. На основании полученных Кн предполагается, что в процессе кристаллизации и эмманационной дифференциации расплава в заключительной стадии формирования магматических тел происходит накопление $Zr_{3,0}Nb_{2,8}Th_{2,5}Y_{1,9}Hf_{1,6}Cd_{1,5}Ti_{1,5}Cr_{1,4}Ni_{1,4}W_{1,2}Sc_{1,2}V_{1,2}Ba_{1,1}$. Сопутствующее оруденение, связанное с АГГК, подразделяется на образования магматической и постмагматической стадий. К первому типу относятся мелкие тела неправильной формы с повышенным содержанием рудных компонентов (титаномагнетит + лейкоксен + сфен 20-30%), описываемые (располагающиеся) вблизи лежащих контактов интрузивов, а также титанмагнетитовые и магнетитовые метасоматиты с корундом, диаспором и шпинелью, на контакте с ультрабазитами. Вторые представлены карбонатными прожилками с пиритом, халькопиритом и медной зеленью и обогащенными ими зонами мощностью до 1-3 м и протяженностью до 100–200 м в массивах габбро и прожилками ювелирно-поделочных минералов (ксонотлит, пектолит) вблизи контактов с ультрабазитами [Каденский, 1956; Хаин, 1984].

Результаты работы

Изученные среднеордовикские габброиды из Структурно-формационной зоны Передового хребта (СФЗ ПХ) высокоглиноземистые, низкотитанистые, умеренно-магнезиальные, низкокалиевые породы, с натровым типом щелочности. Они являются производными расплава образовавшегося при 7-15% плавлении деплетированных шпинелевых перидотитов. Несовместимые элементы и *REE*, нормированные по *N-MORB* и хондриту [Sun, McDonough, 1989], образуют спектры линий подобных *N-MORB*, но в целом с существенно более низкими концентрациями большинства элементов. $\sum REE$ в габбро = 10,5-21,5 г/т. На профилях *REE* заметна слабо выраженная положительная аномалия европия $Eu/Eu^* 1,27-2,65$, что в совокупности с положительной аномалией Sr допускает изначальную аккумуляцию плагиоклаза в исходном расплаве.

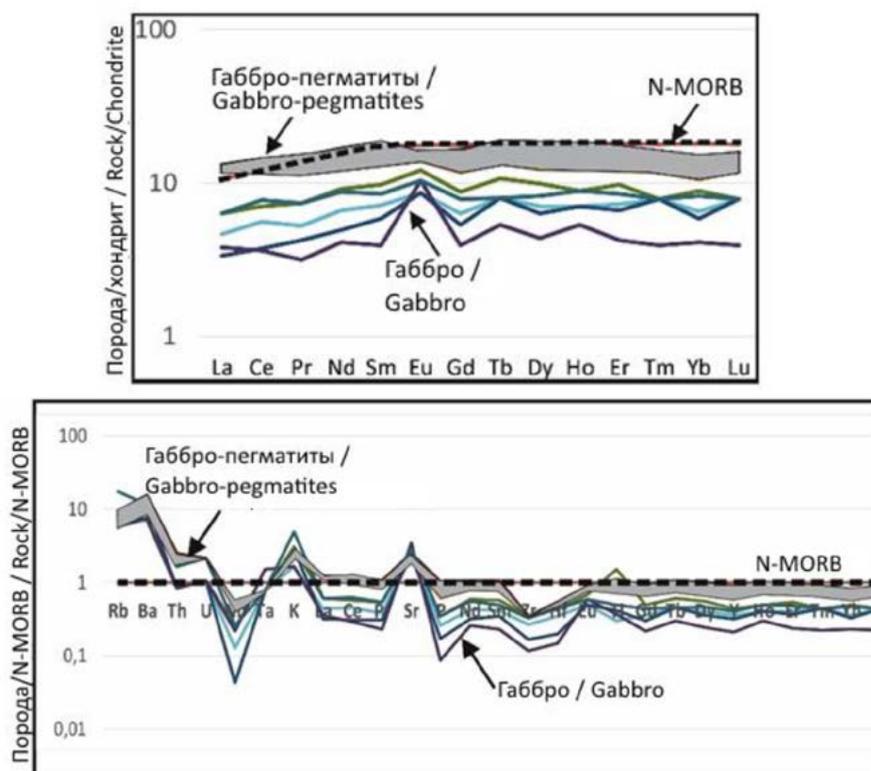


Рис. 6. Составы габброидов на спайдер диаграммах. Концентрации REE нормированные к хондриту, концентраций несовместимых элементов, нормированные к N-MORB, по [Sun, McDonough, 1989].
 Fig. 6. Composition of gabbro on the spider-diagrams. Contents of REE were normalized to chondrite; contents of incompatible elements were normalized to N-MORB, according [Sun, McDonough, 1989].

Также отмечается незначительное повышение содержаний гидромагматофильных, крупноионных элементов *Rb*, *Ba*, *K*, *Sr* – индикаторов флюидного субдукционного компонента и отрицательные аномалии высокозарядных элементов *Nb*, *P*, *Zr*; *Hf*. Анализ петрогенетических диаграмм показал, что ФТС АГГК группируются в полях островодужных толеитов. Их сравнение с породами близкого петрогеохимического типа [Гусев и др., 1999] показывает, что они наиболее близки с породами юных островных дуг. Геохимическая специализация халькофильно – сидерофильная. Сопутствующее оруденение, связанное с АГГК, подразделяется на образования магматической стадии – титан магнетитовые и магнетитовые рудные концентрации и постмагматической стадии – карбонатные прожилки с пиритом, халькопиритом и медной зеленью.

Рассмотрим полученные результаты с нескольких позиций: **1** – ассоциация пород и ее геологическая интерпретация; **2** – сравнение геохимических данных с породами близкого петрохимического состава. **(1)** Считается, что архызский габбро – габбро-диоритовый плутонический комплекс, совместно с ультрабазитами и вулканитами Карабекской свиты, является составной частью офиолитовой ассоциации Марухского покрова надвинутого на позднедевонские и раннекаменноугольные образования [Семенуха и др., 2009; Хаин, 1984]. Известно, что офиолитовая ассоциация – это комплекс пород, состоящий сверху вниз из: кремнистых осадочных пород,

базальтов, габбро и гипербазитов. Считается, что они являются древним аналогом океанической коры и обычно приурочены к шовным зонам (сутурам) складчатых поясов. Однако в 70-х годах прошлого столетия было отмечено наличие надсубдукционных геохимических характеристик у базитов, наиболее представительных и изученных офиолитовых комплексов. Их несоответствие срединно-океаническим базальтам послужило основанием для выделения специфических супрасубдукционных внутриокеанических обстановок [Pearce et al., 1984]. Наиболее ярким индикатором таких обстановок является наличие бонинитов [Склярков и др., 2016]. Отметим, что шпирты оливинового габбро, описанные вблизи лежачего контакта Зеленчукского массива, с содержанием MgO, TiO₂, K₂O, (15,61; 0,25; 0,1 соответственно) [Каденский, 1956] близки к габброидам бонинитовому типу, а вулканиты Карабекской свиты нами еще не изучены. Однако основная часть изученных массивов сложена высокоглиноземистыми, низкотитанистыми габброидами известково-щелочного типа, с меньшим содержанием MgO, и они близки к породам юных островных дуг. По-видимому, аллохтонная структура, известная как «Марухский покров», образована в результате серии надвигов, в которых участвуют разновозрастные образования, в том числе литосферной мантии и юной островной дуги.

(2) – Сравнение геохимических данных (LILE, HFSE, REE) АГГК с породами близкого петрохимического состава показывает, что они вполне сопоставимы с раннеальпийскими, вулканитами фиагдонского комплекса Северной Осетии [Газеев и др., 2014] и раннепалеозойскими эклогитами Большого Кавказа. Общей их характеристикой является присутствие в аллохтонных структурах. С другой стороны, их сравнение с силурийскими габбро-диоритами верховьев реки Кубань [Газеев и др., 2020], расположенными на одной широте, (восточнее в ~20 км), показывает значительные различия состава мантийного источника по содержанию LILE и REE. В одном случае – это деплетированная мантия, в другом случае – метасоматизированная мантия. Это свидетельствует о том, что изначально объекты находились на значительном удалении (сотни километров) друг от друга. Причины мантийного метасоматоза в районе южной окраины Скифской плиты, на наш взгляд, могут быть связаны с влиянием древней (докембрийской) Транскавказской поперечной структуры [Шолпо, 1978], и флюидами погружающегося палеозойского слэба. Следы слэба в виде адакитов обнаружены в неген – четвертичных вулканитах [Газеев и др., 2018] и, по нашим новым находкам, в позднепермских образованиях СФЗ ПХ. Большой Кавказ уникальный объект с непрерывной магматической историей. Разнообразные по составу вулканиты и разноглубинные интрузивы, часто сопровождаемые оруденением, представлены во всех возрастных срезах от раннего палеозоя до голоцена. Очевидно, что их изучение на основе геохимии редких и редкоземельных элементов ответит на многие вопросы геодинамической истории региона.

Выводы

Изучены петрохимические и геохимические особенности среднеордовикских габброидов, распространенных в пределах Марухского аллохтона в СФЗ ПХ БК. Доказано, что эти высокоглиноземистые, низкотитанистые, умеренномагнезиальные, низкокалиевые породы с натровым типом щелочности, являются производными расплава, образовавшегося при плавлении деплетированных шпинелевых перидотитов. На основании положительных аномалий европия Eu/Eu^* 1,27-2,65 и Sr предполагается, что в расплаве, из которого кристаллизовались габброиды,

имела место предварительная аккумуляция плагиоклаза. Установлено, что породы АГГК близки столеитовыми образованиями юных островных дуг и характеризуются незначительно повышенными содержаниями гидромагматофильных, крупноионных элементов – *Rb, Ba, K, Sr* отрицательными аномалиями высокозарядных элементов – *Nb, P, Zr, Hf*. Сопутствующее габброидам оруденение подразделяется на образования магматической стадии – титанмагнетитовые и магнетитовые рудные концентрации и постмагматической стадии – карбонатные прожилки с пиритом, халькопиритом. По совокупности полученных результатов предполагается, что аллохтонная структура, известная как «Марухский покров» Передового хребта, не является классической офиолитовой ассоциацией и, что она сформирована в результате серии надвигов, в которых участвуют образования литосферной мантии и юной островной дуги.

Литература

1. Ажгирей Г. Д., Баранов Г. И., Кропачев С. М., и др. Геология Большого Кавказа. – М.: Недра, 1976. – 248с.
2. Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Гольцман Ю. В. и др. Фиагдонский эффузивно – силловый комплекс (республика Северная Осетия – Алания, Россия): геохимия, геодинамическая обстановка формирования, проблемы рудоносности. // Вестник ВНИЦ РАН. – 2014. – №2. – С. 21-33.
3. Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Гольцман Ю. В., и др. Вулканиды с характеристиками адакитов из верхнеплиоценовых разрезов Терско – Каспийского краевого прогиба. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №3. – С. 17-31.
4. Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Герасимов В. Ю. Догерцинские габбро-диориты верховьев реки Кубань (Северный Кавказ): геодинамическая типизация, геохимия и минерогения. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – №1. – С. 6-20.
5. Гусев Г. С., Кудрявцев Ю. К., Гушин А. В. и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514с.
6. Каденский А. А. Магматическая геология Передового хребта Северо-Западного Кавказа. – Л.: Изд. АН. СССР, 1956. – 278с.
7. Ляхович В. В. Факторы рудогенерирующей способности гранитоидов. – М.: Наука, 1983. – 239с.
8. Мартынов И. А. Основы магматической геохимии. // Владивосток. Дальнаука. – 2010. – 215с.
9. Михеев Г. А., Потапенко А. Я. Некоторые итоги изучения магматической деятельности на Северном Кавказе. // Труды по геологии и полезным ископаемым Северного Кавказа. Вып. XIII. Ставропольское книжное издание. – 1992. – С. 13-19.
10. Никишин А. М., Фокин П. А., Тихомиров П. Л. и др. 400 миллионов лет геологической истории южной части Восточной Европы. – М.: ГЕОКАРТ ГЕОС, 2005. – 349с.
11. Семенуха И. Н., Черных В. И., Соколов М. Г. и др. Объяснительная записка, листы К-37-VI, К-37-XI (Карачаевск), серия кавказская, второе издание. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. – 204с.
12. Скляр Е. В., Гладкочуб Д. П., Донская Т. В. и др. Интерпретация геохимических данных – М.: Центр «Интеграция», 2001. – 273с.
13. Скляр Е. В., Ковач В. П., Котов А. Б. и др. Бониниты и офиолиты: проблемы их соотношения и петрогенезиса бонинитов. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. №1. – С. 163-180.
14. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора ее состав и эволюция. – М.: Изд. «Мир», 1988. – 364с.

15. Хаин Е. В. Офиолиты и герцинская покровная структура Передового хребта Северного Кавказа. // М. Изд. «Наука». 1984. 89 с.
16. Хильтов Ю. Н. Геология и петрология Архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ). // М.: Изд. АН. СССР. 1959. 143 с.
17. Школьник С. И., Резницкий Л. З. и др. Геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация метавулканитов Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион). // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. №9. – С. 1013-1024.
18. Шолпо В. В. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. – М.: Недра, 1976. – 159с.
19. Adamia Sh., Chabukiani A., Chkhotua T., Sadradze N., Zakaraia D., Zakariadze G. Geological map of the Caucasus. – 2010. Scale 1:1000000.
20. Cabanis B., Lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: unoutil pour ladiscrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de mélange et/oucontaminationcrustale. // C.R. Acad. Sci. Ser. II. – 1989. – Vol. 309. – pp. 2023-2029.
21. Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. // Lithos. – 2005. – Vol. 79. – pp. 491-504.
22. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. // Earth Planet. Sci. Lett. – 1973. – Vol. 19. – pp. 290-300.
23. Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. // Geol. Soc. London, Spec. Publ. – 1984. – Vol. 16. – pp. 74-94.
24. Shervais J.W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. // Earth Planet. Sci. Lett. – 1982. – Vol. 59. – pp. 101-118.
25. Sun S. S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // Geol. Spec. Publ. – 1989. – No. 42. – pp. 313-345.
26. Wood D.A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. // Earth Planet. Sci. Lett. – 1980. – Vol. 50. – pp. 11-30.

References

1. Azhgirei G. D., Baranov G. I., Kropachev S. M. et al. Geology of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra, 1976. 248 p. (In Russ.)
2. Gazeev V.M., Gurbanov A. G., Gol'tsman Yu. V. et al. Fiagdon effusive-sill complex (Republic of North Ossetia-Alania, Russia): geochemistry, geodynamic setting of formation, problems of ore content. Bulletin of VSC RAS. 2014. No. 2. pp. 21-33. (In Russ.)
3. Gazeev V.M., Gurbanov A. G., Golt'sman Yu. V. et al. Volcanics with characteristics of adakites from the Upper Pliocene sections of the Tersk-Caspian foredeep. Geology and Geophysics of Russian South. 2018. No. 3. pp. 17-31. (In Russ.)
4. Gazeyev V.M., Gurbanov A. G., Gerasimov V. Yu. Pre-Hercyniangabbro-diorites of the upper reaches of the Kuban River (North Caucasus): geodynamic typification, geochemistry and minerageny. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. No. 1. pp. 6-20. (In Russ.)
5. Gusev G. S., Kudryavtsev Yu. K., Gushchin A. V. et al. Geochemical and metallogenic specialization of structural-material complexes. St. Petersburg, VSEGEL, 1999. 514 p. (In Russ.)
6. Kadenskii A.A. Magmatic geology of the Northwest Caucasus Peredovoi ridge. Leningrad. Published by USSR Academy of Sciences, 1956.278 p. (In Russ.)
7. Lyakhovich V. V. Factors of ore-generating capacity of granitoids. Moscow. Nauka, 1983. 239 p. (In Russ.)
8. Martynov I.A. Fundamentals of magmatic geochemistry. Vladivostok. Dalnauka, 2010. 215 p. (In Russ.)
9. Mikheev G.A., Potapenko A. Ya. Some results of the study of magmatic activity in the North Caucasus. In: Proceedings on geology and minerals of the North Caucasus. Issue XIII. Stavropol book edition. 1992. pp. 13-19. (In Russ.)

10. Nikishin A. M., Fokin P. A., Tikhomirov P. L. et al. 400 million years of geological history of the southern part of Eastern Europe. Moscow. GEOKART GEOS, 2005. 349 p. (In Russ.)
11. Semenukha I. N., Chernykh V. I., Sokolov M. G. et al. Explanatory note, sheets K-37-VI, K-37-XI (Karachaevsk), Caucasian series, second edition. Saint Petersburg. VSEGEI, 2009. 204 p. (In Russ.)
12. Sklyarov E. V., Gladkochub D. P., Donskaya T. V. et al. Interpretation of geochemical data. Moscow. Center "Integratsiya", 2001. 273 p. (In Russ.)
13. Sklyarov E. V., Kovach V. P., Kotov A. B. et al. Boninites and ophiolites: problems of their correlation and petrogenesis of boninites. *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No. 1. pp. 163-180. (In Russ.)
14. Taylor S. R., McLennan S. M. Continental crust, its composition and evolution. Moscow. Mir, 1988. 364 p. (In Russ.)
15. Khain E. V. Ophiolites and the Hercynian cover structure of the Peredovoy Range of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1984. 89 p. (In Russ.)
16. Khil'tov Yu. N. Geology and petrology of the Arkhyz intrusive complex (North Caucasus). Moscow. Published by USSR Academy of Sciences, 1959. 143 p. (In Russ.)
17. Shkol'nik S. I., Reznitskii L. Z., Belichenko V. G., Barash I. G. Geochemistry, questions of petrogenesis and geodynamic typification of metavolcanic rocks of the Tunkinskterrane (Baikal-Khubsugul region). *Geology and geophysics*. 2009. Vol. 50. No. 9. pp. 1013-1024. (In Russ.)
18. Sholpo V. V. Alpine geodynamics of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra, 1976. 159 p. (In Russ.)
19. Adamia Sh., Chabukiani A., Chkhotua T., Sadradze N., Zakaraia D., Zakariadze G. Geological map of the Caucasus. 2010. Scale 1:1000000.
20. Cabanis B., Lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: unoutil pour ladiscrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de mélange et/oucontaminationcrustale. *C. R. Acad. Sci. Ser. II*. 1989. Vol. 309. pp. 2023-2029.
21. Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. *Lithos*. 2005. Vol. 79. pp. 491-504.
22. Pearce J. A., Cann J. R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1973. Vol. 19. pp. 290-300.
23. Pearce J. A., Lippard S. J., Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 1984. Vol. 16. pp. 74-94.
24. Shervais J. W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1982. Vol. 59. pp. 101-118.
25. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. *Geol. Spec. Publ.* 1989. No. 42. pp. 313-345.
26. Wood D. A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1980. Vol. 50. pp. 11-30.

УДК 551.243

DOI:

Оригинальная статья

Экспериментальное исследование мобиристских механизмов образования альпийской складчатой структуры Большого Кавказа

Т. В. Гиоргобиани^{1, 2}, Д. П. Закара³

¹Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили,
Грузия, 0179, г. Тбилиси, пр. Чавчавадзе, 1;

²Геологический институт им. А. И. Джанелидзе,
Грузия, 0186, г. Тбилиси, ул. Политковской, 31, e-mail: ciala_gugava@mail.ru;

³НЮЛ «Геологи», Грузия, Тбилиси, 0174, ул. Я. Николадзе, 5,
e-mail: d_zakara@yahoo.com

Статья поступила: 21.08.2020, доработана: 02.09.2020, одобрена в печать: 04.09.2020

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрен вопрос о механизме образования складчатости Большого Кавказа, который до сих пор является дискуссионным. В настоящее время условия формирования главной (допозднеорогенной) структуры региона объясняются большинством исследователей мобилистскими поддвиговыми и придвиговыми механизмами складкообразования, установленными анализом полевых материалов. Однако, для решения этого вопроса, необходимо провести экспериментальные исследования возможностей этих механизмов, чтобы убедиться в их достоверности. **Цель работы.** Экспериментальное исследование поддвиговых и придвиговых механизмов формирования складчатой структуры, для установления подобия, полученной с помощью моделирования складчатости и структуры Большого Кавказа. **Методика** исследований заключалась в проведении экспериментального моделирования процессов складкогенеза. Модели, имитирующие осадочные толщи Большого Кавказа, состояли из пачек чередования горизонтальных слоев петролатума, которые помещались между двумя деревянными брусками. При моделировании поддвигового механизма складчатости, давящий брусок имел клинообразную форму, чем имитировались сколовые пологие разломы. В опытах придвигового механизма деформации активный брусок имел крутую грань, чем воспроизводился субвертикальный наклон краевого разлома. Исходные модели помещались в специальный прибор, где они подвергались односторонней тангенциальной деформации. **Результаты.** При моделировании поддвигового механизма образования складчатости в процессе косоугольного сжатия в слоистой толще наблюдались надвиговые (поддвиговые) смещения вдоль пологой поверхности сколового разлома почти недеформированных слоев. За ними в условиях горизонтального сжатия в слоистой пачке возникла субвертикальная мелкая сильносжатая складчатость. В процессе моделирования придвигового механизма складкогенеза бруски с крутыми гранями прижимались к слоевой пачке. Во время параллельной к слоистости деформации модели, вблизи давящего блока, возникла зональная субвертикальная тесносжатая складчатость. Ее напряженность уменьшалась в сторону пассивного бруска, где она переходила в моноклиналичную структуру. В процессе моделирования в поддвиговых опытах образовалась зональная складчатость, интенсивность которой возрастала с удалением от места давления. Такая морфология складчатости не характерна региону, что противоречит гипотезе о поддвиговом механизме его складкообразования. В придвиговых экспериментах также образовалась асимметричная зональная структура, но ее напряженность уменьшалась в обратном направлении. Аналогичная зональность складчатой структуры развита в пределах Большого Кавказа, что подтверждает возможность ее формирования придвиговым механизмом тектогенеза.

Ключевые слова: Большой Кавказ, складчатая структура, механизм формирования, эксперименты, моделирование, условия подобия, придвиговое и поддвиговое складкообразование.

Для цитирования: Гиоргобиани Т. В., Закарая Д. П. Экспериментальное исследование мобилистских механизмов образования альпийской складчатой структуры Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 23 – 39. DOI: xx. xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI:

Original paper

Experimental study of mobilistic mechanisms of formation of the Alpine folded structure of the Greater Caucasus

T. V. Giorgobiani ^{1, 2}, D. P. Zakaraia ³

¹Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 1 Chavchavadze Ave., Tbilisi 0179, Georgia;

²Al. Djanelidze Geological Institute, 31 A. Politkovskaia Str., Tbilisi 1086, Georgia,
e-mail: ciala_gugava@mail.ru

³NPLE “Geologi”, Georgia, 0174, Tbilisi, I. Nikoladze Str., 5, e-mail: d_zakara@yahoo.com

Received: 21.08.2020, revised: 02.09.2020, accepted: 04.09.2020

Abstract: Relevance. In the article is discussed the mechanism of folding of the Greater Caucasus, which is still controversial. At present, the conditions for the formation of the main (pre-late orogenic) structure of the region, by most researchers in the result of analysis of the field data are considered as mobile underthrusting and thrusting mechanisms of folding. However, to resolve this issue, it is necessary to conduct experimental studies of the capabilities of these mechanisms to ensure their reliability. **Aim.** Experimental study of the underthrusting and thrusting mechanisms of the formation of a folded structure, to establish the similarity of the folding obtained by modeling and structure of the Greater Caucasus. The research **methodology** consisted in carrying out experimental modeling of fold genesis processes. Models imitating sedimentary strata of the Greater Caucasus consisted of packs of alternating horizontal layers of petrolatum, which were placed between two wooden blocks. When modeling the underthrusting mechanism of folding, the pressing bar had a wedge shape, which simulated gently sloping shear faults. In experiments with the thrusting mechanism of deformation, the active bars had steep edges, which produced the subvertical inclination of the edge fault. The original models were placed in a special device, where they were subjected to one-sided tangential deformation. **Results.** During modeling the underthrusting mechanism of folding in the process of oblique compression in the layered strata, overthrust (underthrust) displacements were observed along the gently-dipping surface of the shear fault of the almost undeformed layers. Behind them, under horizontal compression in the layered pack, subvertical highly compressed small scaled folding has developed. In the process of modeling the thrusting mechanism of folding genesis, bars with steep edges were pressed against the layered stack. During the deformation of the model parallel to the bedding, a zonal subvertical tightly compressed folding appeared near the pressing block. Its strength decreased towards the passive bar, where it passed into a monoclinical structure. In the course of modeling in underthrusting experiments, zonal folding was formed, the intensity of which increased with distance from the place of pressure. This folding morphology is not typical for the region, which contradicts the hypothesis of the underthrusting mechanism of its folding. In thrust experiments, an asymmetric zonal structure was also formed, but its tension decreased in the opposite direction. A similar zoning of the folded structure is developed within the Greater Caucasus, which confirms the possibility of its formation by the thrust mechanism of tectogenesis.

Key words: Greater Caucasus, folded structure, mechanism of formation, experiments, modeling, conditions of similarity, thrusting and underthrusting folding.

For citation: Giorgobiani T. V., Zakaraia D. P. Experimental study of mobilistic mechanisms of formation of the Alpine folded structure of the Greater Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (2): 23 – 39. DOI: xx. xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

Введение

Складчатая система Большого Кавказа (БК) представляет собой достаточно хорошо изученный тектонически регион альпийского Средиземноморского пояса. Несмотря на это, вопрос о механизме формирования складчатости БК все еще остается недостаточно исследованным и до сих пор является дискуссионным. Хотя решению вопроса генезиса складчатой структуры БК всегда уделялось особое внимание, достигнутые результаты в этом направлении еще не достаточны. Поэтому серьезные разногласия среди исследователей региона о механизме альпийского складкообразования на БК пока продолжают.

В настоящее время существуют представления, объясняющие образование главной (допозднеорогенной) складчатой структуры региона как с фиксистских, так и с мобилистских позиций. Сторонники фиксистской модели считают, что складчатость БК вызвана вертикальными тектоническими движениями, возникающими внутри подвижной зоны, за счет процессов глубинного диапиризма или адвекции. Первичные вертикальные движения при этом трансформируются во вторичные горизонтальные, вызывающие складчатость рассматриваемого региона [Шолпо, 1978; Шолпо и др., 1993; Рогожин, Шолпо, 1988; Гончаров, 1988, 1997 и др.]. Наряду с этим существуют представления, что в формировании складчатости БК приняла участие не только глубинная адвекция, но и боковое тангенциальное сжатие региона [Яковлев, 1987]. Однако морфологические особенности складчатости БК и альпийская геодинамика региона свидетельствуют о том, что в подобных условиях не может происходить образование похожей на БК складчатой структуры. Поэтому фиксистский механизм складкообразования региона в данной статье не рассматривается.

Большинство исследователей предполагают образование складчатой структуры БК вследствие действия односторонних тангенциальных сил сжатия, допуская при этом возникновение складчатости в результате поддвигания относительно жесткого Черноморско-Закавказского микроконтинента (ЧЗМ) по сколовому разлому под БК. Впервые мысль о таком подвиге высказал В. П. Ренгартен в 1926 г. [Хаин, 1984, с. 183]. Затем к аналогичному заключению пришли и другие исследователи [Козлов, 1937, Милановский, Хаин, 1963]. Позже, с появлением концепции тектоники литосферных плит, сторонников поддвигового генезиса складчатости БК стало больше [Гамкрелидзе П., Гамкрелидзе И., 1975, 1977; Ушаков и др., 1976; Гаркаленко, 1976; Гамкрелидзе, 1976, 1984; Адамия, 1977, 1985; Адамия и др., 1987; Adamia, 1975; Adamia et al., 1977, 2017; Шемпелев, 1978; Gamkrelidze, 1986; Гамкрелидзе, Гиоргобiani, 1987; Gamkrelidze, Giorgobiani, 1990; Гиоргобiani, Закарая, 1989, 1999; Giorgobiani, Zakaraia, 2006, 2010, 2013; Гиоргобiani, 1999, 2005, 2008; Giorgobiani, 2003 и др.].

Однако, несмотря на многолетнее изучение, выводы о механизме формирования складчатой структуры БК не всегда основывались на детальном региональном фактическом материале, а опирались на общие представления о характере альпий-

ской складчатости, без учета некоторых важных ее особенностей. А морфология складчатости, как известно, дает возможность восстановить динамику и кинематику ее генезиса, поскольку почти каждая деформация, испытанная регионом, запечатана в его складчатой структуре.

Механизмы складкообразования

Как показали многолетние региональные детальные геолого-структурные исследования авторов, проведенные на Северо-Западном, Центральном и Восточном Кавказе, а также анализ существующей литературы по Юго-Западному Кавказу, складчатость БК была изучена еще недостаточно. Полученные авторами новые данные резко изменили существующие представления о морфологии складчатости БК. Они позволили установить отсутствие в регионе типичной для поддвиговых зон морфологии структур, что указывает на другой механизм его образования. Более подробно важные особенности альпийской складчатости противоречащие проявлению в пределах БК поддвигового механизма структурообразования приведены в отдельной статье [Гиоргобиани, 2008]. В работе детально рассмотрена морфология складчатой структуры и характер ее расположения в пределах БК.

Складчатость ниже-среднеюрских толщ краевой Гагра-Джавской зоны, находящейся над зоной предполагаемого поддвига и в других северных тектонических зонах, характеризуется развитием крутопадающих (падение осевых поверхностей от $65-85^\circ$ до 90° на северо-восток) структур юго-западной вергентности. Аналогичная круто поставленная южновергентная складчатая структура с такими же большими ($65-86^\circ$) углами падения их плоскостей на северо-восток наблюдается и в среднеальпийском этаже. Следует отметить, что отмечаемые иногда в пределах БК более пологие структуры представляют собой не ранне-среднеюрскую складчатость, а более молодые позднеальпийские коллизионные образования. Следовательно, общий субвертикальный стиль главной складчатой структуры БК, а также наличие рассекающего эти структуры крутопадающего кливажа и соскладчатых разрывов исключает поддвиговое их происхождение.

Поддвиговые структуры могут образоваться при поддвиге ЧЗМ непосредственно под чехол складчатой системы БК. Примером такой складчатости может служить структура южной части Чвежипсинской зоны на Северо-Западном Кавказе. Здесь в пределах пологого крыла Пластунской синклинали развита мелкая осложняющая складчатость, образованная на новейшем этапе в результате поддвига под нее Абхазской зоны Грузинской глыбы. Расположенная над надвиговой зоной складчатая структура имеет пологие наклоны осевых поверхностей складок на север под углами $40-55^\circ$, а иногда отмечаются и лежащие складки с очень малыми ($20-35^\circ$) падениями осевых поверхностей [Гиоргобиани, Закарая, 1989]. Следовательно, поддвиговый механизм деформации может привести к возникновению в основном опрокинутой, вплоть до лежащей, складчатости. Однако, как было отмечено выше, такая пологонаклоненная складчатость не характерна для главной складчатой структуры БК. Поэтому морфология структуры региона не подтверждает представление об образовании ее в процессе поддвиговых движений ЧЗМ. Кроме того, совершенно невозможен процесс поддвига более высоко стоящего ЧЗМ, под значительно ниже лежащий южный край выполненного осадками бассейна БК. Тем более что это происходит по разделяющему их субвертикальному глубинному разлому. А более пологих продольных сколовых нарушений, необходимых для поддвигания, в этих

толщах в то время еще не было. Проявление поддвигового механизма, как основную причину формирования складчатости БК, отрицают также некоторые исследователи [Яковлев, 2002]. Поэтому представление о пододвигании ЧЗМ как единой плиты под БК является схематичным, пока еще не подкрепленным структурными данными и входит в противоречие с особенностями складчатого строения региона.

Подтверждением этого также является асимметричная латеральная зональность главной складчатой структуры БК. Она наиболее четко проявлена в мальм-эоценовом этаже С-З Кавказа и неполно в пределах Ю-В Кавказа, которые меньше всех в регионе осложнены новейшими коллизионными деформациями. Зональность выражена в последовательной смене в поперечном сечении региона, с юго-запада на северо-восток линейной сильносжатой складчатости линейной гребневидной умеренной, а затем слабо вытянутыми брахиформными складками, переходящими в свою очередь, в пологую (до 30°) с падением на северо-восток моноклираль. Уменьшение интенсивности складчатости в том же направлении отмечается также в нижне-среднеюрском этаже в Гойтхском антиклинории [Гиоргобиани, Закарая, 1989]. Происхождение латеральной структурной зональности региона, очевидно, было связано с боковым тангенциальным сжатием БК, в результате придвигания к нему с юго-запада ЧЗМ. Термин «придвиг» принадлежит Е. И. Паталахе. Этим процессом он объяснял приразломное смятие толщ Северо-Западного Каратау [Паталаха, 1976].

В конце прошлого столетия на основании анализа, собранного авторами регионального детального геолого-структурного материала, а также результатов экспериментального моделирования условий образования складчатости, был предложен новый придвиговый механизм складкообразования БК [Гиоргобиани, 1999; Гиоргобиани, Закарая, 1999]. Он предполагает придвигание и прижимание ЧЗМ к выполненному мощными осадочными толщами морскому бассейну БК, вызывающие в его пределах процессы складкообразования. Расположенная к северу от последнего Скифская плита (СП) во время альпийской деформации оставалась относительно неподвижной и выполняла роль жесткого упора.

Складчатость на БК сформировалась в результате северо-восточного одностороннего тангенциального сжатия мезозойско-кайнозойских толщ, приложенного к региону вдоль субвертикальной поверхности глубинного Южного краевого разлома (ЮКР). Направленное с юго-запада на северо-восток перемещение относительно жесткого ЧЗМ в сторону БК вызывало действие придвигового механизма складкогенеза. В результате в регионе образовалась зональная складчатая структура, которая характеризуется последовательной сменой к северо-востоку интенсивной складчатости умеренной, а затем слабой, вызванной уменьшением деформации в этом направлении.

Таким образом, по очень важному вопросу механизма образования альпийской складчатой структуры БК пока еще нет единого мнения. В настоящее время одновременно сосуществуют два противоположных мобилистских механизма складкообразования в пределах БК. Первый – поддвиговый, не согласуется с морфологией складчатости региона и второй – придвиговый, подтверждается особенностями складчатой структуры БК, выясненными с помощью проведенных авторами геолого-структурных и экспериментальных исследований региона.

Поэтому дальнейшее изучение проблемы генезиса структуры БК является необходимым для достоверного выявления условий образования этой неоднородной

складчатой системы. Решение этого важного вопроса возможно только посредством проведения комплексного анализа материалов полевых наблюдений и экспериментальных исследований. Выяснение главных структурных особенностей складчатости БК позволит определить условия формирования ее сложной структуры. Действительность механизма образования складчатой структуры БК можно проверить с помощью экспериментального моделирования. Это дает возможность установить правильность мобилистского представления о генезисе складчатой структуры БК, полученного авторами на основании анализа полевых материалов. Изучение генезиса морфологических типов складчатости БК и его отдельных сегментов полевыми и экспериментальными методами проводилось авторами и ранее [Гиоргобиани, Закарая, 1989, 1999]. Оно показало, что при формировании альпийской главной складчатой структуры БК действие поддвигового механизма складкообразования не происходило.

Методы исследования

Для более достоверного выяснения возможности формирования складчатости подобной БК в обстановке проявления приведенных выше кинематически различных мобилистских механизмов авторами была проведена серия физических экспериментов на эквивалентных материалах. Перед началом моделирования были составлены необходимые для опытов структурные модели поддвиговых и придвиговых механизмов складкогенеза (рис. 1).

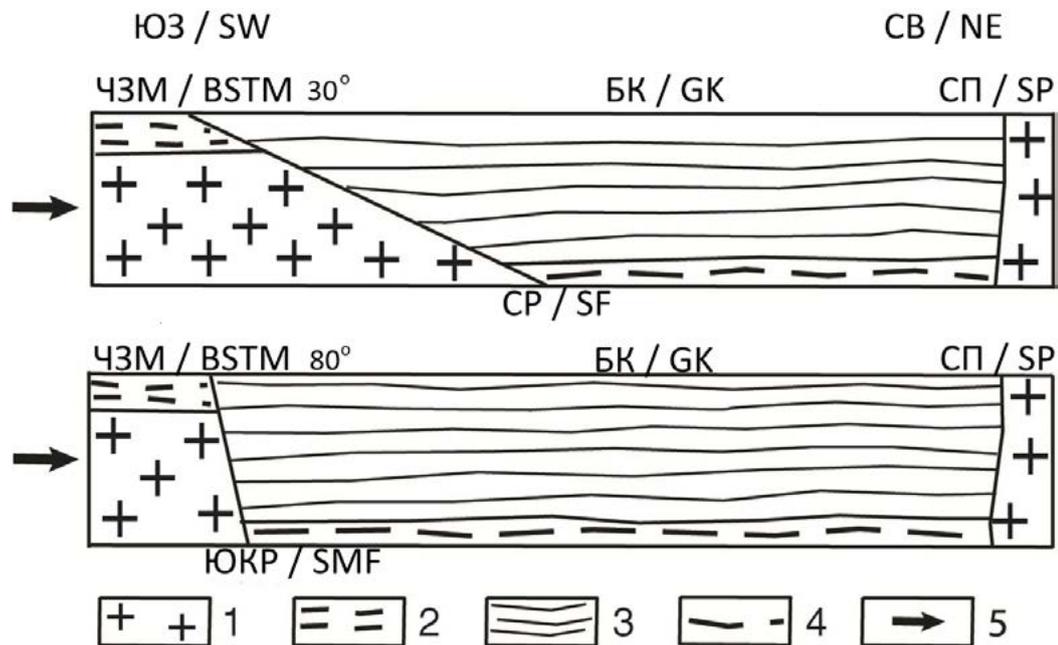


Рис. 1. Структурные модели экспериментов: I – поддвиговых и II – придвиговых механизмов деформации. ЧЗМ – Черноморско-Закавказский микроконтинент; БК – Большой Кавказ; СП – Скифская платформа; СР – сколовый разлом; ЮКР – Южный краевой разлом. 1 – жесткий массив; 2 – осадочный чехол; 3 – осадочные толщи; 4 – фундамент; 5 – направление горизонтального сжатия. /

Fig. 1. Structural models of experiments: I – underthrust and II – near-thrust mechanisms of deformation. BSTM – Black Sea-Transcaucasian microcontinent; GC – Greater Caucasus; SP – Scythian platform; SF – shear fracture; SMF – Southern marginal fault. 1 – hard block; 2 – sedimentary cover; 3 – sedimentary strata; 4 – foundation; 5 – direction of horizontal compression.

Модели, имитирующие альпийский чехол БК, состояли из толщ чередования слоев петролатума, между которыми просыпался порошок из каолина. Они были сложены из 7-11 чередующихся горизонтально лежащих, толщиной 2-2,5 мм слоев, длиной 21,0-28,0 см и шириной 7-8,5 см. Слоистая толща помещалась между двумя деревянными брусками, которые моделировали прилегающие к БК геоструктуры активного ЧЗМ и пассивной СП. В опытах первой серии, когда воспроизводился поддвиговый механизм складкогенеза, подвижный брусок имел клинообразную форму. Она достигалась срезанием его активного края под углами от 20° до 40° , что имитировало сколовые разломы (рис. 2-4). В опытах второй серии активные края брусков имели в значительной степени крутые ($60-80^\circ$) грани, что воспроизводило субвертикальные наклоны разрывных нарушений в процессе придвиговых движений (рис. 5-7).

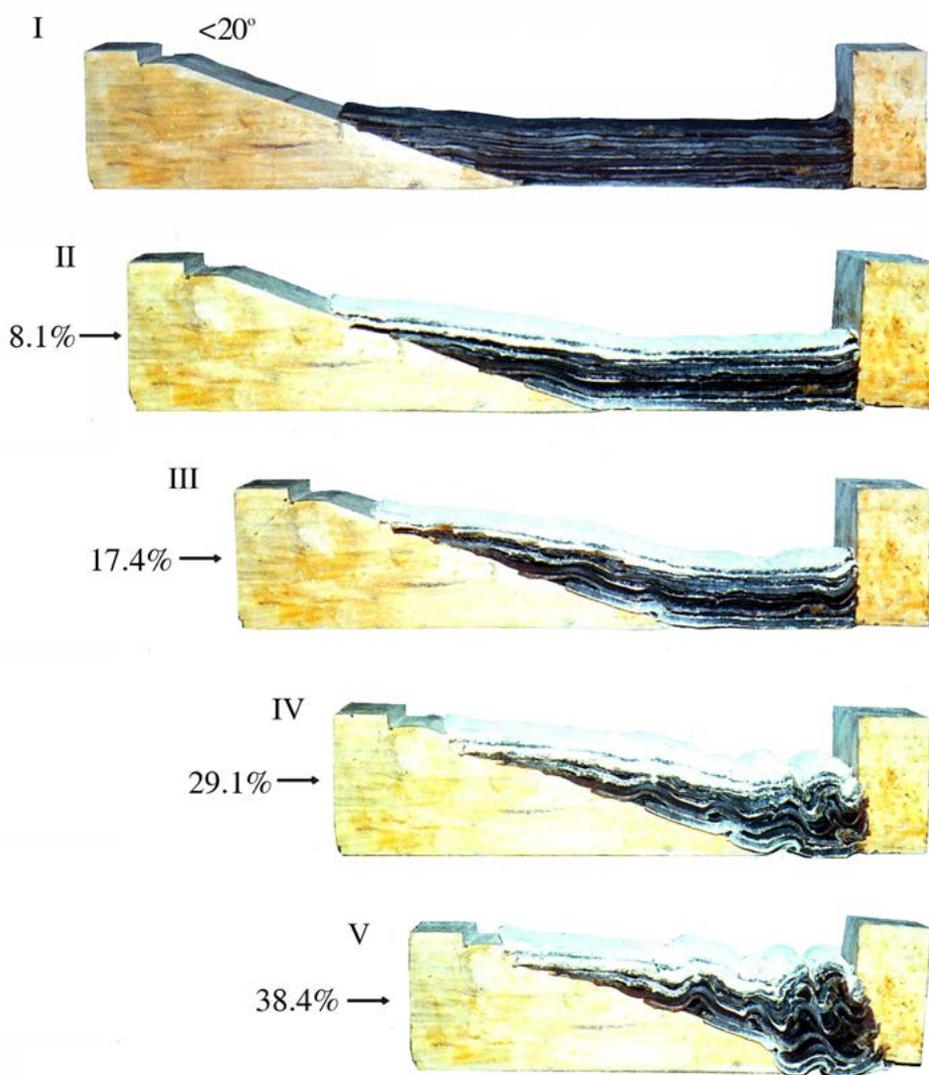


Рис. 2. Фотографии моделей опытов экспериментов поддвигового механизма деформации. Длина модели 27,5 см; $<20^\circ$ – угол наклона активной поверхности бруска; 10,0% – величина сжатия модели в процентах. /

Fig. 2. Images of experimental models of the underthrust deformation mechanism. Model length 27.5 cm; $<20^\circ$ – angle of inclination of the active surface of the bar; 10.0% – the compression amount of the model in percent.

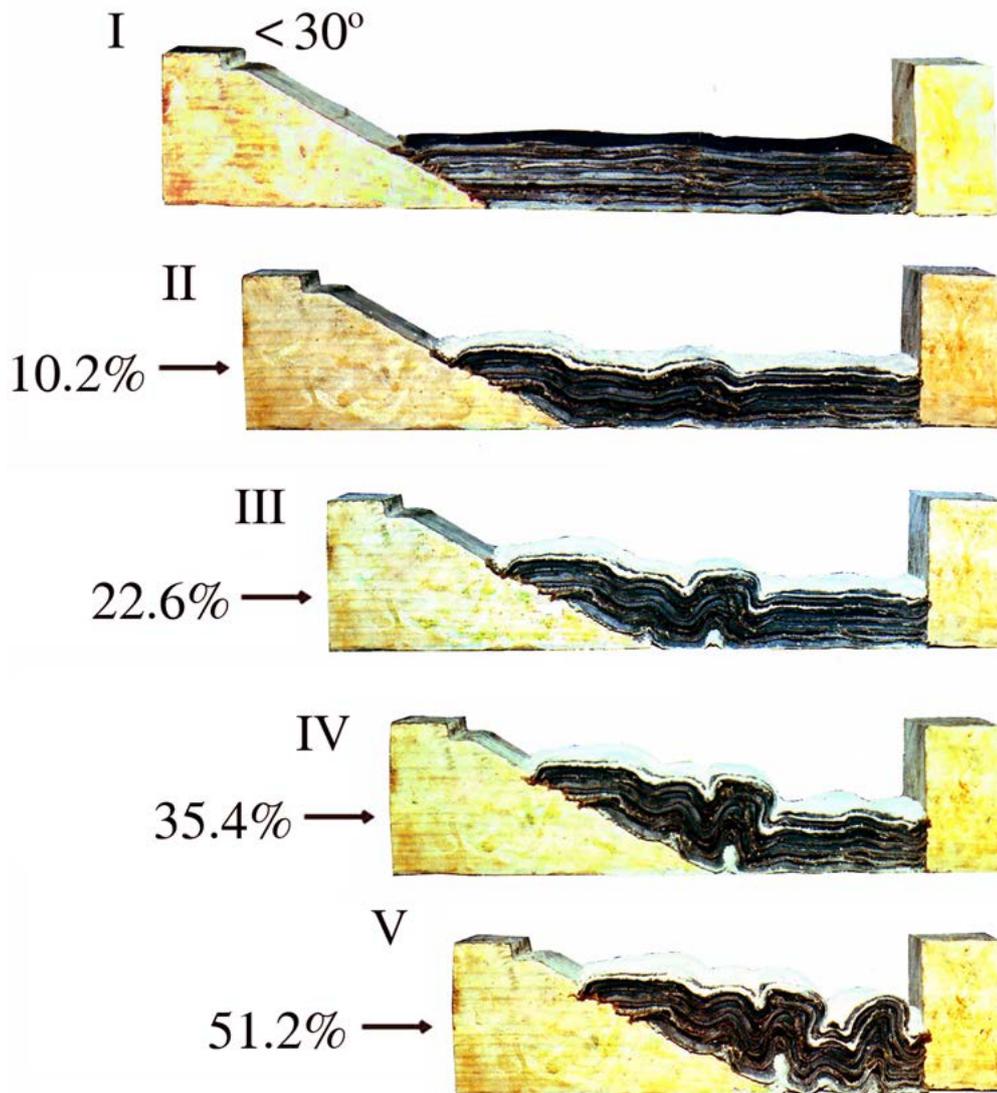


Рис. 3. Фотографии моделей опытов экспериментов поддвигового механизма деформации. Длина модели 28,0 см; $< 30^\circ$ – угол наклона активной поверхности бруска; 20,0% – величина сжатия модели в процентах. /

Fig. 3. Images of experimental model tests for underthrust deformation mechanism. Model length 28.0 cm; $< 30^\circ$ – angle of inclination of the active surface of the bar; 20.0% – the compression amount of the model in percent.

Исходные модели помещались в специальный прибор, позволяющий осуществить боковое тангенциальное одностороннее сжатие. В процессе испытаний слоистая толща подвергалась многократной последовательной деформации. Величины бокового сжатия для разных фаз и опытов были различными и колебались от 10% до 66,5% при поддвиговом и 15,0-57,5% при придвиговом механизмах дислокации.

Результаты экспериментов

В процессе экспериментального исследования поддвиговых и придвиговых механизмов деформации складчатости формировались разнообразные складчатые структуры.

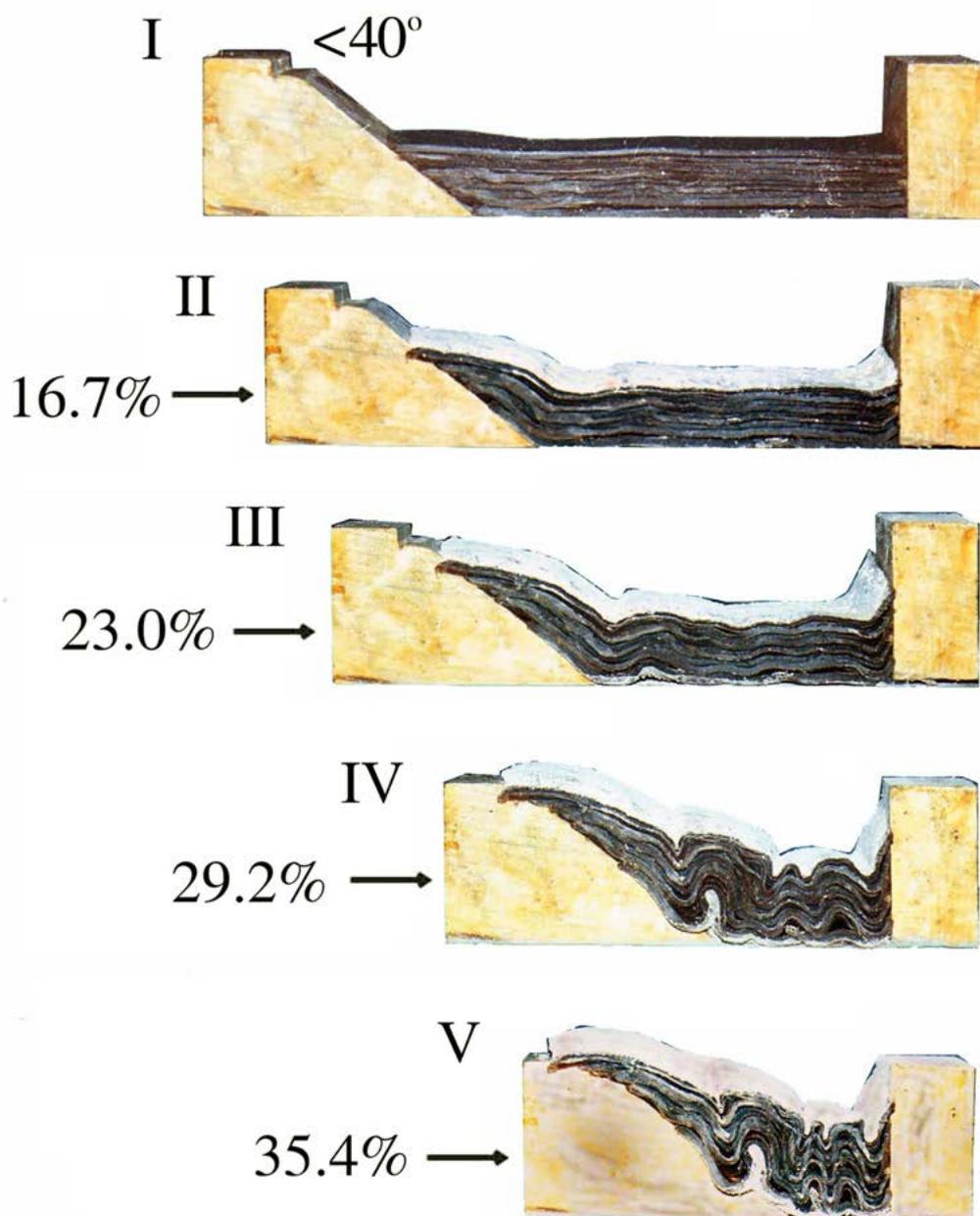


Рис. 4. Фотографии моделей опытов экспериментов поддвигового механизма деформации. Длина модели 24,0 см; $<40^\circ$ – угол наклона активной поверхности бруска; 20,0% – величина сжатия модели в процентах. /

Fig. 4. Images of experimental model tests for underthrust deformation mechanism. Model length 24.0 cm; $<40^\circ$ – angle of inclination of the active surface of the bar; 20.0% – the compression amount of the model in percent. /

Результаты моделирования поддвигового механизма складкообразования оказались неожиданными. При сжатии слоистой толщи непосредственно прилегающей к давящему штампу, в ней наблюдалось надвиговое смещение вдоль пологой (20° , 30° , 40°) поверхности сколового разлома почти недеформированных, иногда слабо изогнутых, залегающих параллельно дизъюнктиву недислоцированных слоев, амплитуда которых равнялась длине разрывного нарушения. За моноклинально наклоненной толщей возникла субвертикальная мелкая сильно сжатая складчатость,

которая распространилась в слоистой пачке до жесткого упора, имитирующего пассивную СП (рис. 2-4).

Следовательно, в зоне активного действия поддвиговых перемещений, в левой части модели, где отмечается косое сжатие слоистой толщи, обусловленное ориентированным ортогонально к сколовому разлому давлением, образование складчатости не произошло. Здесь наблюдаются только пассивные надвиговые (поддвиговые) ее перемещения вдоль поверхности разрывного нарушения. Правый отрезок пачки испытывал вдольслоевое сжатие с образованием сжатой крутоосной складчатости. Это свидетельствует о том, что в проведенных опытах слоистые модели одновременно испытывали косое и параллельное слоистости горизонтальное сжатие, что послужило причиной возникновения такой своеобразной складчатой структуры

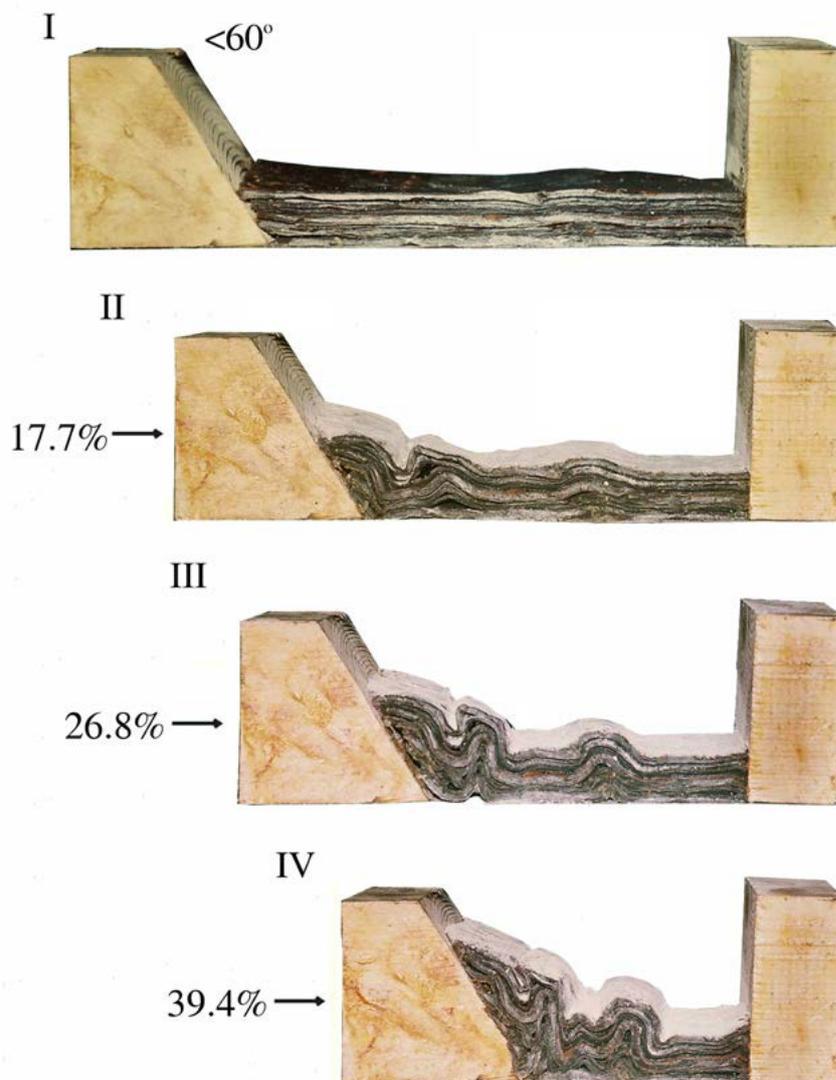


Рис. 5. Фотографии моделей опытов экспериментов придвигового механизма деформации. Длина модели 26,5 см; $<60^\circ$ – угол наклона активной поверхности бруска; 15,0% – величина сжатия модели в процентах. /

Fig. 5. Images of experimental model tests for near-thrust deformation mechanism. Model length 26.5 cm; $<60^\circ$ – angle of inclination of the active surface of the bar; 15.0% – the compression amount of the model in percent.

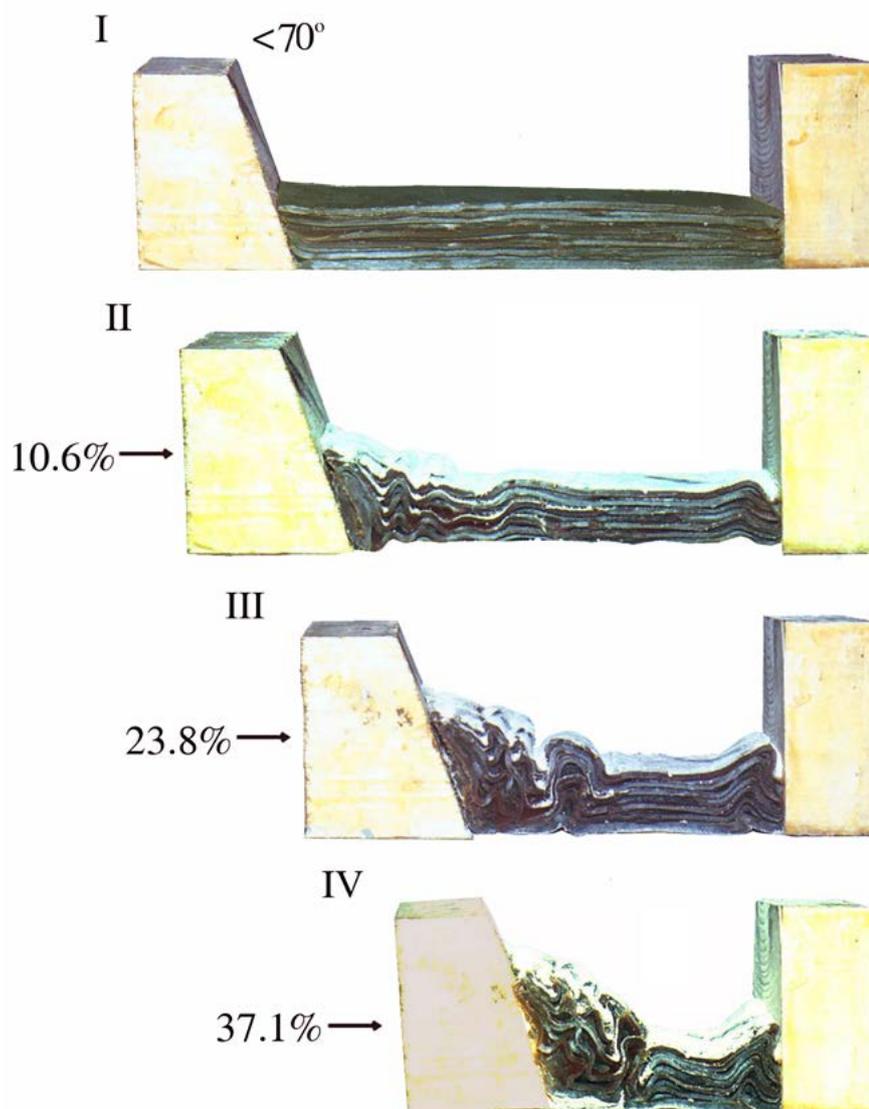


Рис. 6. Фотографии моделей опытов экспериментов придвигового механизма деформации. Длина модели 21,2 см; $<70^\circ$ – угол наклона активной поверхности бруска; 15,0% – величина сжатия модели в процентах. /

Fig. 6. Images of experimental model tests for near-thrust deformation mechanism. Model length 21.2 cm; $<70^\circ$ – angle of inclination of the active surface of the bar; 15.0% – the compression amount of the model in percent.

(рис. 8). Полученная экспериментальным моделированием морфология не характерна для региона, что противоречит гипотезе о поддвиговом механизме формирования главной складчатой структуры БК.

В опытах второй серии моделировалось придвигание и прижатие жесткого ЧЗМ к пластичному горизонтальному комплексу БК. Поверхностью приложения тангенциального давления служил прилегающий к слоистым толщам модели брусок ограниченный более крутыми ($60\text{--}80^\circ$) гранями имитирующий ЮКР. В процессе параллельной слоистости деформации модели в зоне прилегающего давящего блока возникла зональная субвертикальная, иногда крутонаклоненная тесно сжатая складчатость. Ее напряженность уменьшалась в сторону пассивного упора, где она переходила в моноклинальную, иногда слабо изгибающуюся структуру (рис. 5-7).

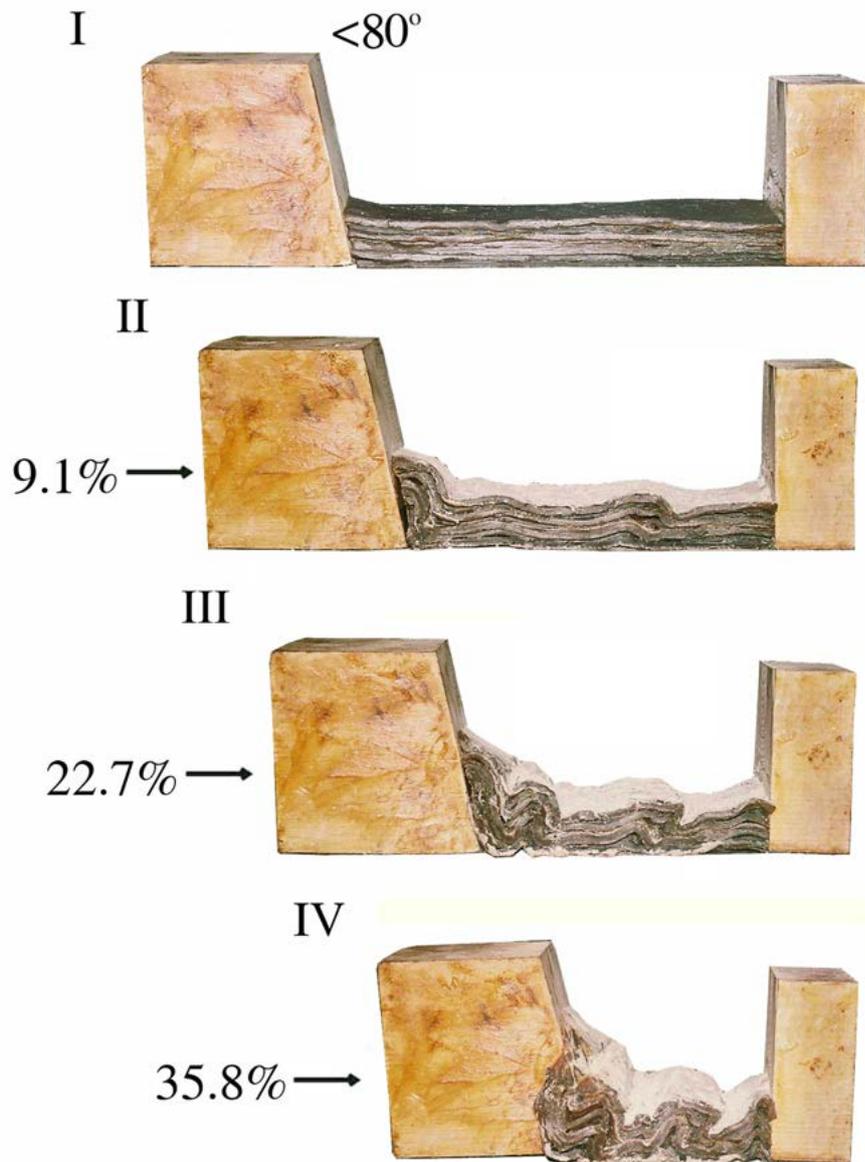


Рис. 7. Фотографии моделей опытов экспериментов придвигового механизма деформации. Длина модели 21,0 см; $<80^\circ$ – угол наклона активной поверхности бруска; 15,0% – величина сжатия модели в процентах. /

Fig. 7. Images of experimental model tests for near-thrust deformation mechanism. Model length 21.0 cm; $<80^\circ$ – angle of inclination of the active surface of the bar; 15.0% – the compression amount of the model in percent.

Аналогичная, в общем асимметричная, зональная складчатая структура развита в пределах БК, что подтверждает возможность образования основной складчатости региона вследствие придвигового механизма тектогенеза.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что формирование складчатой структуры подобной БК с помощью поддвигового механизма механически невозможно. Поэтому его следует заменить более аргументированным фактическим материалом и экспериментальными данными придвигового механизма складкообразования, который является ведущим процессом в формировании главной складчатой структуры региона.

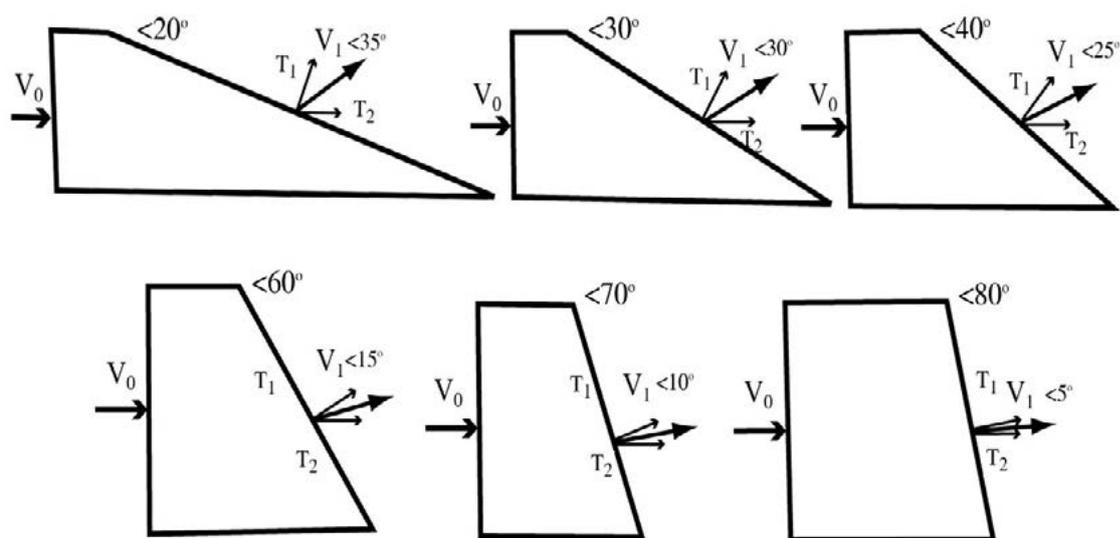


Рис. 8. Ориентировки векторов деформации в поддвиговых и придвиговых опытах экспериментов. V_0 – вектор сжатия модели; V_1 – вектор сжатия слоистой пачки и угол наклона; T_1 – ортогональное направление сжатия активной плоскости блока; T_2 – горизонтальное направление активной плоскости блока; $<20^\circ$ – угол наклона активной поверхности бруска. /

Fig. 8. Orientation of deformation vectors in underthrust and near-thrust experiments. V_0 is the compression vector of the model; V_1 is the vector of compression of the layered pack and the angle of inclination; T_1 – orthogonal direction of compression of the active plane of the block; T_2 – horizontal direction of the block active plane; $<20^\circ$ – inclination angle of the active surface of the bar.

Обсуждение результатов

Причиной формирования такой разнообразной складчатости в условиях проявления поддвигового и придвигового механизмов складкогенеза, является различная кинематика ЧЗМ. Такие дислокации обуславливают разнонаправленные тангенциальные сжатия слоистых моделей, возникающих в обстановке одинаковой деформации. В левой части модели при действии поддвигового механизма дислокации векторы сжатия были ориентированы косо по отношению к слоистости толщи.

Это было вызвано пологим наклоном сколового разлома, ортогонально от поверхности которого передавалось давление горизонтально залегающей пачке слоев. Такая деформация обусловила косо по отношению к слоистости сжатие толщи, в процессе которого образование складчатости не произошло. Здесь наблюдается только пассивные надвиговые (поддвиговые) ее перемещения вдоль поверхности разрывного нарушения. Правый от конца сколового разлома отрезок слоистой пачки испытывал вдольслоевое сжатие с образованием крутоосной складчатости.

Таким образом, в поддвиговых опытах модели одновременно испытывали косо и параллельное к слоистости горизонтальное сжатие. Это послужило причиной возникновения зональной складчатой структуры, интенсивность которой возрастает с удалением от места приложения усилия. Такая морфология складчатости не характерна для изученного региона, что противоречит гипотезе о поддвиговом механизме формирования главной складчатой структуры БК.

При моделировании придвигового механизма складкообразования БК к горизонтальной слоистой толще прижимался брусок, ограниченный крутыми гранями. В процессе параллельной слоистости деформации модели в зоне прилегающего да-

вящего блока возникла асимметричная зональная субвертикальная, иногда круто наклоненная, тесно сжатая складчатость. Ее напряженность уменьшалась в сторону пассивного упора, где она переходила в моноклиналичную, иногда слабо изгибающуюся структуру. Аналогичная, в общем асимметричная, складчатая структура развита в пределах БК, что подтверждает возможность образования основной складчатости региона вследствие придвигового механизма тектогенеза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов в общем подтвердили справедливость предсказаний авторов о возможном придвиговом механизме формирования складчатости БК, сделанных на основании региональных детальнейших геолого-структурных исследований региона.

Совершенно очевидно, что простейшими экспериментами невозможно в полной мере воспроизвести развитие альпийского природного складкообразовательного процесса, имеющего место в пределах БК. Несмотря на простоту и несовершенство экспериментального исследования, оно все-таки показало возможность образования складчатости в динамо-кинематической обстановке, возникшей при тангенциальном придвигании ЧЗМ вдоль ЮКР к морскому бассейну БК. Поскольку в природных условиях наблюдаются только конечные результаты складкообразования БК, данные эксперименты помогли воссоздать сложный процесс формирования его структуры.

На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что при изучении процессов генезиса тектонических структур необходимо совместное применение полевых, теоретических и экспериментальных методов исследования. Только их сочетание дает наиболее достоверные представления о механизмах образования складчатой структуры региона.

Литература

1. Адамия Ш. А. Тектоника и геологическая история Абхазии. // Тр. ГИН АН ГССР. Нов. сер. – 1977 – Вып. 54. – 68 с.
2. Адамия Ш. А. Механизм и геодинамика формирования альпийских складчатых поясов Кавказа. // Проблемы движений и структурообразования в коре и верхней мантии. – М.: Наука, 1985 – С. 98-111.
3. Адамия Ш. А., Кипиани Я. Р., Чичуа Г. К. Проблема происхождения складчатости Большого Кавказа. // Геология и полезные ископаемые Большого Кавказа. – М.: Наука, 1987. – С. 40-47.
4. Гамкрелидзе И. П. Механизм формирования тектонических структур и некоторые общие проблемы тектогенеза. // Тр. ГИН АН ГССР. Нов. Сер. Вып. 52. – Тб.: Мецниереба, 1976. – 225 с.
5. Гамкрелидзе И. П. Тектоническое строение и альпийская геодинамика Кавказа // Тектоника и металлогения Кавказа. // Тр. ГИН АН ГССР. Нов. сер. Вып. 86. – Тб.: Мецниереба, 1984. – С. 105-184.
6. Гамкрелидзе П. Д., Гамкрелидзе И. П. Описание маршрутов экскурсии Жинвали-Павлеури. // Путеводитель экскурсий Советско-Индийского симпозиума. – Тб.: Мецниереба, 1975 – С. 21-22.
7. Гамкрелидзе П. Д., Гамкрелидзе И. П. Тектонические покровы Южного склона Большого Кавказа. // Тр. ГИН АН ГССР. Нов. сер. Вып. 57. – Тб.: Мецниереба, 1977. – С. 83.
8. Гамкрелидзе И. П., Гиоргобиани Т. В. Проблемы альпийской деформации Большого Кавказа и смежных с ним областей. // В сб.: Геология и полезные ископаемые Большого Кавказа. – М.: Наука, 1987. – С. 35-40.

9. Гаркаленко И. А. О горизонтальных движениях блоков земной коры на территории европейской части СССР и акваторий Черного и Азовского морей. // Геодинамика и полезные ископаемые. – М.: Наука, 1976. – 70 с.
10. Гиоргобиани Т. В. Позднекайнозойская геодинамика Большого Кавказа. // Тектоника, геодинамика и процессы метаморфизма. Т. 1. – М.: ГЕОС, 1999. – С. 174-178.
11. Гиоргобиани Т. В. Альпийская коллизионная геодинамика Большого Кавказа и прилегающего Закавказья. // Материалы 38-го тектонического совещания. Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 143-146.
12. Гиоргобиани Т. В. Пододвигался ли Черноморско-Закавказский микроконтинент под Большой Кавказ? // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI тектонического совещания. Том 1. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 188-194.
13. Гиоргобиани Т. В., Закарая Д. П. Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. – Тб.: Мецниереба, 1989. – 60 с.
14. Гиоргобиани Т. В., Закарая Д. П. Экспериментальное изучение механизма формирования складчатой структуры Северо-Западного Кавказа. // Труды, посвященные к юбилею 90-летия Г. М. Заридзе. – Тб.: Интеллект, 1999. – С. 229-256.
15. Гончаров М. А. Механизм геосинклинального складкообразования. – М.: Недра, 1988. – 264 с.
16. Гончаров М. А. Компенсационная многоярусная и иерархическая геодинамика; сочетание фиксизма и мобилизма. // Бюлл. МОИП. Отд. геол. – 1997 – Т. 72. Вып. 6. – С. 13-21.
17. Козлов А. Л. Черноморское побережье в районе Сочи и низовья р. Мзымты. Экскурсия по Кавказу. Черноморское побережье. // ОНТИ НКТП СССР. – 1937. – С. 26-44.
18. Милановский Е. Е., Хаин В. Е. Геологическое строение Кавказа. // Очерки региональной геологии СССР. – М.: МГУ, 1963. – 357 с.
19. Паталаха В. Е. Явление придвига в разломной тектонике. // ДАН СССР. – 1976. – Т. 228. № 5. – С. 1175-1178.
20. Рогожин Е. А., Шолпо В. Н. Неоднородность зоны полной складчатости Большого Кавказа. // Геотектоника. – 1988. – № 5. – С. 79-93.
21. Ушаков С. А., Галушкин Ю. И., Иванов О. П., Ковалев А. А., Корякин Ю. В., Оленин В. В. Геодинамический анализ взаимосвязи нео-палеотектонических структур Альпийско-Гималайского пояса (на примере Крыма, Кавказа и Копетдага). // Геодинамика и полезные ископаемые. – М.: Наука, 1976. – С. 37-41.
22. Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. – М.: Недра, 1984. – С. 143-188.
23. Шемпелев А. Г. О глубинном выражении Главного Кавказского надвига. // Геотектоника. – 1978. – № 8. – С. 57-65.
24. Шолпо В. Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. – М.: Недра, 1978. – 176 с.
25. Шолпо В. Н., Рогожин Е. А., Гончаров М. А. Складчатость Большого Кавказа. – М.: Наука, 1993. – 192 с.
26. Яковлев Ф. Л. Исследования кинематики линейной складчатости (На примере Юго-Восточного Кавказа). // Геотектоника. – 1987. – № 4. – С. 31-48.
27. Яковлев Ф. Л. Исследования процессов и механизма развития пликативных деформации в Земной коре (Обзор существующих методических подходов). // Тектонифизика сегодня. – М.: Изд. ОИФЗ РАН, 2002. – С. 311-332.
28. Adamia S. A. Plate tectonic and evolution of the Alpine system. Discussion. // *Bul. Geol. Soc. America.* – 1975. – Vol. 86. – pp. 15-17.
29. Adamia S. A., Lortkipanidze M. B., Zakariadze G. S. Evolution of an active continental margin exemplified by the Alpine history of the Caucasus. // *Tectonophysics.* – 1977. – Vol. 40. No. 3-4. – pp. 183-199.
30. Adamia S. A., Chkhotua T. G., Gavatdze T. T., Lebanidze Z. A., Lursmanashvili N. D., Sadradze N. G., Zakaraia D. P., Zakariadze G. S. Tectonic setting of Georgia-Eastern Black Sea: a review. // *The Geological Society of London.* – 2017. – pp. 11-40.
31. Gamkrelidze I. P. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time. // *Tectonophysics.* – 1986. – No. 127. – pp. 261-277.

32. Gamkrelidze I. P., Giorgobiani T. V. Kinematics of the Alpine deformation of the Caucasus and adjacent areas. *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. – Rotterdam. – 1990. – pp. 183-186.
33. Giorgobiani T. V. Origin of Horst-anticlinorium of the Main Range, the Eastern Caucasus. // *Doklady Earth Sciences*. – 2003. – Vol. 388. No. 1. – pp. 16-20.
34. Giorgobiani T., Zakaraia D. Listric Faults Structure in Folded-faulted Regions. // XVIIIth Congress of Carpathian-Balkan Geological Association. September 3-6. – Belgrade. – 2006. – pp. 178-181.
35. Giorgobiani T., Zakaraia D. Intersecting Folding of Some Tectonic Zones of the Greater Caucasus. // *The Problems of Geology of the Caucasus. International Science Conference. Proceedings*. 25-27 November 2010. – Tbilisi. – 2010. – Vol. 1. – pp. 39-41.
36. Giorgobiani T., Zakaraia D. The Newest and Modern Tectonics of the Greater Caucasus and of the Adjacent Transcaucasus. // 1st International Conference and Workshop. *Caucasus Active Tectonics and Magmatism. Hazards and Resources*. 29 August-3 September. – Tbilisi. – 2013 – pp. 17-18.

References

1. Adamia Sh.A. Tectonics and geological history of Abkhazia. In: *Proceedings GIN AN GSSR*. Nov. ser. 1977, Issue 54. 68 p. (In Russ.)
2. Adamia Sh.A. Mechanism and geodynamics of the formation of the Alpine fold belts in the Caucasus. *Problems of movements and structure formation in the crust and upper mantle*. Moscow. Nauka, 1985. pp. 98-111. (In Russ.)
3. Adamia Sh.A., Kipiani Ya.R., Chichua G.K. The problem of the folding origin in the Greater Caucasus. *Geology and minerals of the Greater Caucasus*. Moscow. Nauka, 1987. pp. 40-47. (In Russ.)
4. Gamkrelidze I.P. The formation mechanism of tectonic structures and some general problems of tectogenesis. In: *Proceedings GIN AN GSSR*. Nov. ser. Issue 52. Tbilisi. Metsniereba, 1976. 225 p. (In Russ.)
5. Gamkrelidze I.P. Tectonic structure and alpine geodynamics of the Caucasus. *Tectonics and metallogeny of the Caucasus*. In: *Proceedings GIN AN GSSR*. Nov. ser. Issue 86. Tbilisi. Metsniereba, 1984. pp. 105-184. (In Russ.)
6. Gamkrelidze P.D., Gamkrelidze I.P. Description of excursion routes Zhinvali-Pavleuri. *Guide for excursions of the Soviet-Indian Symposium*. Tbilisi. Metsniereba, 1975. pp. 21-22. (In Russ.)
7. Gamkrelidze P.D., Gamkrelidze I.P. Tectonic covers of the southern slope of the Greater Caucasus. In: *Proceedings GIN AN GSSR*. Nov. ser. Issue 57. Tbilisi. Metsniereba, 1977. p. 83. (In Russ.)
8. Gamkrelidze I. P., Giorgobiani T. V. Problems of alpine deformation of the Greater Caucasus and related areas. In the book: *Geology and Minerals of the Greater Caucasus*. M. Nauka, 1987. pp. 35-40. (in Russ.)
9. Garkalenko I.A. On the horizontal movements of the crustal blocks in the European part of the USSR and the waters of the Black and Azov seas. *Geodynamics and Mineral Resources*. Moscow. Nauka, 1976. 70 p. (In Russ.)
10. Giorgobiani T.V. Late Cenozoic geodynamics of the Greater Caucasus. *Tectonics, geodynamics and processes of magmatism and metamorphism*. Vol. 1. M. GEOS, 1999. pp. 174-178. (in Russ.)
11. Giorgobiani T.V. Alpine collision geodynamics of the Greater Caucasus and adjacent Transcaucasia. *Tectonics of the Earth's crust and mantle. Tectonic patterns of the location of minerals*. Vol. 1. M. GEOS, 2005. pp. 143-146. (in Russ.)
12. Giorgobiani T.V. Did the Black Sea-Transcaucasian microcontinent move under the Greater Caucasus? *General and regional problems of tectonics and geodynamics*. In: *Proceedings of the XLI tectonic meeting*. Vol. 1. Moscow. GEOS, 2008. pp. 188-194. (In Russ.)
13. Giorgobiani T. V. Zakaraya D.P. The folded structure of the Northwest Caucasus and the mechanism of its formation. Tbilisi: Metsniereba, 1989. 60 p. (in Russ.)

14. Giorgobiani T. V., Zakaraya D. P. Experimental study of the formation mechanism of the folded structure of the North-West Caucasus. In: Proceedings dedicated to the 90th anniversary of G. M. Zaridze. Tbilisi. Intellect, 1999. pp. 229-256. (In Russ.)
15. Goncharov M. A. The mechanism of geosynclinal folding. Moscow. Nedra, 1988. 264 p. (In Russ.)
16. Goncharov M. A. Compensatory multi-tiered and hierarchical geodynamics; a combination of fixism and mobilism. In: Bull. MOIP. Dept. geol. 1997. Vol. 72. Issue. 6. pp. 13-21. (In Russ.)
17. Kozlov A. L. The Black Sea coast in the region of Sochi and the lower part of river. Mzymty. Excursion into Caucasus. Black Sea coast. ONTI NKTP USSR. 1937. pp. 26-44. (in Russ.)
18. Milanovskii E. E., Khain V. E. Geological structure of the Caucasus. M.: Publishing House of Moscow State University, 1963. 357 p. (in Russ.)
19. Patalakha V. E. Near-thrust phenomenon in fault tectonics. DAN USSR. 1976. Vol. 228. No. 5. pp. 1175-1178. (In Russ.)
20. Rogozhin E. A. Sholpo V. N. Heterogeneity of the complete folding zone of the Greater Caucasus. Geotektonika. 1988. No. 5. pp. 79-93. (in Russ.)
21. Ushakov S. A., Galushkin Yu. I., Ivanov O. P., Kovalev A. A., Koryakin Yu. V., Olenin V. V. Geodynamic analysis of the relationship of neo-paleotectonic structures of the Alpine-Himalayan belt (on the example of the Crimea, the Caucasus and Kopetdag). Geodynamics and Mineral Resources. Moscow. Nauka, 1976. pp. 37-41. (In Russ.)
22. Khain V. E. Regional geotectonics. Alpine Mediterranean belt. Moscow. Nedra, 1984. pp. 143-188. (In Russ.)
23. Shempelev A. G. About the deep expression of the Main Caucasian thrust. Geotectonics. 1978. No. 8. pp. 57-65. (In Russ.)
24. Sholpo V. N. Alpine geodynamics of the Greater Caucasus. M. Nedra, 1978. 176 p. (in Russ.)
25. Sholpo V. N., Rogozhin E. A., Goncharov M. A. The folding of the Greater Caucasus. Moscow. Nauka, 1993. 192 p. (in Russ.)
26. Yakovlev F. L. Studies of the kinematics of linear folding (On the example of the South-Eastern Caucasus). Geotectonics. 1987. No. 4. pp. 31-48. (In Russ.)
27. Yakovlev F. L. Research of processes and development mechanism of plicative deformation in the Earth's crust (Review of existing methodological approaches). Tectonophysics today. Moscow. Ed. UIPE RAS, 2002. pp. 311-332. (In Russ.)
28. Adamia S. A. Plate tectonic and evolution of the Alpine system. Discussion. Bul. Geol. Soc. America. 1975. Vol. 86. pp. 15-17.
29. Adamia S. A., Lortkipanidze M. B., Zakariadze G. S. Evolution of an active continental margin exemplified by the Alpine history of the Caucasus. Tectonophysics. 1977. Vol. 40. No. 3-4. – pp. 183-199.
30. Adamia S. A., Chkhotua T. G., Gavtadze T. T., Lebanidze Z. A., Lursmanashvili N. D., Sadradze N. G., Zakaraia D. P., Zakariadze G. S. Tectonic setting of Georgia-Eastern Black Sea: a review. The Geological Society of London. 2017. pp. 11-40.
31. Gamkrelidze I. P. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time. Tectonophysics. 1986. No. 127. pp. 261-277.
32. Gamkrelidze I. P., Giorgobiani T. V. Kinematics of the Alpine deformation of the Caucasus and adjacent areas. Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Rotterdam. 1990. pp. 183-186.
33. Giorgobiani T. V. Origin of horst-anticlinorium of the main range, the Eastern Caucasus. Reports Earth Sciences. 2003. Vol. 388. No. 1. pp. 16-20.
34. Giorgobiani T., Zakaraia D. Listric Faults Structure in Folded-faulted Regions. XVIIIth Congress of Carpathian-Balkan Geological Association. Belgrade. September 3-6. 2006. pp. 178-181.
35. Giorgobiani T., Zakaraia D. Intersecting Folding of Some Tectonic Zones of the Greater Caucasus. The problems of Geology of the Caucasus. International Science Conference. Proceedings. 25-27 November 2010. Vol. 1. Tbilisi. 2010. pp. 39-41.
36. Giorgobiani T., Zakaraia D. The Newest and Modern Tectonics of the Grater Caucasus and of the Adjacent Transcaucasus. 1st International Conference and Workshop. Caucasus Active Tectonics and Magmatism. Hazards and Resources. 29 August-3 September. Tbilisi. 2013. pp. 17-18.

УДК 031.1 (479.24)

DOI:

Оригинальная статья

Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений и GPS-станций

С. Э. Казымова , И. Э. Казымов 

Национальная Академия Наук Азербайджана, Республиканский Центр
Сейсмологической Службы, Республика Азербайджан, 1001, Баку, ул. Гусейн Джавида,
123, e-mail: sabina.k@mail.ru

Статья поступила: 14.07.2020, доработана: 05.08.2020, одобрена в печать: 07.08.2020

Резюме: Актуальность работы. В статье представлено описание тектонического строения исследуемого региона, а также проанализирована геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений. **Целью работы** являлось определить *скорости современных* горизонтальных смещений отдельных тектонических блоков Талышского региона и проанализировать влияние их на сильные землетрясения, произошедшие за 2016 и 2019 гг. **Методы исследования.** На основе метода полярности первых вступлений продольных волн были проанализированы механизмы очагов землетрясений. Анализ показал, что в исследуемом регионе в основном преобладает тип подвижки – взброс и сдвиг. Углы падения для подвижек разных типов превышают 45° , что свидетельствует о достаточно крутом погружении зон разломов. Это согласуется с тем, что в исследуемой зоне большинство поперечных разломов имеет углы падения сместителей $50-90^\circ$, то есть углы, достаточно близкие к вертикали. Основное влияние на сейсмическую активность оказывают Талышский, Предталышский, Ярдymoинский и Астаринские разломы. **Результаты исследования.** На основе полученных результатов была построена схематическая карта ориентации осей сжатия и растяжений исследуемых сильных землетрясений. На основе катакластического анализа механизмов очагов землетрясений с $m_l > 3.0$. Установлено, что большая часть исследуемой территории подвержена сжатию, сдвиги отмечены в районе Лерика и Ярдымлы. Для Талышского региона установлены три основных типа подвижек: взбросы (36%), сдвиги (34%) и сбросы (30%). Анализ скоростей горизонтальных движений по данным GPS-наблюдений показал движение поверхности земной коры в С-СВ направлении относительно Евразии. Отмечено уменьшение скорости в пунктах наблюдений PQLG, XNGG, ZKTG, ATGG, IMLG и GBLG, расположенных перпендикулярно к Главному Кавказкому Надвику. Пункты GPS-наблюдений, расположенные вдоль ГКН, показывают уменьшение скорости в западном направлении. С-СВ движение земной поверхности интерпретируется как одна из причин накопления напряжений на этом надвиге.

Ключевые слова: механизмы очагов землетрясений, горизонтальные движения плит, геодинамика, GPS-станции.

Для цитирования: Казымова С. Э., Казымов И. Э. Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений и GPS-станций. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 40 – 56. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

GEOPHYSICS

DOI:

Original paper

Geodynamics of the Talish region according to earthquake source mechanisms and GPS-stations

S. E. Kazimova , I. E. Kazimov 

National Academy of Sciences of Azerbaijan Republican Seismic Survey Center, 123 Guseyn Javid Str., Baku 1001, Azerbaijan, e-mail: sabina.k@mail.ru

Received: 14.07.2020, revised: 05.08.2020, accepted: 07.08.2020

Abstract: Relevance. In addition, the article provides a description of the tectonic structure of the region under study, and also analyzes the geodynamics of the Talish region using data from the mechanisms of earthquake sources. **Aim** of the work was to determine the velocities of modern horizontal displacements of individual tectonic blocks of the Talish region and to analyze their influence on strong earthquakes that occurred in 2016 and 2019yy. **Methods.** Based on the method of polarity of the first arrivals of longitudinal waves, the mechanisms of earthquake sources were analyzed. The analysis showed that in the studied region the type of movement predominates – reverse faults and strike-slips. The angles of incidence for motions of various types exceed 45°, which indicates a rather steep immersion of fault zones. This is consistent with the fact that in the studied zone the majority of transverse faults have angles of incidence of 50-90°, that is, angles quite close to the vertical. The main influence on seismic activity is exerted by the Talish, Predtalish, Yardimli and Astara faults. **Results.** Based on the results obtained, a schematic map of the orientation of the compression and extension axes of the studied strong earthquakes was constructed. On the basis of a cataclastic analysis of the mechanisms of earthquake sources with $m_l > 3.0$, it was established that most of the study area is subject to compression, strike-slip faults were noted in the Lerik and Yardimla regions. For the Talish region, three main types of shifts are established: reverse faults (36%), strike-slips (34%) and normal faults (30%). An analysis of horizontal velocities according to GPS observations showed the movement of the surface of the earth's crust in the north-west direction relative to Eurasia. A decrease in speed was noted at the observation points PQLG, XNGG, ZKTG, ATGG, IMLG and GBLG located perpendicular to the Main Caucasian Thrust. GPS observation points located along the Main Caucasian Thrust show a decrease in speed in a westerly direction. C-NE motion of the earth's surface is interpreted as one of the reasons for the accumulation of stresses on this thrust.

Keywords: earthquake source mechanisms, horizontal plate movements, geodynamics, GPS stations.

For citation: Kazimova S. E., Kazimov I. E. Geodynamics of the Talish region according to earthquake source mechanisms and GPS-stations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (3): 40 – 56. DOI: xx. xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

Введение

Данные, полученные по GPS-станциям, на сегодняшний день достигли достаточно хороших показателей точности и являются твердой опорой для современных крупномасштабных геодинамических исследований. Разработанная технология точных GPS-измерений способна фиксировать скорости движений, начинающиеся от первых миллиметров в год, и даже за относительно короткий период времени в несколько лет собрать данные о скоростях и направлениях движения точек на поверхности земли с достаточно малой погрешностью. Таким образом, данные кос-

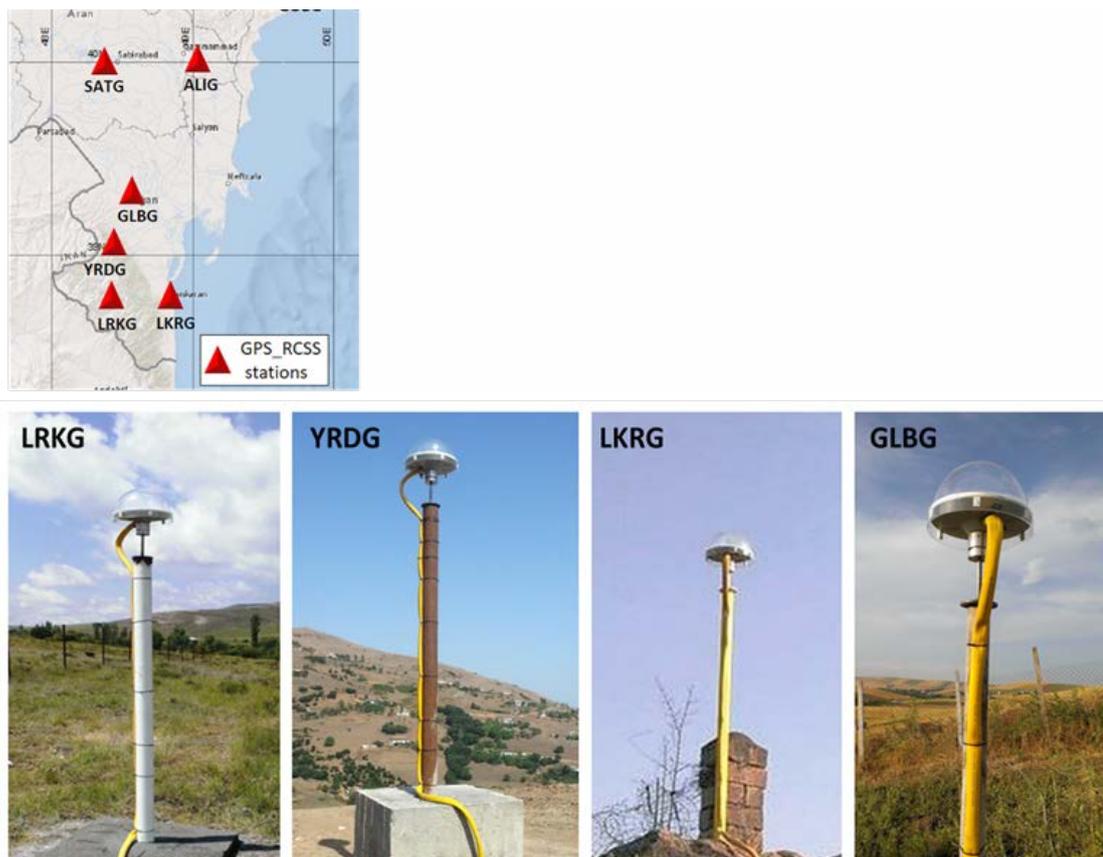


Рис. 1. GPS-станции Trimble NetR9 и GNSS антенна Zephyr Geodetic Model, расположенные на территории Талышского региона. / Fig. 1. GPS-stations Trimble NetR9 and GNSS antenna Zephyr Geodetic Model located in the Talysh region.

мической геодезии можно считать наиболее достоверными для исследования блоковой динамики.

В настоящее время по всему миру действует уже достаточно большое количество сетей GPS-измерений, и масштабы использования данной технологии, как хорошо себя зарекомендовавшей, будут с течением времени увеличиваться. В настоящее время на территории Азербайджана функционируют 24 GPS-станции геодезического класса фирмы «Trimble» (США). С целью исследования региона были использованы данные 4-х базовых GPS-станций, расположенных на территории Талышского региона (рис. 1, табл. 1).

Цель работы

Целью наших исследований являлось рассчитать скорости современных горизонтальных смещений отдельных тектонических блоков Талышского региона и проанализировать механизмы очагов землетрясений, произошедших за 2016 и 2019 гг.

Тектоника

Данный район имеет сложное геологическое строение и хорошо подходит для попытки выделения и изучения кинематики однородных блоков. Талышская складчатая мегазона располагается на северном борту Малокавказско-Эльбурской

Таблица 1. / Table 1.

**Основные параметры GPS-станции расположенные на территории
Талышского региона. / The main parameters of the GPS-station
located in the Talysch region.**

N	Место / Place	GPS- стан- ции / GPS- station	Широта (DMS) / Latitude (DMS)			Долгота (DMS) / Longitude (DMS)			Эллипсои- дальный / Ellipsoidal	Получено / Derived Above
									Высота (м) / Height (m)	Высота геои- да (м) / Geoid Height (m)
1	Джалилабад / Jalilabad	GLBG	39	14	32.97715	48	23	35.70606	132.644	127.658
2	Ленкорань / Lankaran	LKRG	38	42	35.38228	48	46	44.50897	41.85	37.568
3	Лерик / Lerik	LRKG	38	38	35.30915	48	20	26.41819	1583.49	1572.143
4	Ярдымлы / Yardimli	YRDG	38	54	53.46976	48	14	31.74117	908.915	898.921

складчатой системы, отделяясь от структур Малого Кавказа поперечным Нижне-Аразским прогибом. В пределах Азербайджанской Республики мегазона представлена своим северо-восточным крылом, а юго-западная часть входит в состав Гарадагской зоны Северного Ирана, где вулканогенно-осадочные образования палеогена перекрываются мио-плиоценовыми вулканогенными комплексами Саваланского вулкана [Хаин и др., 2005].

В тектоническом отношении Талышский хребет представляет крупный антиклинорий первого порядка, состоящий из Астаринской, Лерик-Ярдымлинской, Буроварской, Джалилабадской и Южно-Муганской складок. Названные крупные структурные единицы имеют в свою очередь сложное блоковое строение, обусловленное развитием системы разноориентированных разрывных дислокаций. Талышской складчатой области свойственны системы субпараллельных разломов глубокого заложения между отдельными продольными блоками общекавказского простираения. Поперечные разломы ориентированы вкрест простираения основных структурных элементов Талыша и предопределяют в сочетании с продольными разломами их блоково-глыбовое строение (рис. 2) [Хаин и др., 2005].

Территория Азербайджана располагается в зоне активного столкновения (коллизии) двух плит, Аравийской и Евразийской. Реконструкция тектоники плит указывает на то, что коллизия Аравийской плиты с Евразийской продолжается 10-30 млн лет, вплоть до современного этапа. Одним из важнейших следствий столкновения Аравийской плиты с расколотой на микроплиты южной окраиной Евразии явилось мощное проявление наземного вулканизма, создавшего лавовые поля щелочных базальтоидов и крупные стратовулканы известково-щелочной магмы не только в восточной Анатолии, но и в центральной и южной частях Малого Кавказа в южной Грузии, Армении, юго-западном Азербайджане, а также Иранском Азербайджане. Вулканы эти возвышаются над лавовыми плоскогорьями, лежащими на уровне

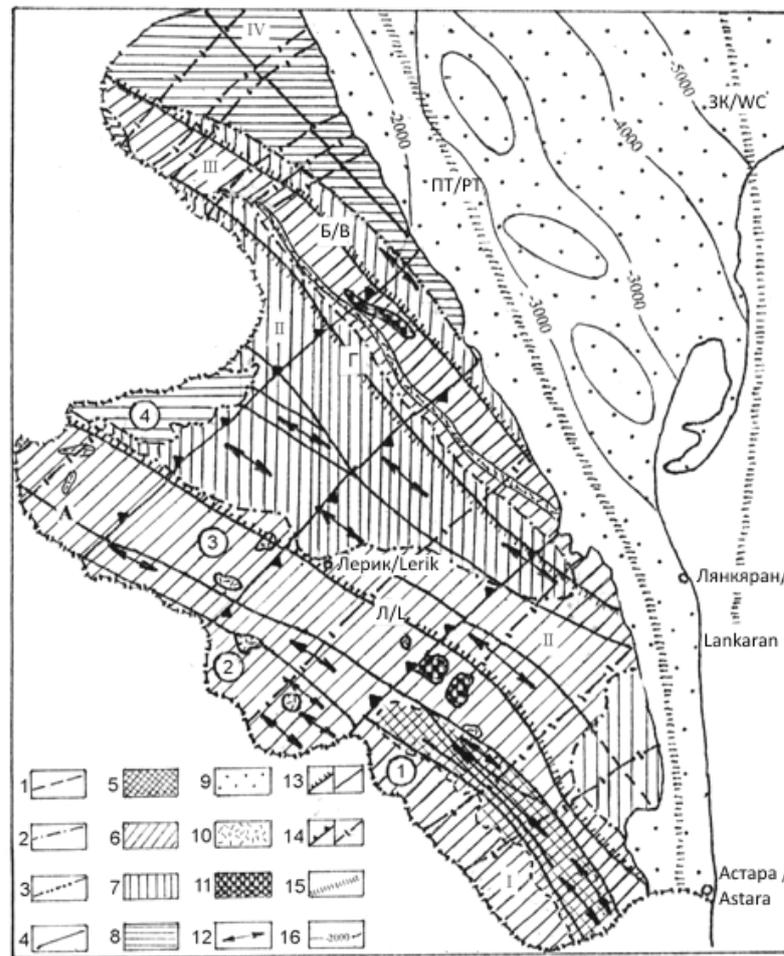


Рис. 2. Тектоническая схема Талыша. (Составил А. Д. Исмаил-заде) [Хаин и др., 2005].

1-4 – границы структурных этажей по подошве: 1 – эоцена; 2 – раннего олигоцена; 3 – среднего миоцена; 4 – квартера; 5-9 – формации и субформации: 5 – осадочно-туфогенная верхнего мела-палеоцена; 6 – вулканогенная (щелочная базальтоидная) эоцена; 7 – морская молассовая олигоцена-раннего миоцена; 8 – лагунно-морская среднего миоцена; 9 – континентально-морская четвертая; 10 – субвулканические тела; 11 – щелочные ультраосновные интрузивы; 12 – антиклинальные складки; 13-15 – разрывные нарушения: 13 – продольные разломы (надвиги, взбросы) первого (а) и второго (б) порядков (в т. ч. А – Астаринский, Л – Лярикский, Г – Гафтонинский, Б – Буроварский); 14 – поперечные разломы первого (а) и второго (б) порядков; 15 – глубинные разломы по геофизическим данным (ПТ – Предталышский, ЗК – Западно-Каспийский); 16 – изолинии по поверхности верхнего мела. Структурные зоны: I – Астаринская; II – Лярик-Ярдымлинская; III – Буроварская; IV – Джалилабадская; V – Муганская. Поперечные блоки (цифры в кружках): 1 – Гамаратский (горст); 2 – Космальянский (грабен); 3 – Масаллинский (горст); 4 – Дыманский (грабен). /

Fig. 2. Tectonic scheme of Talysh. (Compiled by A. D. Ismail-zade) [Khain et al., 2005]. 1-4 – boundaries of structural floors along the base: 1 – Eocene; 2 – Early Oligocene; 3 – Middle Miocene; 4 – quarters; 5-9-formations and subformations: 5 – sedimentary-tuffaceous of the Upper Cretaceous-Paleocene; 6 – volcanic (alkaline basaltoid) Eocene; 7 – marine molasse of the Oligocene-Early Miocene; 8 – lagoon-marine Middle Miocene; 9 – continental-sea quarter; 10 – subvolcanic bodies; 11 – alkaline ultrabasic intrusions; 12 – anticlinal folds; 13-15 – fractures: 13 – longitudinal faults (thrusts, reverse faults) of the first (a) and second (b) orders (including A – Astara, L-Lyarik, G – Gafton, B – Burovar); 14 transverse faults of the first (a) and second (b) orders; 15 – deep faults according to geophysical data (PT – Predtalysh, WC – West Caspian); 16 – isolines along the surface of the Upper Cretaceous. Structural zones: I – Astara; II-Lyarik-Yardimlin; III – Burovar; IV – Jalilabad; V-Mugan. Transverse blocks (numbers in circles): 1 – Gamarat (horst); 2 – Cosmalian (graben); 3 – Masalli (horst); 4 – Dyman (graben).

1,5-2,5 км, и достигают четырехкилометровой отметки (Нимруд, Арарат, Арагац, Савалан, Сахенд и др.) [Кадыров и др., 2015; Mahmoud S. et al., 2005; Mahmoud Y. Et al., 2005].

Таким образом, современный и новейший структурный план Анатолийско-Кавказского сегмента Альпийского складчатого пояса сформировался в результате закрытия бассейнов с корой океанического типа, принадлежавших мезозойскому океану Тетис в условиях конвергенции Африкано-Аравийской и Евразийской литосферных плит в связи с открытием Атлантики. В настоящее время он определяется взаимодействием трех главных литосферных плит: Евразийской, Африканской и Аравийской, происходящим в условиях заключительной, «жесткой» стадии коллизии. Все массивы с корой континентального типа и разделявшие их подвижные зоны, испытав складчатость, надвиго- и покровообразование, к этому времени уже были спаяны в единое целое. На этой стадии земная кора или, по крайней мере, ее верхняя часть реагирует на сжатие уже как единое хрупкое целое с формированием современной сети разрывных нарушений разной ориентировки и характера. Вдоль последних и реализуется основная часть деформаций территории Азербайджана, вызванных конвергенцией плит [Masson et al., 2007; McClusky et al., 2000, 2003].

Методы исследования

Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений.

Механизмы очагов землетрясений, наряду с геодезическими и другими данными служат источником информации о напряженно-деформированном состоянии земной коры. Задачи оценки тектонического режима и скорости деформирования особенно актуальны для внутриплитных областей, характеризующихся высоким уровнем сейсмичности. Данный регион исследования является одной из таких областей, на территории которого известны землетрясения с $M=6,0$.

Данные о решениях механизма очагов землетрясений были получены при использовании метода полярности первых вступлений продольных волн. Данный метод широко применялся для умеренной силы землетрясений по всей территории Азербайджана, что обусловлено более плотным покрытием этого региона сейсмостанциями.

Известно, что поле напряжений Талышского региона характеризуется СВ близгоризонтальным сжатием. Однако учитывая тот факт, что на данном регионе происходят не только сильные, но и слабые землетрясения, было принято решение рассмотреть механизмы очага более сильных и относительно слабых землетрясений в отдельности.

В ходе исследования рассматривался каталог локальных землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических станций за 2016-2019 гг., взятый в «Бюро исследований землетрясений» РЦСС при НАНА. Таким образом, на основе выше сказанного были построены и проанализированы механизмы очагов землетрясений, произошедших с магнитудой выше 3,0 и установлены характерные особенности сеймотектонической деформации в отдельных сейсмогенных зонах Талышского региона (рис. 3). Сопоставление данных механизмов очага с тектонической картой показало, что основное влияние на сейсмическую активность оказывают Талышский, Предталышский, Ярдымоинский и Астаринские разломы.

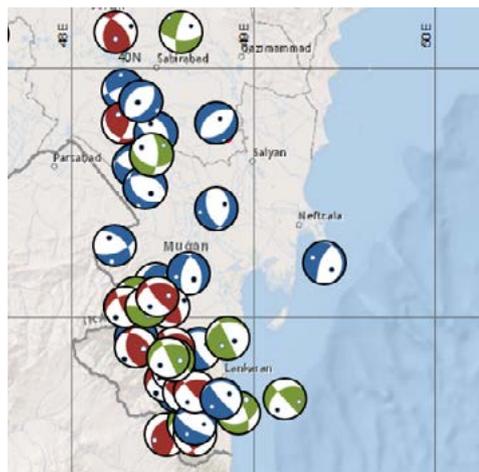


Рис. 3. Механизмы очагов землетрясений произошедших в Талышском регионе в 2016-2019 гг. с магнитудой выше $m_l > 3,0$. / Fig. 3. Focal mechanisms of earthquakes that occurred in the Talysh region in 2016-2019. with a magnitude above $m_l > 3.0$.

Было установлено, что почти у 50% толчков осей растяжения и осей сжатия отклонения в PL не превышают 30° . У оставшейся части землетрясений отклонения в PL осей растяжения превышают отклонение осей сжатия до 20° . Данное свидетельствует о том, что в исследуемом регионе в основном преобладает тип подвижки – взброс и сдвиг. Углы падения для подвижек разных типов превышают 45° , что свидетельствует о достаточно крутом погружении зон разломов. Это согласуется с тем, что в исследуемой зоне большинство поперечных разломов имеет углы падения сместителей $50-90^\circ$, то есть углы, достаточно близкие к вертикали. Анализ углов погружения SLIP показал, что для первой нодальной плоскости 60% меняется в положительную и 40% в отрицательную сторону. Для второй нодальной плоскости равное количество очагов меняется в двух пределах $\pm 100^\circ - 180^\circ$ и $\pm 10^\circ - 60^\circ$. Вариации углов погружения осей главных напряжений в совокупности со значительными стандартными отклонениями свидетельствуют о существенной пространственной неоднородности литосферы.

Нужно отметить, что разломы Талышских гор имеют в плане форму Z-образного пучка, в центре которого разломы сближены и простираются почти меридионально вдоль Каспийского побережья, а на севере и юге отклоняются на северо-запад и юго-восток, постепенно удаляясь один от другого. На севере разломы пучка образуют фронт дуги и сопрягаются с Араксской зоной, а на юге сочленяются с активными разломами Западного Эльбруса [Reilinger et al., 2016]. Вдоль разломов Талыша выявлены в основном молодые взбросовые и надвиговые смещения, с право-сдвиговой компонентой. Как правило, подняты западные крылья.

На основе полученных результатов была построена схематическая карта ориентации осей сжатия и растяжения исследуемых сильных землетрясений. Анализ показал, что ориентация осей растяжения в основном доминирует в ЗСЗ-ВЮВ и ЮЗ-СВ направлении, однако для осей сжатия выявляется ориентация в ЮЮЗ-ССВ направлении (57%) и в ЗСЗ-ВЮВ направлении (43%).

Установлено, что большая часть исследуемой территории подвержена сжатию, сдвиги отмечены в районе Лерика и Ярдымлы. Для Талышского региона установлены три основных типа подвижек: Взбросы (36%), сдвиги (34%) и сбросы (30%). Анализ осей сжатия более сильных землетрясений показал преобладание северо-восточной ориентации, а более слабых СВ-ЮЗ ориентацию. Правосторонняя сдвиговая подвижка приурочена к зоне Западно-Каспийского разлома. Видно, что поле

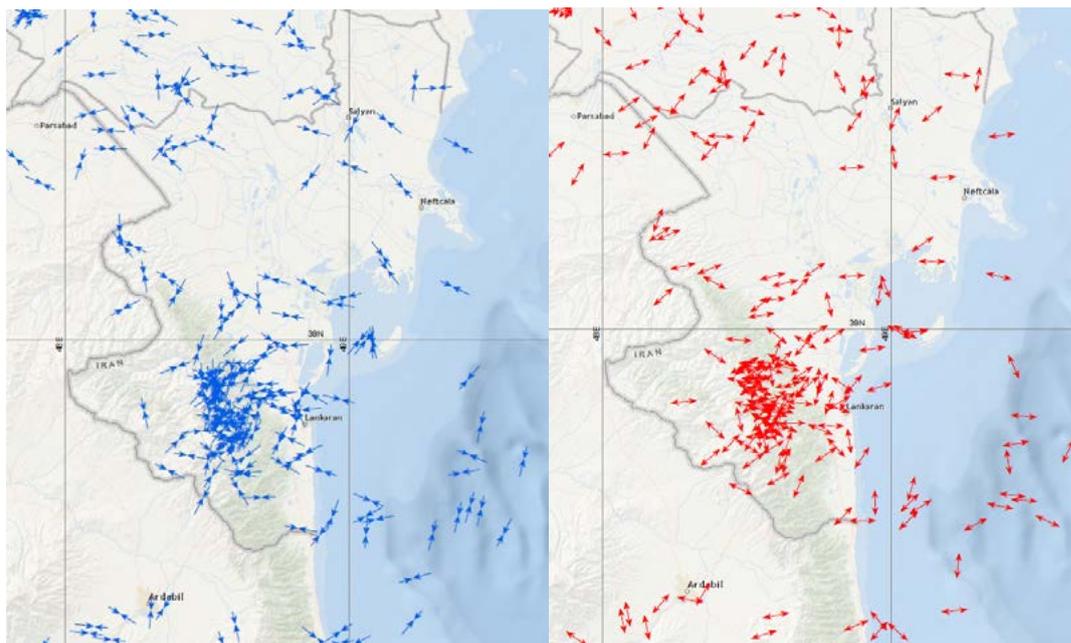


Рис. 4. Схема распределения осей сжатия и растяжения механизмов очагов землетрясений Талышского региона на глубине 0–10 км. /

Fig. 4. The distribution diagram of the compression and extension axes of the focal mechanisms of earthquake in the Talysh region at a depth of 0–10 km.

напряжений представляет собой сложную картину – то прорисовываются сдвиговые подвижки, то наблюдается преобладание взбросов взбросо-надвигов. Преобладающим направлением для азимутов осей сжатия фокальных механизмов является северо-северо-восточное направление, а для осей растяжения – восток-юго-восток, а также юго-запад (рис. 4).

Нужно отметить, что совпадение углов падения DP , модулей $SLIP$ и азимутов простираения STK взбросов и сдвигов не исключает возможности подвижек таких типов по плоскостям одних разломов. Все землетрясения находятся в схожих сейсмотектонических условиях. В геологическом строении этих зон принимают участие структурные элементы Астаринского антиклинория, Ярдымлинского синклинория, Буроварского антиклинория, Астраханбазарского синклинория.

Эти структуры общекавказского направления отделены друг от друга глубинными субширотными разломами [Шихалибейли, 1996]. Результаты анализа распределений очагов сильных землетрясений позволили сделать вывод о том, что на территории Талышского региона все сильные землетрясения ($M \geq 5,0$) приурочены к зоне поверхности кристаллического фундамента.

По данным ориентации главных осей напряжений, на основе метода катакластического анализа, мы рассчитали коэффициент Лоде-Надаи и определили тип напряженного состояния (геодинамический режим) (рис. 5).

Обобщение данных о механизмах очагов разномасштабных землетрясений, оценка сейсмотектонического деформирования земной коры и детальное изучение пространственно-временных вариаций напряженно-деформированного состояния среды позволяют, в совокупности с методами геолого-геофизического мониторинга выяснить современный режим геодинамического развития земной коры и литосферы региона [Rebetsky, 2012].

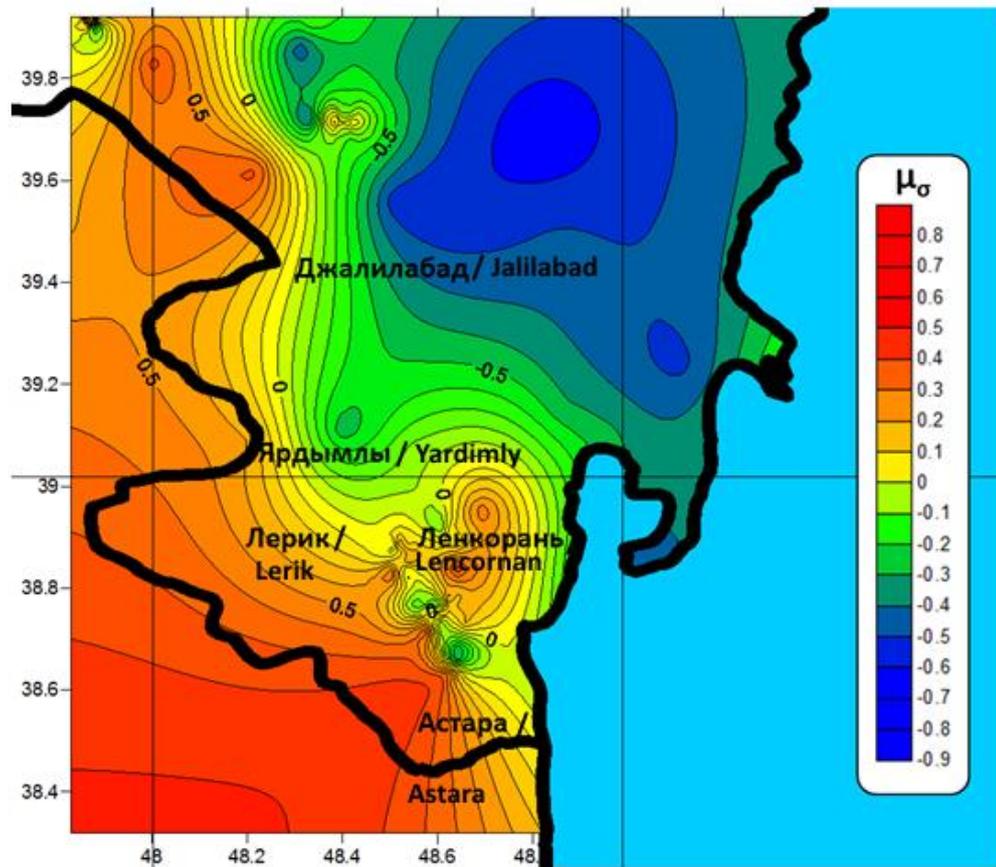


Рис. 5. Карта распределения коэффициента Лодэ-Надаи в пространстве на территории Талышского региона. /

Fig. 5. Map of the distribution of the Lode-Nadai coefficient in space on the territory of the Talysh region.

В данной статье рассматриваются и анализируются особенности реконструкции ориентации главных осей напряжений, а также параметры, определяющие тип напряженного состояния (геодинамический режим), коэффициент Лодэ-Надаи. Коэффициент Лодэ-Надаи (μ_σ), определяющий вид тензора напряжений или вид его эллипсоида (изменяется от -1 до $+1$), тип напряженного состояния показывает взаимосвязь между направлением вектора на зенит и ориентацией главных осей напряжений [Rebetsky, 2012]. Значения коэффициента Лодэ – Надаи изменяющиеся в пределах от $-0,2$ до $0,2$, рассчитанные для центральной части Талышского района, соответствуют тензору напряжений чистого сдвига, отражая геодинамическую обстановку Астара-Дербендского разлома. Юго-западная часть Талышского района характеризуется значениями коэффициента Лодэ – Надаи $+0,4$ - ($+0,8$), что соответствует зоне сжатия. Данный вывод подтверждается и данными GPS-измерений скоростей горизонтальных движений, согласно которым Талыш в горизонтальном движении как единая плита смещается по вязкой астеносфере в направлении с юга на север под воздействием северного дрейфа Аравийской плиты. Северо-восточная часть исследуемого региона отражает геодинамическую обстановку Нижнекуринской впадины и характеризуется зоной растяжения.

Таблица 2. / Table 2.

**AUSPOS, Австралия (интернет-служба GPS-обработки). /
AUSPOS, Australia (online GPS-Processing Service).**

Дата / Date	Используемая станция RCSS / Used station RCSS	Базовые станции IGS / Base stations	Тип Системы / System type
2013/05/1500:00:00	GLBG LKRГ LRKG YRDG	ANKR ARTU BUCU CRAO DRAG GLSV ISTA MDVJ NICO POL2 POLV SOFI TEHN YIBL	IGS

Результаты исследований

Анализ данных GPS-станций

Анализ данных GPS станций был проведен с использованием программного обеспечения GAMIT/GLOBK версия 10.71 [Herring et al., 2018]. В основу оценки скоростей положен анализ временных рядов координат GPS станций, вычисляемых из первичных данных, которые представляют собой наборы фазовых и кодовых измерений на двух частотах продолжительностью 24 часа с интервалом регистрации 15 с. Для оценки скоростей определяемых станций необходимо наличие в сети хотя бы одного опорного пункта, а желательно нескольких [Казымов, 2015; Казымов и др., 2017; Kazimov, Kazimova, 2019]. Мы включили в этот анализ 11 близко-

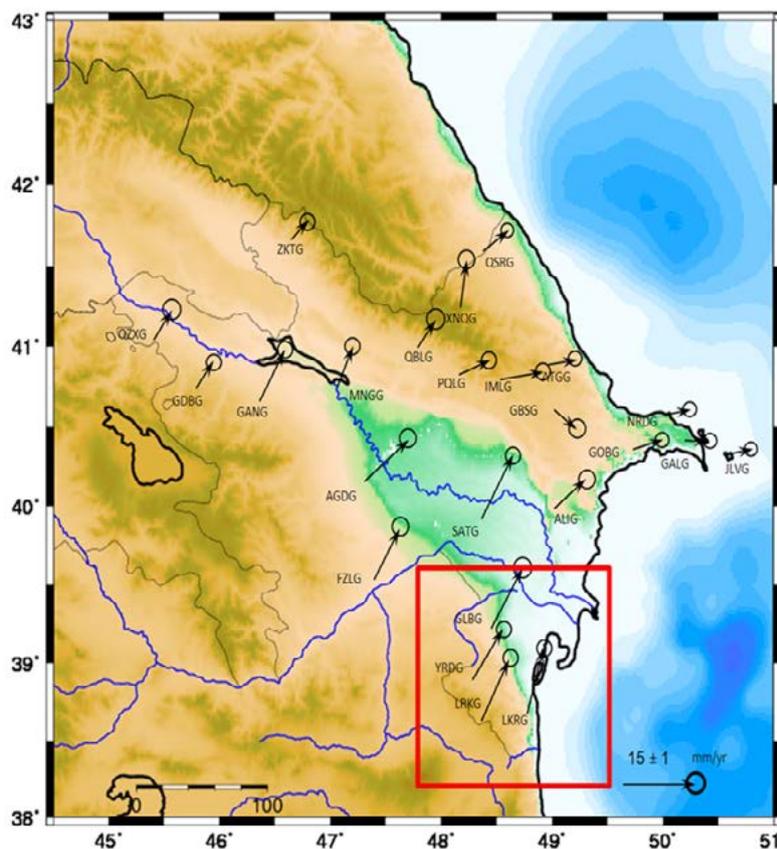


Рис. 6. Осредненная карта распределения векторов горизонтальных движений GPS-станций за 2016-2019 гг. /
Fig. 6. Averaged map of the distribution of horizontal movement vectors of GPS stations for 2016-2019.

расположенных опорных станций сети IGS: ARTU (Арти, Россия), CRAO (Симеиз, Украина), TERN (Тегеран, Иран) POLV (Полтава, Украина), MDVJ (Менделеево, Россия) ANKR (Анкара, Турция) NICO (Никосия, Кипр) DRAG) POL2 (Бишкек, Кыргызстан) YIBL (Ибал, Оман) BZGN (Базерган, Иран) [AUSPOS – Online GPS Processing Service.] с позициями и скоростями, как связующие звенья с глобальной системой отсчета (табл. 2).

Выбранные опорные станции с указанной кодировкой входят в реализацию международной земной отсчетной основы ITRF2008.

Таблица 3. / Table 3.

Основные значения, полученные по данным GPS наблюдений на станциях Лерик, Лянкяран, Джалилабад и Ярдымлы за период 2016-2019 гг. / Basic value obtained from GPS observations at Lerik, Lankaran, Jalilabad and Yardimly stations for the period 2016-2019.

GPS	Год (гг) / Year	VE, мм/г / VE, mm/g	VN, мм/г / VN, mm/g	E±, мм/г / E±, mm/g	N±, мм/г / N±, mm/g	RHO	Н высота, мм/г / Hheight, mm/g	±	AZM°	Vскоп., мм/г / Vspeed, mm/g
L K R G	2016	7,14	10,92	0,38	0,39	-0,02	-3,91	1,16	33,2	13,0
	2017	7,16	13,01	0,63	0,65	-0,036	12,77	2,03	28,8	14,9
	2018	5,79	9,83	0,15	0,16	-0,018	-2,03	0,48	34,5	11,4
	2019	4,15	13,23	0,68	0,7	-0,031	21,17	2,31	17	13,9
	2016-2019	5,79	10,83	0,15	0,16	-0,018	-2,03	0,48	20,1	12,2
L R K G	2016	8,82	12,96	0,44	0,46	-0,02	-2,11	1,49	34,2	15,7
	2017	6,09	14	0,67	0,7	-0,042	1,88	2,29	23,5	15,3
	2018	7,1	11,12	0,48	0,55	0,084	8,29	1,57	36,1	13,2
	2019	6,16	13,36	0,71	0,73	-0,035	12,98	2,49	25	14,7
	2015-2019	5,58	12,42	0,06	0,07	0,044	-3,1	0,2	24,5	13,6
Y R D G	2016	7,41	9,61	0,41	0,44	-0,05	2,17	1,40	37,6	12,1
	2017	5,74	11,66	0,68	0,73	-0,067	5,05	2,4	26,2	13,0
	2018	5,11	11,08	0,16	0,18	0,049	-0,46	0,57	24,8	12,2
	2019	7,18	11,49	0,73	0,77	-0,053	9,26	2,64	32	13,5
	2016-2019	3,6	11,85	0,06	0,07	0,02	-2,05	0,21	16,9	12,4
G L B G	2016	6,67	10,11	0,52	0,35	-0,02	-2,46	1,42	32,2	12,3
	2017	9,07	17,36	0,76	0,82	-0,047	0,63	2,7	29,1	19,8
	2018	5,53	8,72	0,47	0,52	-0,022	-10,86	1,83	30,4	10,3
	2019	-1,97	5,01	0,86	0,92	-0,031	17,93	3,18	21	10,2
	2016-2019	3,98	11,79	0,47	0,52	-0,022	-12,86	1,83	29,1	11,3

На рисунке 6 показана осредненная карта распределения векторов горизонтальных движений за 2016-2019 гг. Стрелки на рисунке показывают направление векторов скорости, а значения скоростей характеризуются длиной стрелок согласно масштабу, который приведен в нижнем правом углу карты. Цифровые значения полученных результатов показаны в таблице 3.

В таблице 3 представлена совокупность станций GPS-наблюдений, каждой из которых соответствует собственное название в виде аббревиатуры, широта и долгота ее расположения, измеренные локальные северные и восточные компоненты скорости, а также их погрешности. Информация о вертикальных компонентах движений не является важной при проведении данного анализа и в массиве исходных данных отсутствует.

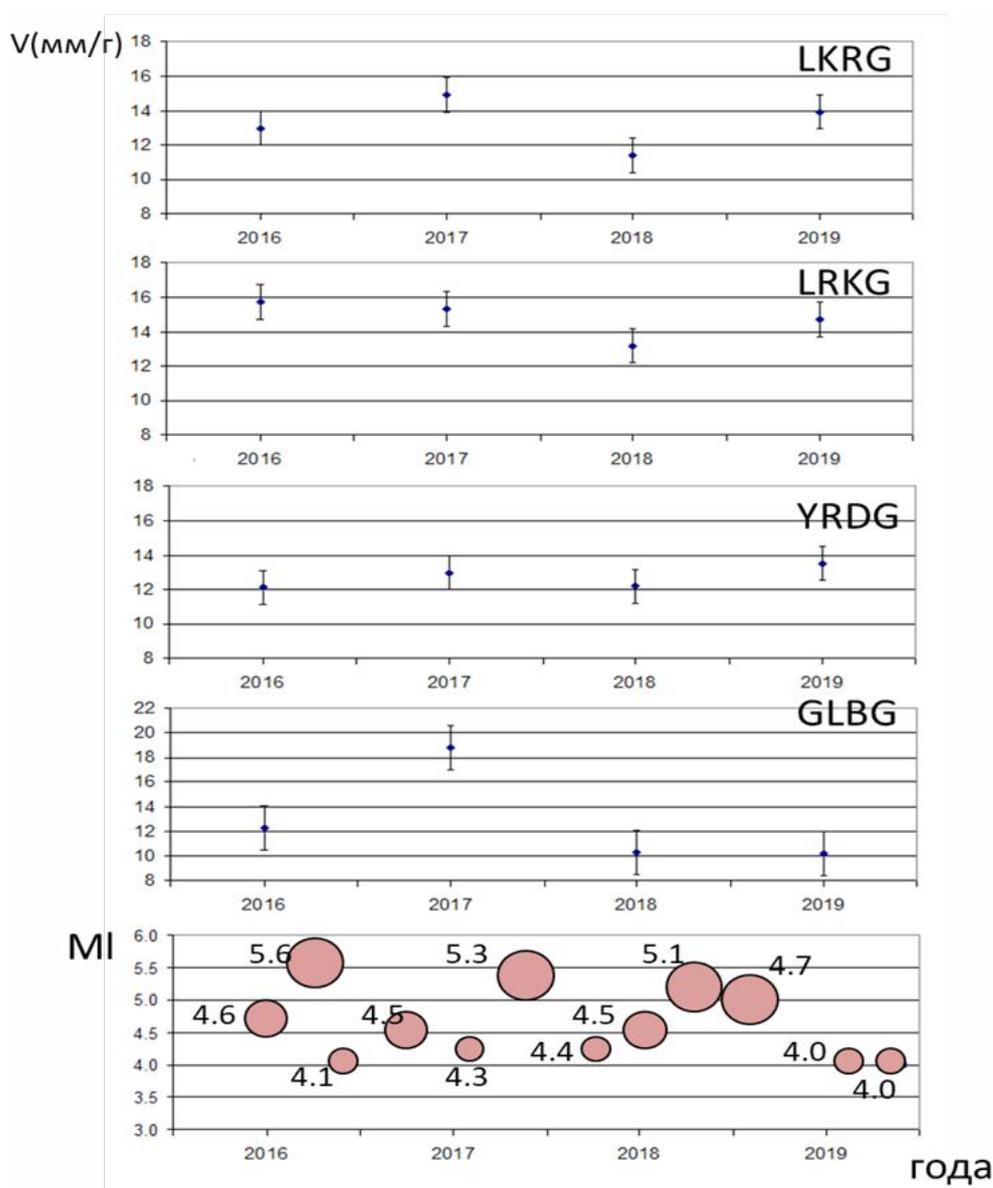


Рис. 7. Динамика изменения значения среднегодовых значений скоростей горизонтальных движений по 4-ом GPS-станциям. /

Fig. 7. Changes dynamics in the value of the average annual values of the horizontal movement speeds using 4 GPS-stations.

Поле скорости GPS-наблюдений четко иллюстрирует движение поверхности земной коры в С-СВ направлении на территории Азербайджана относительно Евразии. Самая явно проявленная особенность скоростного поля – уменьшение скорости в пунктах наблюдений, расположенных перпендикулярно к Главному Кавказскому Надвику (ГКН) (то есть на станциях PQLG, XNGG, ZKTG, ATGG, IMLG и GBLG). Пункты GPS-наблюдений, расположенные вдоль ГКН, показывают уменьшение скорости в западном направлении. С-СВ движение земной поверхности интерпретируется как одна из причин накопления напряжений на этом надвиге. Кроме того, здесь имеется тенденция горизонтального движения в пределах Куринской депрессии и Малого Кавказа, где увеличивается скорость с запада на восток вдоль простираения горной цепи.

На рисунке 7 показана динамика изменения значения среднегодовых значений скоростей горизонтальных движений для каждой рассматриваемой станции.

Обнаруженное увеличение скоростей с 2016 по 2017 гг., а затем уменьшение скорости в 2018 г. на станциях Лерик, Лянкяран, Джалилабад и Ярдымлы является наиболее существенной особенностью скоростного поля в регионе исследования. Анализ сейсмичности данного региона показал, что на протяжении данного периода, исследуемый регион характеризовался повышенной сейсмичностью. За данный период произошло три сильных ощутимых землетрясения с магнитудой $m_l > 5,0$. Отметим, что максимальное воздействие на сейсмичность данного региона оказывает Центрально-Иранский блок, протягивающийся от зоны, расположенной между Северно-Табризским разломом (на схеме NTF) и западной частью главной системы разломов Загроса (MRF), до Найбандского разлома на юго-востоке (на схеме Nay). Это хорошо соотносится с результатами, полученными путем сейсмологических

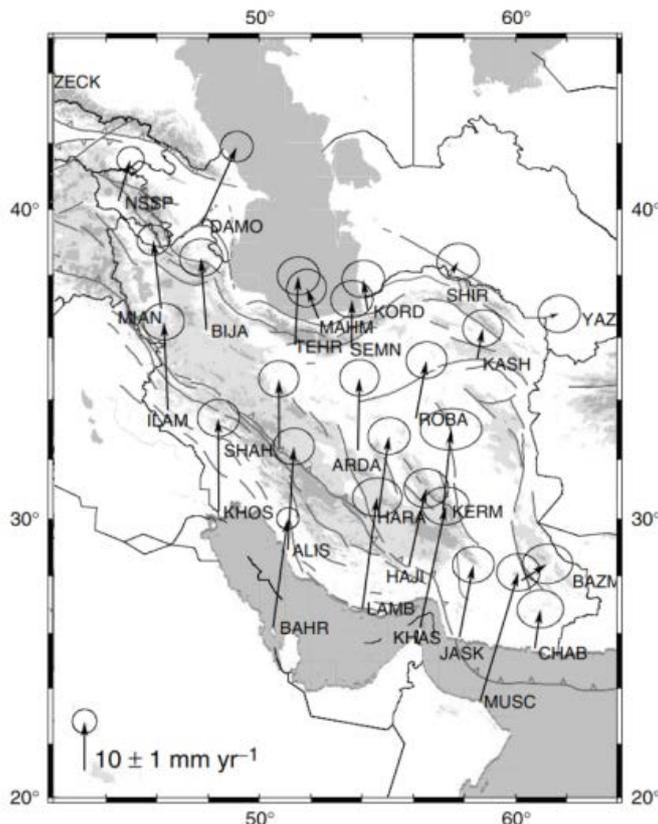


Рис. 8. Скорости горизонтальных GPS движений по данным Ф. Вернанта за 1999-2001 годы [Vernant et al., 2004]. / Fig. 8. Velocities of horizontal GPS movements according to F. Vernant data for 1999-2001 [Vernant et al., 2004].

наблюдений Джексона и Маккензи [McKenzie, 1970, 1972, 1978; Reilinger et al., 1997, 2006], которые в своей работе использовал [Vernant et al., 2004]. Ф. Вернант опубликовал в своей работе данные по сети из 27 GPS-станций, которая была расположена в Иране и северном Омане (рис. 8). Ее целью служило обнаружение подвижек данной части Альпийско-Гималайского горного пояса. Измерения производились с сентября 1999 года до октября 2001 года.

Выводы

Исследуемый регион располагается в зоне активного столкновения (коллизии) двух плит, Аравийской и Евразийской, продолжающегося 10-30 млн. лет, вплоть до современного этапа, причиной которого явилось мощное проявление наземного вулканизма, создавшего лавовые поля щелочных базальтоидов и крупные стратовулканы известково-щелочной магмы не только в восточной Анатолии, но и в центральной и южной частях Малого Кавказа в южной Грузии, а также Иранском Азербайджане.

Были построены и проанализированы механизмы очагов землетрясений, произошедших на территории Талышского района за 2016-2019 гг. с магнитудой выше 3,0 и установлено, что почти у 50% толчков осей растяжения и осей сжатия отклонения в PL не превышают 30° . У оставшейся части землетрясений отклонения в PL осей растяжения превышают отклонение осей сжатия до 20° .

Вариации углов погружения осей главных напряжений в совокупности со значительными стандартными отклонениями свидетельствуют о существенной пространственной неоднородности литосферы. Сопоставление данных механизмов очага с тектонической картой показал, что основное влияние на сейсмическую активность оказывают Талышский, Предталышский, Ярдymoинский и Астаринские разломы.

Установлено, что ориентация осей растяжения в основном доминирует в ЗСЗ-ВЮВ и ЮЗ-СВ направлении, однако для осей сжатия выявляется ориентация в ЮЮЗ-ССВ направлении (57%) и в ЗСЗ-ВЮВ направлении (43%). Большая часть исследуемой территории подвержена сжатию, сдвиги отмечены в районе Лерика и Ярдымлы. Для Талышского региона установлены три основных типа подвижек: взбросы (36%), сдвиги (34%) и сбросы (30%). Анализ осей сжатия более сильных землетрясений показал преобладание северо-восточной ориентации, а более слабых СВ-ЮЗ ориентацию. Правосторонняя сдвиговая подвижка приурочена к зоне Западно-Каспийского разлома.

Анализ поля скорости GPS-наблюдений показал С-СВ направлении на территории Азербайджана относительно Евразии. Наблюдается уменьшение скорости в пунктах наблюдений, расположенных перпендикулярно к Главному Кавказскому Надвику (ГКН) (то есть на станциях PQLG, XNGG, ZKTG, ATGG, IMLG и GBLG). Кроме того, имеется тенденция горизонтального движения в пределах Куринской депрессии и Малого Кавказа, где увеличивается скорость с запада на восток вдоль простираения горной цепи.

Установлено увеличение скоростей с 2016 по 2017 гг., а затем уменьшение скорости в 2018 г. на станциях Лерик, Лянкяран, Джалилабад и Ярдымлы. Анализ сейсмичности данного региона показал, что на протяжении данного периода, произошло три сильных ощутимых землетрясения с магнитудой $m_l > 5,0$.

Литература

1. Кадыров Ф. А., Мамедов С. К., Сафаров Р. Т. Исследование современной геодинамической ситуации и опасности землетрясений деформации земной коры территории Азербайджана по 5-тилетним GPS-данным. // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 156-162.
2. Казымов И. Э. Геодинамика Абшеронского полуострова. // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 163-166.
3. Казымов И. Э., Рахимли З. С., Юзбашиева С. С. Общие принципы обработки спутниковых измерений сети GPS-станций Азербайджана. // *Геология и Геофизика Юга России*. – 2017. – № 1. – С. 100-114.
4. Хаин В. Е., Ализаде Ак. А. Геология Азербайджана. // Том IV. Тектоника. – Баку: Изд-во Nafta-Press, 2005. – С. 214-234.
5. Шихалибейли Э. Ш. Некоторые проблемные вопросы геологического строения и тектоники Азербайджана. – Баку: Элм, 1996. – 215 с.
6. AUSPOS – Online GPS Processing Service. // <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>
7. Herring T. A., King R. W., Floyd M. A., McClusky S. C. GAMIT. Reference Manual Reference Manual GPS Analysis at MIT Release 10.7. // Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. – 2008. http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf
8. Kazimov I. E., Kazimova A. F. Modern geodynamics of Azerbaijan on GPS station data for 2017-2018 years. // *Seismoprognoisobservations in the territory of Azerbaijan*. – 2019. – Vol. 16. No. 1. – pp. 35-42.
9. Mahmoud S., Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Tealeb A. GPS evidence for northward motion of the Sinai Block: implications for E. Mediterranean tectonics. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2005. – Vol. 238. – pp. 217-224.
10. Mahmoud Y., Masson F., Meghraoui M., Cakir Z., Alchalbi A., Yavasoglu H., Yonlu O., Daoud M., Ergintav S., Inan S. Kinematic study at the junction of the East Anatolian fault and the Dead Sea fault from GPS measurements. // *J. Geodyn.* – 2013. – Vol. 67. – pp. 30-39.
11. Masson F., Anvari M., Djamour Y., Walpersdorf A., Tavakoli F., Daignières M., Nankali H., Van Gorp S. Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophys. // J. Int.* – 2007. Vol. 170. – pp. 436-440.
12. McClusky S., Balassanian S., Barka A., et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. – 2000. – Vol. 105. – pp. 5695-5719.
13. McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., Tealeb, A. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophys. // J. Int.* – 2003. – Vol. 155. – pp. 126-138.
14. McKenzie D. P. Plate tectonics of the Mediterranean region. // *Nature*. – 1970. – Vol. 226. – pp. 239-243.
15. McKenzie D. Active tectonics of the Mediterranean region. // *Geophys. J. Int.* – 1972. – Vol. 30. – pp. 109-185.
16. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine – Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. // *Geophys. J. Int.* – 1978. – Vol. 55. – pp. 217-254.
17. Reilinger R. E., McClusky S. C., Oral M. B., King R. W., Toksoz M. N., Barka A. A., Kinik I., Lenk O., Sanli I. Global Positioning System measurements of presentday crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. – 1997. – Vol. 102. – pp. 9983-9999.
18. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., Ar-Rajehi A.,

Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., GebranKaram. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. Is. B05411.

19. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva C., Tatevossian R. Development of inversion methods on fault slip data. Stress state on in orogenes of the Central Asia. // *Tectonophysics.* – 2012. – 18 p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.027>.

20. Vernant Ph. et al. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. // *Geophysical Journal International.* – 2004. – Vol. 157. – pp. 381-398.

References

1. Kadyrov F.A., Mamedov S.K., Safarov R.T. The study of the current geodynamic situation and the danger of earthquakes deformation of the earth's crust in Azerbaijan using 5-year GPS data. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Obninsk, GS RAS, 2015. pp. 156-162. (In Russ.)

2. Kazymov I.E. Geodynamics of the Absheron Peninsula. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Obninsk, GS RAS, 2015. pp. 163-166. (In Russ.)

3. Kazymov I.E., Rakhimli Z.S., Yuzbashieva S.S. General principles of processing satellite measurements of the network of GPS stations in Azerbaijan. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2017. No. 1. pp. 100-114. (In Russ.)

4. Khain V.E., Alizadeh Ak.A. *Geology of Azerbaijan. Volume IV. Tectonics.* Baku, Publishing house Nafta-Press. 2005. pp. 214-234. (In Russ.)

5. Shikhalibeyli E.Sh. Some problematic issues of the geological structure and tectonics of Azerbaijan. Baku, Elm. 1996. 215 p.

6. AUSPOS – Online GPS Processing Service. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>

7. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. GAMIT. Reference Manual Reference Manual GPS Analysis at MIT Release 10.7. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 2008. http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf

8. Kazimov I.E., Kazimova A.F. Modern geodynamics of Azerbaijan on GPS station data for 2017-2018 years. Seismoprognois observations in the territory of Azerbaijan. 2019. Vol. 16. No. 1. pp. 35-42.

9. Mahmoud S., Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Tealeb A. GPS evidence for northward motion of the Sinai Block: implications for E. Mediterranean tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 238. pp. 217-224.

10. Mahmoud Y., Masson F., Meghraoui M., Cakir Z., Alchalbi A., Yavasoglu H., Yonlu O., Daoud M., Ergintav S., Inan S. Kinematic study at the junction of the East Anatolian fault and the Dead Sea fault from GPS measurements. *J. Geodyn.* 2013. Vol. 67. pp. 30-39.

11. Masson F., Anvari M., Djamour Y., Walpersdorf A., Tavakoli F., Daignières M., Nankali H., Van Gorp S. Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophys. J. Int.* 2007. Vol. 170. pp. 436-440.

12. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2000. Vol. 105. pp. 5695-5719.

13. McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., Tealeb, A. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophys. J. Int.* 2003. Vol. 155. pp. 126-138.

14. McKenzie D.P. Plate tectonics of the Mediterranean region. *Nature.* 1970. Vol. 226. pp. 239-243.

15. McKenzie D. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. Int.* 1972. Vol. 30. pp. 109-185.
16. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine – Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophys. J. Int.* 1978. Vol. 55. pp. 217-254.
17. Reilinger R.E., McClusky S. C., Oral M.B., King R.W., Toksoz M.N., Barka A.A., Kinik I., Lenk O., Sanli I. Global Positioning System measurements of presentday crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 1997. Vol. 102. pp. 9983-9999.
18. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., Ar-Rajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Gebran Karam. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. Issue B05411.
19. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva C., Tatevossian R. Development of inversion methods on fault slip data. Stress state on in orogenes of the Central Asia. *Tectonophysics.* 2012. 18 p. [http://dx. doi. org/10.1016/j. tecto. 2012.09.027](http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.027).
20. Vernant Ph. et al. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International.* 2004. Vol. 157. pp. 381-398.

УДК: 551.515.9; 550.343

DOI:

Оригинальная статья

Облачные аномалии и землетрясения

Л. И. Морозова¹, А. В. Николаев², С. А. Пулинец³

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3;

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10;

³Институт космических исследований РАН, Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, e-mail: pulse1549@gmail.com

Статья поступила: 16.07.2020, доработана: 19.08.2020, одобрена в печать: 21.08.2020

Резюме: Актуальность работы. В работе делается попытка обобщить результаты наблюдений еще до конца не понятого явления, обычно называемого «линейные облачные аномалии» (ЛОА), наблюдаемого над областями подготовки сильных землетрясений или интенсификации тектонической активности. В англоязычной литературе можно найти более лаконичное название «earthquakeclouds». Несмотря на достаточно богатую литературу по этому вопросу, до сих пор остается не выясненной физическая природа ЛОА. **Цель работы.** Именно выяснения физического механизма формирования ЛОА перед землетрясениями приставляет собой наиболее актуальную задачу. В данной работе мы делаем шаг вперед в данном направлении, потому что основной целью нашего исследования является поиск источников формирования ЛОА. **Методы исследования.** Нами получены экспериментальные доказательства, что ЛОА всех типов имеют зародышевые структуры в нижней атмосфере на уровне порядка 100 м от поверхности Земли, что доказывает связь генезиса ЛОА с процессами, инициируемыми в земной коре. Источником информации, используемой для проверки процессов формирования ЛОА, являются метеорологические данные, получаемые из ассимилятивной модели GEOSFP, получаемые вблизи поверхности земли. **Результаты работы.** Сделана попытка проследить генезис ЛОА от поверхности земли до уровня сформировавшейся облачной структуры, и предложен физический механизм генерации ЛОА, в том числе поддержания их геометрической линейности в условиях турбулентной атмосферы. Данная работа была задумана совместно с ушедшим от нас А. В. Николаевым, мы постараемся включить в работу всё, что обсуждалось с ним при её подготовке, в том числе с учетом его принципиального мнения, что «неясность физических принципов не может быть причиной недоверия к экспериментальным результатам».

Ключевые слова: линейные облачные аномалии, землетрясение, облачная гряда, прогноз землетрясений.

Для цитирования: Морозова Л. И., Николаев А. В., Пулинец С. А. Облачные аномалии и землетрясения. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 57 – 78. DOI: xx. xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

DOI:

Original paper

Cloud anomalies and earthquakes

L. I. Morozova¹, A. V. Nikolaev², S. A. Pulinets³

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3 Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation;

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences (IPE RAS), 10/1 Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation;

³Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), 84/32 Profsoyuznaya Str, Moscow 117997, Russian Federation, e-mail: pulse1549@gmail.com

Received: 16.07.2020, revised: 19.08.2020, accepted: 21.08.2020

Abstract: Relevance. An attempt is made in present paper to generalize the results of observations of the not yet fully understood phenomenon, usually called “linear cloud anomalies” (LCA), observed over the areas of impending strong earthquakes or intensification of tectonic activity. In the English-language literature, you can find a more concise name “earthquake clouds”. Despite the fairly rich literature on this issue, the physical nature of LCA remains unclear. **Aim.** It is the identification of the physical mechanism of the formation of LCA before earthquakes that is the most urgent problem. In this work, we take a step forward in this direction, because the main aim of our study is to find the sources for the formation of LCA. **Methods.** We have obtained experimental evidence that LCA of all types have embryonic structures in the lower atmosphere at a level of about 100 m from the Earth’s surface, which proves the connection between the LCA genesis and the processes initiated in the earth’s crust. The source of information used to verify the formation of LCA is the meteorological data obtained near the earth’s surface from the assimilative model GEOS FP. **Results.** An attempt is made to trace the genesis of LCA from the earth’s surface to the level of the formed cloud structure, and a physical mechanism for the generation of LCA is proposed, including maintaining their geometric linearity under conditions of a turbulent atmosphere. This work was conceived together with A. V. Nikolaev, we will try to include in the work everything that was discussed with him during its preparation, including his principled opinion that “the lack of clarity of physical principles cannot be the reason for distrust of experimental results”.

Keywords: linear cloud anomalies, earthquake, cloud bank, earthquake prediction.

For citation: Morozova L. I., Nikolaev A. V., Pulinets S. A. Cloud anomalies and earthquakes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii* = *Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (3): 57 – 78. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

Введение

Линейные облачные аномалии наблюдались и до космической эры – долгоживущие гряды облаков, не сдуваемые воздушным потоком – эффект Шлюмберже, обнаруженный им в Альпах в начале 20-го века и русскими геологами И. В. и Д. И. Мушкетовыми [1935] в Тянь-Шане в 30-х годах XX века. Существовавшая длительное время дифференциация наук о Земле не способствовала изучению взаимодействия оболочек Земли-атмосферы, гидросферы и литосферы, хотя одна из проблем – газовое дыхание Земли – была поставлена В. И. Вернадским еще в 1912 г. [Вернадский, 1912]. Давно замеченные различные виды линейных облачных аномалий (ЛОА) являются результатом взаимодействия трех сфер Земли: лито-, гидро- и атмосферы.

С началом космической эры геологи стали использовать спутниковые снимки. П. В. Флоренский [1987] связывал облачные гряды на снимках с залежами углеводородов. Впервые линейно протяженные облачные аномалии на спутниковых снимках были использованы при картировании разломов шельфовых зон континентов и Каспийского моря [Кобец, 1976; Еременко, Каттерфельд, 1978; Ежов, Ищенко, 1983; Авенариус и др., 1985].

На возможность использования различных проявлений взаимодействия геосфер в качестве краткосрочных предвестников землетрясений впервые указал Б. В. Ежов [1988].

Спутниковые метеорологические снимки Земли являются носителями информации о протекающих одновременно в её оболочках процессах, имеющих различную динамику. Линейные облачные аномалии – облачные линеаменты, возникающие над линейными геофизическими аномалиями в земной коре, выражены на снимках в виде облачной гряды или, наоборот, узкой темной полосы – каньона (безоблачный коридор в облачном массиве), либо резких прямолинейных границ на части периметра облачного поля, надвигающегося на разлом. ЛОА является следствием активизации находящегося под ней участка разлома. После исчезновения импульса геофизического поля облачность над этим участком приходит в нормальное состояние в соответствии с циркуляцией атмосферы.

Полигоном для спутникового мониторинга служит зона радиовидимости спутникового центра, площадь которой на 3 порядка превышает площадь наземного полигона. На мелкомасштабных снимках (например, на изображениях с геостационарных спутников) отражается территория, охватывающая несколько тектонических плит, что позволяет следить за их взаимодействием. Метеосейсмический анализ снимков с роом ЛОА выявляет истинные размеры территорий, охваченных сейсмическим процессом. Поскольку облачные поля являются как бы экраном, на который проецируются активные в данный момент разломы, то по серии последовательных снимков можно проследить распространение возмущения в земной коре. По превышению количества ЛОА над среднемесячными фоновыми значениями определяют степень сейсмической опасности.

Анализ ЛОА в результате дешифрирования спутниковых снимков осуществляется в реальном времени в отличие от других предвестников, выявленных геолого-геофизическими контактными методами. Вследствие визуализации облаками геофизической аномалии в земной коре сейсмоактивный регион на мелкомасштабном снимке выявляется оперативно по мере поступления информации со спутников. Такие снимки охватывают большие территории, позволяя оценить площадь, занятую роом ЛОА.

Спутниковый мониторинг облачных аномалий позволяет оперативно обнаруживать регион вероятного землетрясения. Мониторинг ЛОА должен осуществляться специалистами по спутниковой метеорологии центров Росгидромета, анализирующими атмосферные процессы с характерными конфигурациями облачных полей для каждого сейсмически активного региона Земли.

По мнению В. И. Уломова, «в недалёком будущем по аналогии с метеорологией окажется возможным широкомасштабный прогноз сейсмической погоды, благодаря регулярному составлению специальных синоптических карт, характеризующих направленность развития сейсмогеодинамических процессов в крупных регионах на трансрегиональном и глобальном уровнях» [Уломов, 1998].

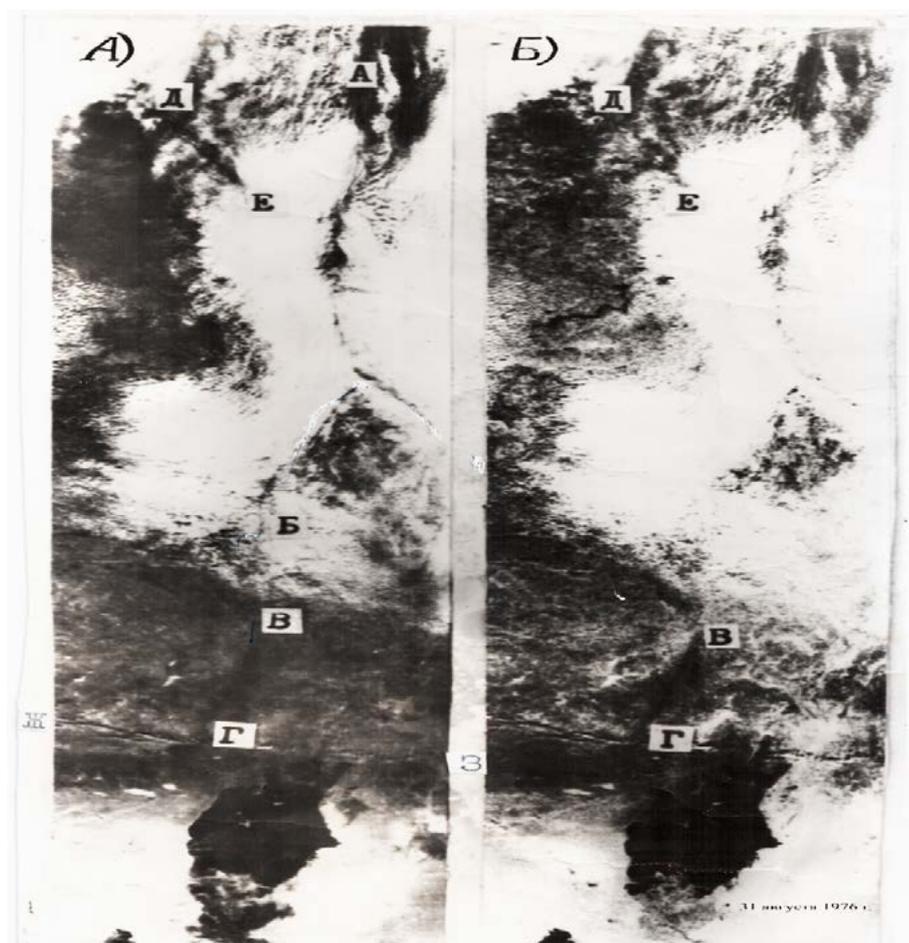


Рис. 1. Размывание облачности над разломами: Главным Уральским разломом – А, Б, В; Тиманским кряжем – Д, Е; облачная гряда (Ж, Г) над широтным разломом по северу Аральского моря, 31.08.1976 г.: А) видимый, Б) ИК – диапазон. /
Fig. 1. Dissolution of clouds over the faults: Main Ural fault – А, В, С; Timan ridge – D, E; cloud bank (G, D) above the latitudinal fault in the north of the Aral Sea, 31.08.1976: А) visible, В) IR – range.

И. Г. Киссин [2013] считал, что «Мониторинг значительных территорий может осуществляться с максимальным привлечением дистанционных методов [Морозова, 2005]. Массовое привлечение подобных методов позволит решить задачи мониторинга обширных сейсмоактивных территорий в режиме реального времени с наименьшими затратами».

Тем не менее до сих пор спутниковые снимки с ЛОА не нашли применения в практической сейсмологии. «Большинство катастрофических явлений, в особенности таких чрезвычайно опасных, как землетрясения, находятся вне постоянного слежения из космоса. Отчасти это связано с определёнными трудностями их организации, отчасти – с недооценкой такого рода наблюдений» [Григорьев, Кондратьев, 1996].

Процесс дешифрирования ЛОА на метеорологических спутниковых снимках целесообразно производить в визуальном (интерактивном) режиме распознавания образов, пока не решен вопрос об автоматическом выделении облачных линеаментов. Визуальная информация более репрезентативна и может быть представлена в течение нескольких минут после получения снимка. Л. И. Морозова [2007] составила Атлас линейных облачных аномалий и инструкцию их выявления на снимках.

Интересными в этом отношении могут быть снимки с аномалиями в облачных полях, которые нельзя объяснить погодообразующими факторами. Это облачные массивы, возникающие вследствие обтекания воздушным потоком океанических островов или орографические облака с подветренной стороны хребтов. В отличие от них ЛОА имеют прямолинейную или правильную геометрическую форму.

В атмосфере на разных высотах облака имеют определённую яркость и форму, а их проекции на снимок характерную конфигурацию. Это позволяет по снимкам оценить вертикальную возмущённость атмосферы в зоне ЛОА. На снимках выражены только те безоблачные каньоны, вертикальная мощность которых либо выше всего облачного слоя, либо ограничена сверху перистой облачностью верхнего яруса прозрачной для лучей видимого диапазона спектра и непрозрачной – белой на инфракрасном – ИК снимке. По одномоментным снимкам в видимом и ИК-диапазонах можно судить об уровне вертикального воздействия излучения разлома на атмосферу Земли.

ЛОА в виде каньонов впервые были обнаружены Л. И. Морозовой над Главным Уральским разломом и Тиманским кряжем [Морозова, 1980] (рис. 1).

Облачное поле над Уральским хребтом состоит из кучевых облаков, покрытых тонким слоем ледяных перистых в верхнем ярусе атмосферы (12-16 км).

На снимке видимого диапазона в мощном слое облачности видна узкая тёмная полоса – малооблачная зона, возникшая в результате размывания нижней облачности ниже 800 м (рис. 1А), она слабо прослеживается в ИК диапазоне (рис. 1Б), завалированная перистой облачностью выше 10 км.

Все виды облачности атмосферной природы имеют специфический вид, присущий тому или иному атмосферному образованию, с размытыми границами. В циклонах (в тропиках – тайфуны) облачный вихрь вращается против часовой, как на рисунке 2а. В день, предшествующий землетрясению $M=8,3$ вблизи Камчатки 24.05.2013 г., часть его контура была образована прямыми вертикальными стенками, с эпицентром под одной из них (рис. 2б).

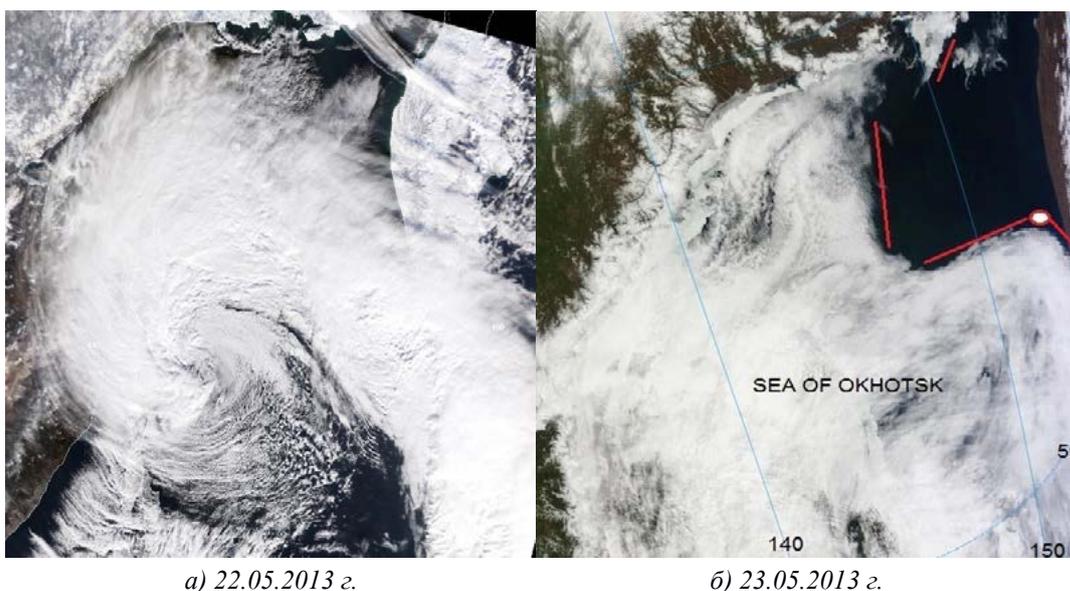


Рис. 2. Облачный вихрь вблизи п-ова Камчатка. /
Fig. 2. Cloudy vortex near the Kamchatka Peninsula.

Появление протяженной ЛОА обозначает только регион нарастающей сейсмичности и является краткосрочным предвестником сильного землетрясения или серии нескольких менее сильных на значительной территории региона. Появление на двух последовательных снимках на небольшом пространстве трех и более ЛОА уточняет положение эпицентра землетрясения [Морозова, 2010].

Появление новых ЛОА на последующих снимках обозначает территорию тектонической активизации, включая эпицентр [Морозова, 1993, 1997а, б, 2005, 2007, 2011, 2015а]. По превышению количества ЛОА над среднемесячными фоновыми значениями определяют степень сейсмической опасности.

Цель работы

Несмотря на достаточно обширную литературу, посвященную феномену ЛОА, большинство авторов обходят вопрос физического механизма формирования ЛОА и сосредотачиваются, в основном, на морфологии, классификации необычных облачных структур и приведении примеров регистрации ЛОА для тех или иных землетрясений [Gur, Xie, 2007], в том числе, делая попытки прогноза землетрясений с помощью ЛОА [Guo, Jie, 2013]. Существует весьма ограниченное количество публикаций, где делаются попытки объяснить физическую природу ЛОА [Liperovsky et al., 2005; Pulinets, Ouzounov, 2011]. В первой работе инъекция аэрозолей в атмосферу перед землетрясениями предлагается в качестве основного механизма, при этом аэрозоли играют роль начальных центров нуклеации в процессе образования облаков, а их транспорт на уровень образования облаков происходит за счет тепловых аномалий над активными разломами. Такой подход позволяет только как-то объяснить формирование линейных облаков, но не объясняет формирование линейных просветов (каньонов) в сплошной облачности. В работе [Pulinets, Ouzounov, 2011] рассматриваются оба случая (формирование линейных облаков и просветов), но только в виде прямолинейных образований. Целью настоящей работы является рассмотрение всех типов ЛОА и соответствующих им протоструктур вблизи поверхности земли и объяснение физических причин их формирования.

Отклики геодинамики в облачных структурах

Формирование облаков является частью более всеобъемлющего процесса – круговорота воды в природе. В результате тепловой конвекции теплый воздух, содержащий водяной пар, поднимается в вышележащие слои атмосферы, где с достижением температуры точки росы, происходит конденсация и образование мельчайших водяных капель. Учитывается также наличие ядер конденсации в виде аэрозолей или ионов. Охлаждение может происходить и в результате адвекции – перемещении воздушных масс в горизонтальном направлении в области с более низкой температурой. В зависимости от высоты облака могут представлять собой как взвесь мелких водяных капель, так и мельчайших частиц льда. Существует более десяти видов тропосферных облаков, но их общей характеристикой является их высокая изменчивость, связанная с динамикой процессов внутри облака (конденсация, испарение, коагуляция, обмен электрическими зарядами, конвекция и пр.), а также с движением облака в потоке воздушных масс и попадание его в другие внешние условия (изменение температуры, влажности и давления). Время существования облаков зависит от их типа. Так, время жизни кучевых облаков составляет десятки минут, тогда как слоистые облака сохраняют свою форму в течение суток.

Методика исследования

Следует отметить, что круговорот воды сопровождается вертикальными потоками в виде скрытого тепла, которое выделяется в атмосферу при конденсации влаги и поглощается при ее испарении. В случае появления дополнительных источников конденсации в результате ионизации или аномальной концентрации аэрозолей дополнительные потоки тепла можно отследить путем оценки поправки химического потенциала паров воды в атмосфере, которая рассчитывается из данных о температуре и относительной влажности воздуха [Pulinets et al., 2014; Пулинец и др., 2015]. Поэтому основным методом нашего исследования будет изучение динамики распределения влажности и температуры воздуха на поверхности земли над областями, покрытыми облачностью и открытыми пространствами.

На рисунке 3а показано распределение облачности над восточной частью Магаданской области в диапазоне долгот 130° – 160° 22 апреля 2014 в 09:00, а на рисунках ниже (рис. 3б – 3г) показаны распределения поправки химического потенциала, относительной влажности и температуры на высоте 100 м над уровнем подстилающей поверхности.

Но нас в первую очередь будет интересовать вопрос, каким образом облака «чувствуют» тектонические процессы, и как эти процессы сказываются на их морфологии. Для начала посмотрим, какие облачные структуры явно проявляют связь со структурами на земной поверхности. Несмотря на то, что тонкие детали распределений не совпадают с деталями облачности, мы четко можем отметить закономерность. Подстилающая поверхность под облаками имеет более высокую влажность и более низкую температуру по сравнению с открытой поверхностью. Кроме того, крупномасштабная структура облачности – в форме угла в левом верхнем углу распределения облачности повторяется на всех трех распределениях метеорологических параметров.

Таким образом, мы можем говорить о существовании протооблачности у поверхности земли (в виде распределения температуры воздуха, относительной влажности и поправки химического потенциала), которая потом отражается в форме облачного покрова.

А может ли быть соответствие более мелкомасштабных структур у поверхности земли и в облачном покрове? На рисунке 4а показана облачная структура, сформированная акустико-гравитационной волной вблизи пролива Инвестигатор у западной кромки южного побережья Австралии.

Как видим, волновая структура отчетливо идентифицируется в распределении метеорологических параметров, что говорит о передаче формы возмущений в неизменном виде от поверхности земли до уровня облаков, что позволяет надеяться на то, что ЛОА являются отражением реальных структур либо в земной коре, либо вблизи поверхности земли или океана.

Перед землетрясением $M=7,9$ в Непале 25.04.2015 г. была зафиксирована протяженная облачная гряда над Бенгальским заливом у п-ова Индостан, которая показана на снимке от 24 апреля (рис. 5а) и которая сохранялась в течение трех часов, постепенно размываясь. В соответствии с нашей концепцией появление протяженной гряды указывает на возможность землетрясения в регионе в ближайшие дни, но не определяет положение эпицентра [Морозова, 2015б]. Согласно Добровольскому [1992] положение очагов скопления предвестников может не совпадать с положением эпицентра будущего землетрясения, но должно находиться внутри зоны подготовки землетрясения [Dobrovolsky et al., 1979].

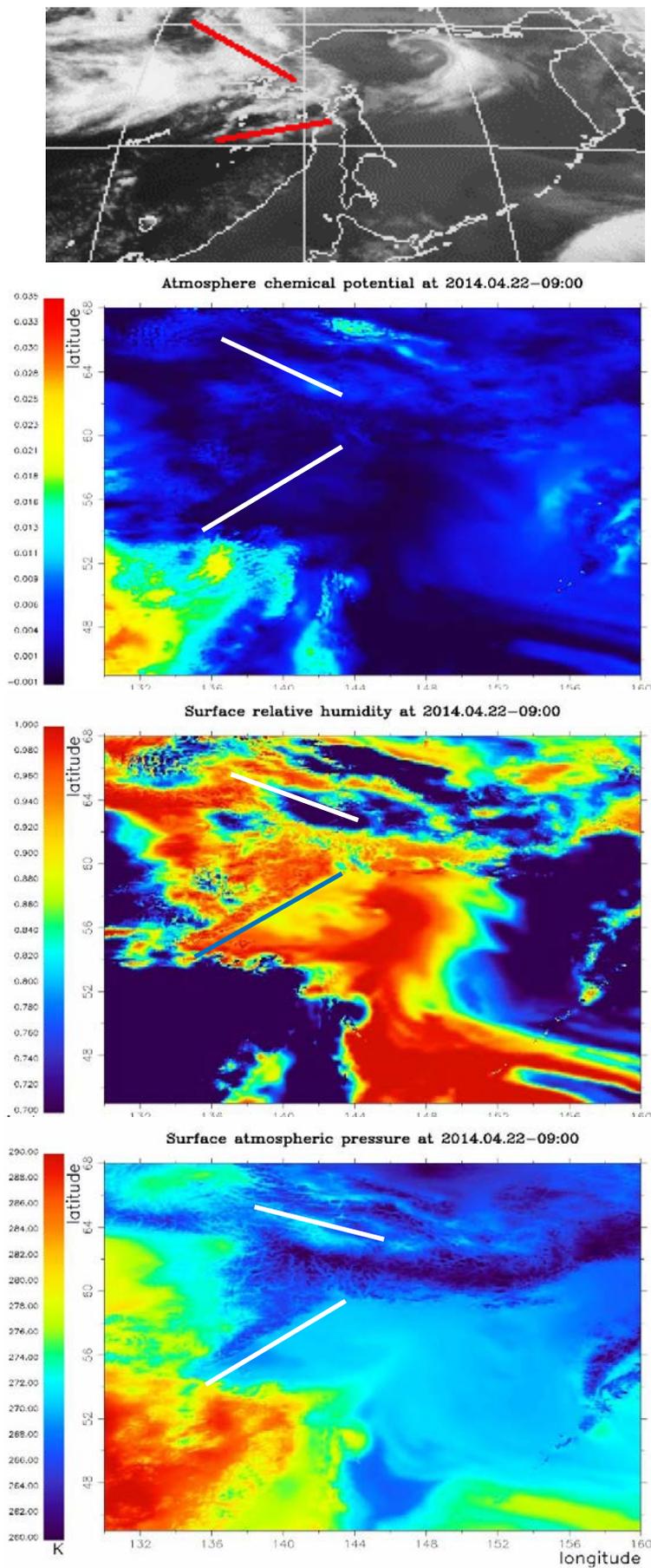


Рис. 3. Сверху вниз:
 распределение облачности,
 поправки химического
 потенциала, относительной
 влажности и температуры.
 Магаданская область. /
 Fig. 3. From top to bottom:
 cloudiness distribution,
 chemical potential
 corrections, relative humidity
 and temperature.
 Magadan
 Region.

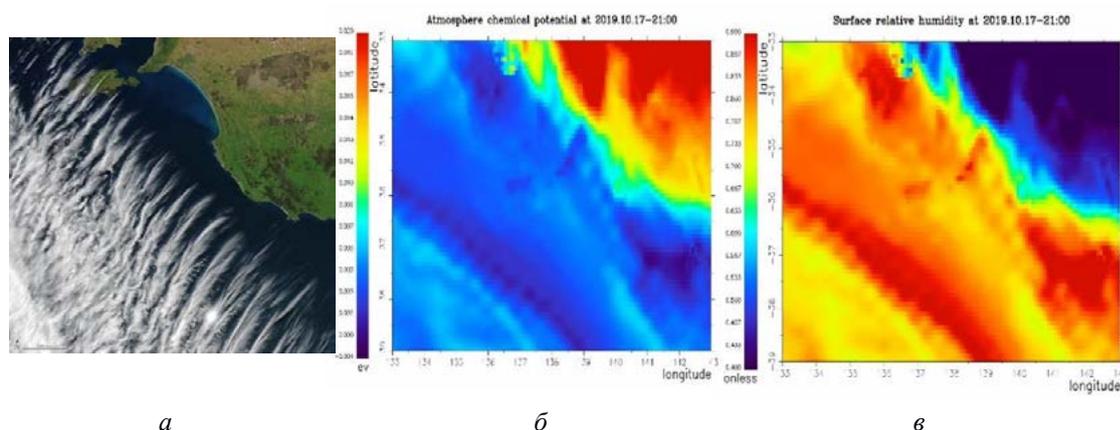


Рис. 4. а) облачная волновая структура; б) распределение поправки химического потенциала; в) распределение относительной влажности воздуха (на высоте 100 м над уровнем моря). Южное побережье Австралии. /

Fig. 4. a) cloudy wave structure; b) the correction distribution of the chemical potential; c) distribution of relative air humidity (at an altitude of 100 m above sea level). South coast of Australia.

Если присмотреться внимательно, то справа в нижней части облачной гряды можно заметить еще небольшой отросток. На рисунке 5б представлена структура тектонических разломов в Бенгальском заливе, и разлом, обведенный овалом, по своему положению точно совпадает с положением облачной гряды. На рисунке 5в представлено распределение относительной влажности на уровне 100 м над поверхностью океана, и белой линией трассирована такая же структура: квазимеридиональная структура повышенной влажности с отростком вправо.

Это соответствует нашим общим выводам относительно облачного покрова и метеорологических параметров (рис. 3). Облакам соответствует повышенная влажность и пониженная температура вблизи поверхности. Мы приходим к очень важному выводу о том, что ЛОА – не просто какие-то линейные облачные образования, но связаны по своему положению и по форме с тектоникой земной коры.

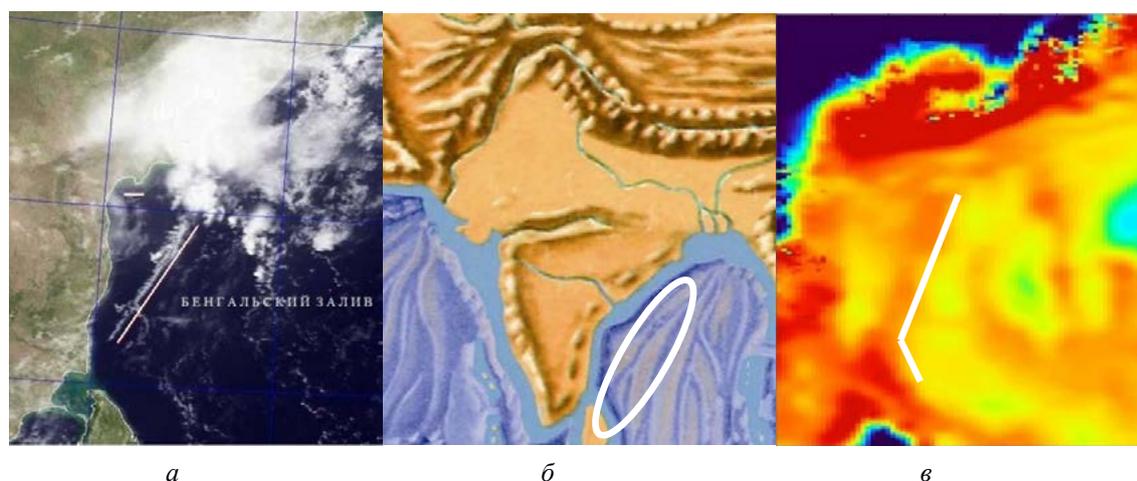


Рис. 5. Облачная гряда 24.04.2015 г.: а) облачная гряда над Бенгальским заливом; б) структура тектонических разломов в Бенгальском заливе; в) распределение относительной влажности. / Fig. 5. Cloud bank 24.04.2015: a) cloud ridge over the Bay of Bengal; b) structure of tectonic faults in the Bay of Bengal; c) distribution of relative humidity.

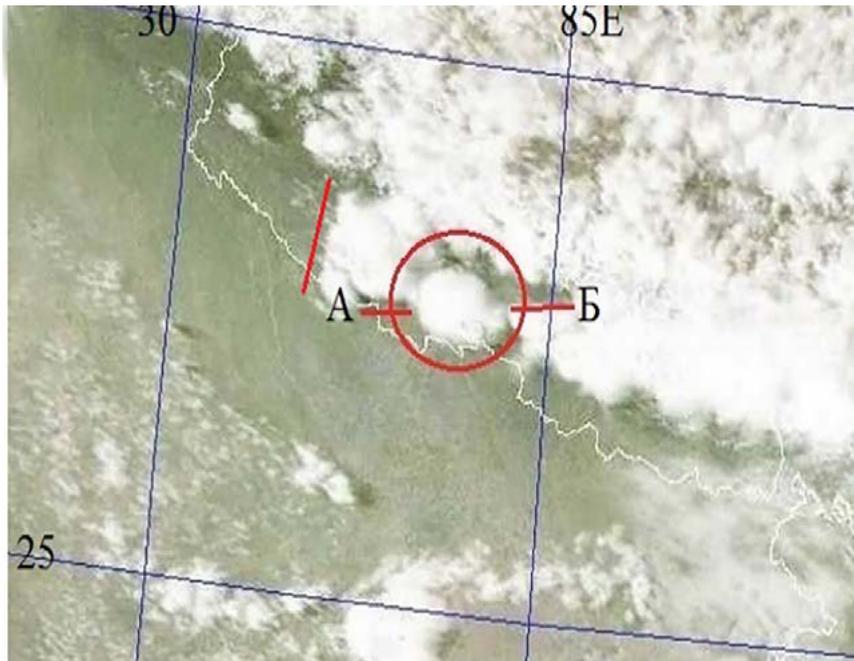


Рис. 6. Грозное облако вблизи эпицентра землетрясения в Непале. Снимок 24.04.2015 г. /
 Fig. 6. A thundercloud near the epicenter of an earthquake in Nepal. Image 24.04.2015.

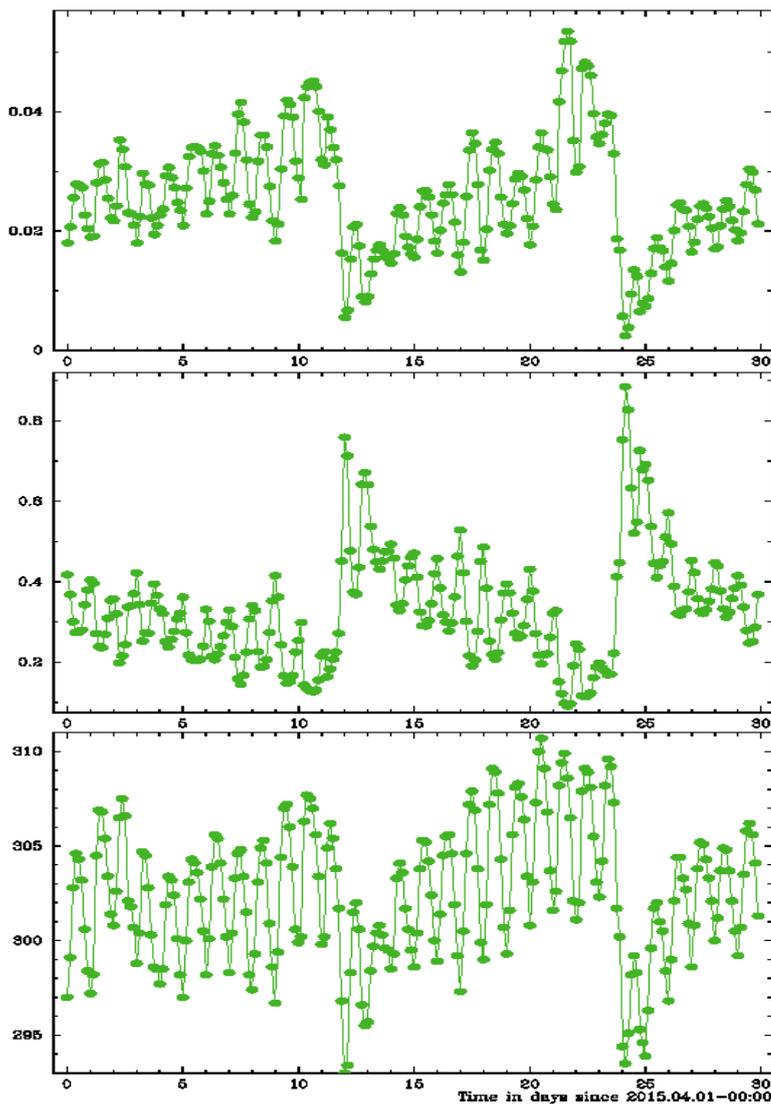


Рис. 7. Сверху вниз: а) вариации химического потенциала, б) относительной влажности и в) температуры воздуха на высоте 100 м. Непал. /
 Fig. 7. From top to bottom: a) variations in chemical potential, b) relative humidity and c) air temperature at an altitude of 100 m. Nepal.

Вблизи самого эпицентра землетрясения в Непале на следующие сутки 25 апреля было обнаружено мощное грозовое облако с верхней границей порядка 16 км (рис. 6). Чтобы понять физический механизм образования грозового облака были исследованы вариации метеорологических параметров вблизи подстилающей поверхности на высоте 100 м (рис. 7). Известно, что перед землетрясением максимум поправки химического потенциала свидетельствует о максимальном уровне ионизации и концентрации кластерных ионов, оболочка которых состоит из большого количества молекул воды. Фактически химический потенциал повторяет поведение радона в области очага, когда перед самым землетрясением происходит резкое сжатие земной коры, закрытие всех трещин и прекращение поступления радона в

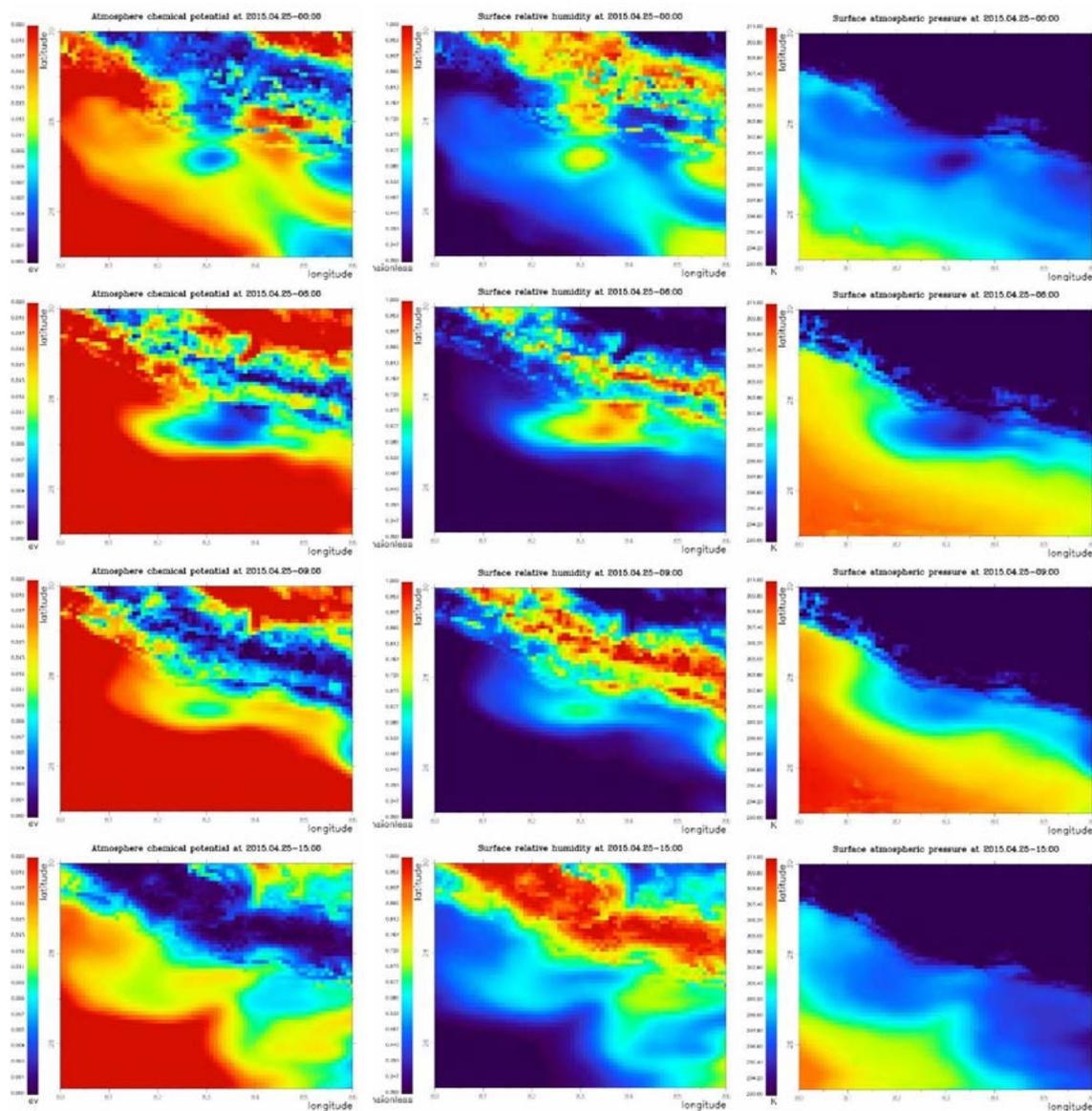


Рис. 8. Слева направо: динамика пространственного распределения химического потенциала, относительной влажности и температуры воздуха на высоте 100 м от подстилающей поверхности. /

Fig. 8. From left to right, the dynamics of the spatial distribution of chemical potential, relative humidity and air temperature at a height of 100 m from the underlying surface.

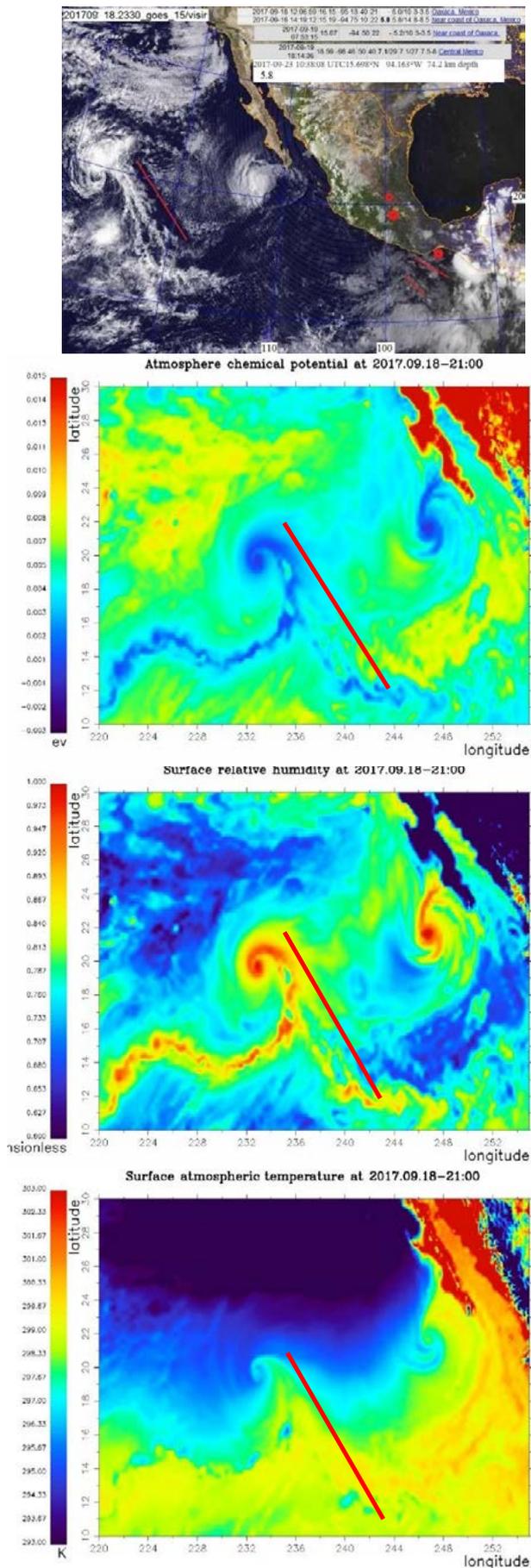
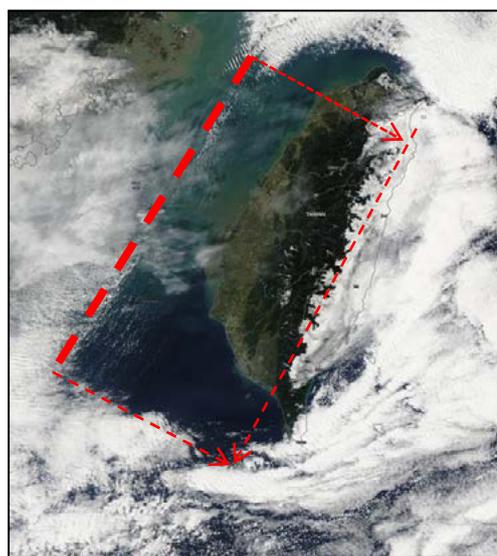


Рис. 9. Сверху вниз: а) Снимок в видимом диапазоне спутника GOES 18.09.2017, красной линией обозначен каньон, красными точками – эпицентры землетрясений в Мексике за период 19-23 сентября 2017 г.; б) поправка химического потенциала; в) относительная влажность; г) температура воздуха. / Fig. 9. From top to bottom: a) Image in the visible range of the GOES satellite on September 18, 2017, the red line indicates the canyon, red dots – the epicenters of earthquakes in Mexico for the period September 19-23, 2017; b) correction of chemical potential; c) relative humidity; d) air temperature.

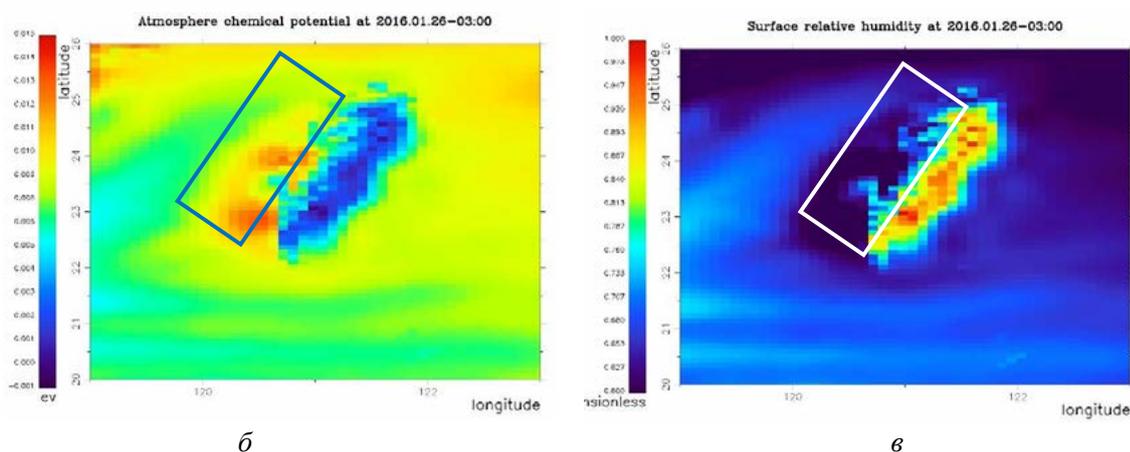
атмосферу. Соответственно, прекращается производство ионов, а уже образовавшиеся кластеры в виде капель оседают на нагретую поверхность и тут же влага, содержащаяся в них, начинает испаряться и подниматься вверх уже в виде нагретого водяного пара. Испарение приводит к охлаждению окружающего воздуха, что мы и наблюдаем на рисунках 7б и 7в: температура резко падает, а влажность возрастает. Именно эта область становится основой для формирования грозового облака вверху.

Пространственное распределение тех же параметров, что и на рисунке 7, показано на рисунке 8 в динамике.

Мы видим, что облако стационарно и не расплывается в течение, по крайней мере, 9 часов, а затем на этом месте появляется просвет в облачности.



а



б

в

Рис. 10. а) прямоугольный просвет в облачности над о. Тайвань за 9 суток до землетрясения $M=6,4$ на юге Тайваня 05.02.2016 [Ouzounov et al., 2019];

б) распределение поправки химического потенциала над о. Тайвань 26.01.2016; в) распределение относительной влажности над о. Тайвань 26.01.2016. /

Fig. 10. a) rectangular clearance in the clouds over the island Taiwan 9 days before the earthquake $M = 6.4$ in the south of Taiwan 05.02.2016 [Ouzounov et al., 2019];

b) distribution of the correction of the chemical potential over island Taiwan 26.01.2016; c) the distribution of relative humidity over the island Taiwan 26.01.2016.

Теперь обратимся к другому типу ЛОА – каньонам (просветам) внутри массива мощной облачности. Они также появляются в зоне подготовки сильных землетрясений и являются индикаторами финальной стадии процесса подготовки землетрясения. Один из примеров такой структуры, сформировавшийся в Тихом океане на запад от побережья Южной Калифорнии и Мексики показан на рисунке 9.

На рисунке показаны облачная структура, полученная со спутника GOES 18.09.2017 в 23:30 UT, а ниже – распределение атмосферных параметров на высоте 100 м, полученные за два с половиной часа до снимка GOES. Как видно из рисунка, наблюдается картина, противоположная линейным облакам: мы видим повышенные значения поправки химического потенциала и температуры воздуха, и пониженные – относительной влажности. На всех рисунках структура ЛОА отмечена красной линией.

Последним в серии геометрических облачных структур рассмотрим структуры правильной геометрической формы (прямоугольники, круги, прямые углы и др.). Предполагая, что все они имеют одинаковую природу рассмотрим только один пример – прямоугольный просвет облачности над островом Тайвань по данным спутника Aqua от 26.01.2016 г. (рис. 10а).

Из распределения поправки химического потенциала и относительной влажности, представленных на рисунках 10б-в, мы можем сделать вывод, что также как для ЛОА типа каньонов мы наблюдаем повышение химического потенциала и понижение относительной влажности над областью ЛОА в виде просвета в облачности. Мало того, влажность над восточной частью Тайваня, т. е. над сушей, выше, чем над океаном на запад от острова.

О природе ЛОА

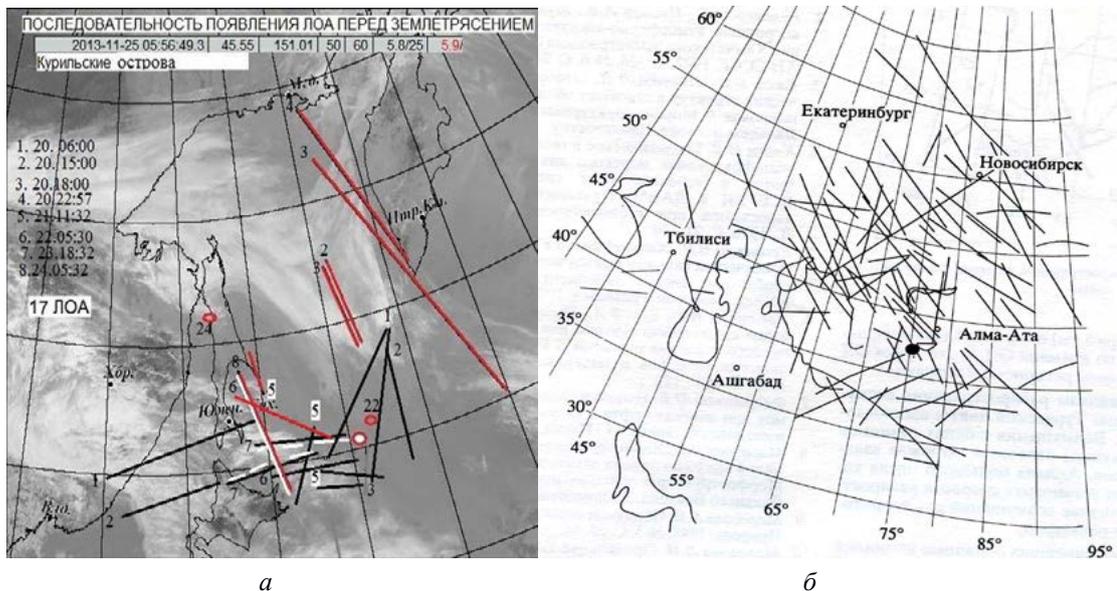


Рис. 11. а) Последовательность появления ЛОА перед землетрясением 25.11.2013 г. $M=5,9$ на Курильских о-вах; б) Схема облачных линейментов (за 18 дней) перед Сусамырским землетрясением $M=7,3$ у озера Иссык-Куль. /

Fig. 11. a) The sequence of the appearance of LCA before the earthquake of 25.11.2013, $M = 5.9$ on the Kuril Islands; b) Scheme of cloud lineaments (for 18 days) before the Susamyr earthquake $M = 7.3$ near Lake Issyk-Kul.

Последний пример прямоугольной аномалии показывает, что существующее ранее представление об отождествлении положения разлома на местности с линейной облачной аномалией над ним и возможности картирования по ЛОА разломов на дне акваторий, выявлении их активизации в реальном времени не всегда соответствует действительности.

В частности, существует предположение, что ЛОА могут образовываться над осями сжатия земной коры, лишь иногда совпадающими с разломами. В работе Рогожина [2013] представлена схема линий простираения горизонтальных проекций осей сжатия в очагах форшоков сильнейших Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. Подобное хаотическое распределение можно видеть на рисунке 11а, где представлено распределение мелкомасштабных линейных облачных структур в районе Курильских островов, появившихся в течение нескольких суток с 20 по 24 ноября 2013 г. перед землетрясением $M=5,925$ ноября. Последовательность и ориентация ЛОА отмечены на рисунке пронумерованными линиями и датами появления этих ЛОА. Такие распределения мелкомасштабных ЛОА отмечались Морозовой еще в 1996 г. На рисунке 11б представлено суммарное количество облачных линеаментов (за 18 дней) перед Сусамырским землетрясением $M=7,3$ у озера Иссык-Куль. По Ю. С. Геншафту (2009), «появление облачных аттракторов («улиц» облаков) в области, близкой к сейсмофокальной, свидетельствует о том, что причины землетрясений – случайные колебания любого фактора, воздействующие на неустойчивую, находящуюся в напряженно-деформационном состоянии среду».

Очевидно, что появление ЛОА не может быть обусловлено исключительно атмосферными процессами, с другой стороны, в облачности почему-то отображаются лишь некоторые разломы. Причина заключается в том, что разлом оказывает влияние на атмосферу только в моменты тектонической или энергетической активности. Иначе говоря, линейные облачные аномалии имеют литосферную природу, и их появление служит сигналом, свидетельствующим о начале активизации геодинамических процессов. Такие процессы часто завершаются землетрясением, а значит, мониторинг ЛОА – это еще один возможный способ заблаговременно выявить надвигающуюся катастрофу.

Причиной возникновения облачных гряд, наблюдающихся только в приземном слое атмосферы и имеющих небольшую протяженность, может быть повышенная концентрация металлизированных флюидов, водорода и радона в зоне разлома. В частности, именно согласно модели [Пулинец и др., 2015] выделение радона приводит к изменению параметров приземного слоя атмосферы, которые можно было наблюдать одновременно с ЛОА на рисунках 3-10. Однако резкая линейная граница размывания облачности на её периметре или внутри облачного массива от её нижней границы до высот 12-16 км на протяжении нескольких сотен километров не может быть обусловлена только флюидами и аэрозолями: они размывались бы воздушными потоками и не образовывали бы вертикальных стенок как внутри облачного массива, так и на его границе. Ни один процесс в атмосфере, в среде с низкой вязкостью, не может дать такой резкой границы. Однако ионизация приземного слоя атмосферы меняет не только термодинамические параметры атмосферы, но и локально воздействует на параметры Глобальной Электрической Цепи (ГЭЦ) [Pulinets, Davidenko, 2014]. Физический механизм образования линейных облачных структур в виде гряд и каньонов был предложен в работе [Pulinets, Ouzounov, 2011]. Фактически, вертикальное электрическое поле, генерируемое над разломом (или

осью сжатия) может служить той «стенкой», которая поддерживает резкие линейные границы облачной аномалии. С помощью этого поля формируется ток положительных или отрицательных кластерных ионов, которые в процессе гидратации становятся центрами конденсации влаги. С другой стороны, как показывает пример, приведенный на рисунке 4, нельзя уменьшать значение акустических воздействий на атмосферу как в диапазоне инфразвуковых колебаний, так и более низкочастотных и долгоживущих акустико-гравитационных волн.

Учитывая, что речь идет о литосферно-атмосферных связях, как показывает настоящее исследование, уже в нижнем слое атмосферы у поверхности земли (или океана) образуется протоструктура, которая в результате на высотах 6-16 км формирует специфические линейные облачные структуры, называемые ЛОА, появляющиеся за несколько суток над зоной подготовки сильных землетрясений.

Использование ЛОА в задачах прогноза землетрясений

На спутниковых снимках с координатной привязкой дислокация ЛОА позволяет определить географическое расположение активизировавшихся разломов. По тому, как оно изменяется с течением времени, можно судить о направлении и скорости распространения напряжений в земной коре в региональном и глобальном масштабе.

Главной задачей при изучении любого предвестника землетрясений и использования его в эмпирическом прогнозе является установление связи времени возникновения предвестника (интервала времени от момента его появления до момента землетрясения) с энергией землетрясения. Установлено, что число землетрясений, при которых количество ЛОА составляло три и более, росло с увеличением энергии землетрясений. Так, для землетрясений с $M < 4,5$ такое количество ЛОА наблюдалось лишь в 26% случаев, а для катастрофических – в 83% [Морозова, 2012].

Возникновение ЛОА в периоды сейсмических событий может являться следствием не только энергетических пульсаций в разломах, но и тектонических подвижек. После исчезновения импульса геофизического поля в разломе облака вновь беспрепятственно проходят над ним в соответствии с атмосферной циркуляцией.

Территория (или акватория), которая находится под влиянием сейсмического процесса, может быть весьма обширной. Значит, сделать достоверный прогноз разрушительного землетрясения можно только в тех районах, где постоянно действует система наблюдений за предвестниками, способная одновременно охватывать область радиусом не менее 500 км. К сожалению, существующие сети геофизического контроля способны охватывать территории в десятки раз меньше. В то же время зона радиовидимости спутникового центра может простираться на многие тысячи километров, поэтому наиболее подходящей системой слежения за глобальной сейсмической активностью представляет спутниковый мониторинг линейных облачных аномалий. Дистанционное зондирование Земли с орбит искусственных спутников достаточно точно определяет основные параметры атмосферы, в частности вертикальные и горизонтальные размеры облачных массивов.

Осуществлять сейсмический мониторинг вполне по силам уже существующей глобальной сети спутников, с которых поступают данные для прогнозирования погоды. Регламент орбитальных наблюдений за облачным покровом Земли вполне удобен для оперативной регистрации ЛОА. Данные со спутников поступают в

режиме непосредственной передачи, скорость обработки информации достаточно высокая, так что результат можно получить за считанные минуты.

Иначе говоря, линейные облачные аномалии имеют литосферную природу, и их появление служит сигналом, свидетельствующим о начале активизации геодинамических процессов. Такие процессы часто завершаются землетрясением, а значит, мониторинг ЛОА – это еще один возможный способ заблаговременно выявить надвигающуюся катастрофу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предвестником сильных землетрясений служит появление протяженной облачной гряды или каньона в регионе будущего землетрясения, а также формирование облачных конфигураций или просветов в облачности правильной геометрической формы. Регион будущего землетрясения обозначается на снимке, сформировавшимся позже роем коротких ЛОА за несколько часов (иногда 3-5 суток) до толчка [Морозова, 2008].

Каждому типу ЛОА соответствует протоструктура у поверхности земли, форма которой соответствует форме ЛОА. Просветам облачности соответствуют повышенная температура, пониженная влажность и повышенное значение химического потенциала. Облачным структурам, наоборот, соответствуют пониженная температура у поверхности земли, повышенная влажность и пониженное значение химического потенциала по сравнению с поверхностью, окружающей пространство аномалии. Главным отличием как ЛОА, так и протоструктур у поверхности земли от обычных облаков является их время жизни, которое может составлять до 9-12 часов.

Точно указать положение эпицентра по ЛОА невозможно. Появление на снимках роя из трех и более ЛОА, либо еще и безоблачного пятна повышает вероятность землетрясения до 82% [Морозова, 2015а]. Вероятность прогноза катастрофического сейсмического события по аномально большому числу ЛОА может быть достаточно высокой, гораздо выше той, с какой землетрясения прогнозируются на основе только сейсмических наблюдений.

К сожалению, один только спутниковый мониторинг облачных аномалий помогает уверенно прогнозировать лишь регион и время начала землетрясения (с точностью до суток). Ближайшая цель – организация синхронной регистрации и совместной обработки ЛОА и сейсмических полей, что позволит в значительной мере усовершенствовать методику прогнозирования землетрясений.

Достоверный прогноз разрушительного землетрясения можно осуществлять только в тех районах, где установлена постоянно действующая система наблюдений за предвестниками, охватывающая область с линейными размерами более 1000 км. Такой системой может быть спутниковый мониторинг активизированных разломов по их геоиндикатору – ЛОА. Существующая глобальная сеть сбора спутниковых данных для прогноза погоды может быть использована и для сейсмического прогнозирования.

Спутниковый мониторинг облачных аномалий позволяет оперативно обнаружить регион вероятного сильного землетрясения. Результаты статистической обработки связей параметров ЛОА с магнитудой землетрясений и положений гипоцентров оказались одинаковыми для различных регионов Земли.

Грозовые облака аномальных размеров также целесообразно включать в мониторинг сейсмичности.

Спутниковый мониторинг сейсмичности в Азиатско-Тихоокеанском регионе, включающем огромные закрытые территории, является единственным средством наблюдения в реальном времени, а потому предпочтительнее наземного, основанного на обработке результатов всех типов сейсмометров. Он дает значительный выигрыш во времени – главнейшем факторе при прогнозе стихийных явлений. Однако спутниковые снимки должны применяться в комплексе с другими методами, обуславливая более надежные прогнозы положения эпицентра. Методы геофизической разведки с использованием спутниковых снимков характеризуются дешевизной и экологической чистотой, так как геологическая среда не подвергается воздействию искусственных источников поля. Мониторинг облачных аномалий – ЛОА и грозовых очагов – может стать дистанционным контролем тектонической активности региона с целью обеспечения безопасности больших инженерных сооружений – плотин, аэродромов, АЭС.

Согласно Уломову [1998, с. 166] «В недалеком будущем по аналогии с метеорологией окажется возможным широкомасштабный прогноз сейсмической погоды, благодаря регулярному составлению специальных синоптических карт, характеризующих направленность развития сейсмогеодинамических процессов в крупных регионах на трансрегиональном и глобальном уровнях» [Уломов, 1998, с. 166].

Комплексирование различных методов дистанционного мониторинга краткосрочных предвестников землетрясений, включающих мониторинг тепловых и ионосферных предвестников [Ouzounov et al., 2018; Pulinets, Ouzounov, 2018] позволит определять не только время, но и положение эпицентра и магнитуду землетрясения. «Привлечение дистанционных методов позволит решить задачи мониторинга обширных сейсмоактивных территорий в режиме реального времени с наименьшими затратами» [Киссин, с. 158, 2013]. Академик Кондратьев – основоположник спутниковой метеорологии, еще в 1996 г. утверждал, что «Мониторинг облачных аномалий на спутниковых снимках служит для оценки сейсмической опасности и позволяет учитывать неотектоническую активность региона. Космические исследования различных природных явлений и процессов дали так много принципиально нового для естественных наук, что можно говорить о новом этапе в их развитии» [Григорьев, Кондратьев, 1996, с. 70].

Дальнейшее развитие способов спутникового мониторинга природных явлений и катастроф – актуальная задача современной науки. Дальнейшее исследование обнаруженного атмосферного геоиндикатора сейсмического процесса не только принесет практическую пользу, но и расширит существующие представления о природе последнего. Разработка нового научного направления поможет открыть следующую страницу в изучении сейсмичности, разрывной тектоники, в осуществлении экологического контроля подземных ядерных взрывов.

Литература

1. Авенариус И. Г., Буш В. А., Трещов А. А. Использование космических снимков для изучения тектонического строения шельфов. // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. – М.: Наука, 1985. – С. 163-172.
2. Вернадский, В. И. О газовом обмене земной коры. // Известия Императорской академии наук. Серия 6. – 1912. – Т. 6. Вып. 2. – С. 141-162.

3. Григорьев А. А., Кондратьев К. Я. Спутниковый мониторинг природных и антропогенных катастроф. // Исследования Земли из космоса. – 1996. – №3. – С. 68-78.
4. Добровольский И. П. Теория подготовки сильного тектонического землетрясения. // Физика Земли. – 1992. – №6. – С. 31-47.
5. Ежов, Б. В. Проявление очаговых морфоструктур в строении облачности и ледового покрова акваторий на примере Охотского моря и Камчатки. // Морфоструктуры центрального типа Сибири и Дальнего Востока. – Владивосток. – 1988. – С. 124-128.
6. Ежов Б. В., Ищенко Л. И. Отображение тектонических структур в строении облачного и ледового покровов. // Морфоструктурные исследования на Дальнем Востоке. – Владивосток: Дальнаука, 1983. – С. 114-119.
7. Еременко В. Я., Каттерфельд Г. Н. Использование космических снимков при изучении региональных и глобальных систем линейных элементов Земли. // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1978. – № 10. – С. 23-29.
8. Киссин И. Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений. // Физика Земли. – 2013. – №4. – С. 145-160.
9. Кобец Н. В. Геологическое и геоморфологическое дешифрирование морского дна по космическим фото- и телевизионным снимкам. // Труды ВСЕГЕИ и ЛАЭМ. Применение новых видов аэросъемок при геологических исследованиях. – Л.: ВСЕГЕИ, 1976. – С. 21-34.
10. Морозова Л. И. Проявление Главного Уральского разлома в поле облачности на космических снимках. // Исследование Земли из космоса. – 1980. – №3. – С. 101-103.
11. Морозова Л. И. Облачные индикаторы геодинамики земной коры. // Физика Земли. – 1993. – №10. – С. 108-112.
12. Морозова Л. И. Способ определения тектонической активности территории в реальном масштабе времени. // Патент 11-2084. 51-5G01V9/00.21 – ИНДР 9400316.1 (22) Республика Узбекистан. / Л. И. Морозова. Опубл. 26.04.1994, Бюл. №3 (5). – С. 115.
13. Морозова Л. И. О современных тектонических процессах Туранской плиты и ее горного обрамления (по динамике линейных облачных аномалий над разломами и землетрясениям). // Физика Земли. – 1997 а. – №5. – С. 65-72.
14. Морозова Л. И. Динамика облачных аномалий над разломами в периоды природной и наведенной сейсмичности. // Физика Земли. – 1997б. – С. 94-96.
15. Морозова Л. И. Спутниковый мониторинг землетрясений. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 136с.
16. Морозова Л. И. Опыт использования предвестников на спутниковых снимках в анализе землетрясений. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 132 с.
17. Морозова Л. И. Спутниковый мониторинг: отображение и выявление геоэкологических аномалий и катастроф в Дальневосточном регионе России. // Инженерная экология. – 2008. – №4. – С. 24-31.
18. Морозова Л. И. Облака предвестники землетрясений. // Наука из первых рук. – 2011. – №4 (40). – С. 104-115. http://sciencefirsthand.ru/c40_05_01_morozova.shtml
19. Морозова Л. И. Проявление геодинамической активности земной коры в облачных полях. // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. №4. – С. 541-550.
20. Морозова Л. И. Предвестники сильных землетрясений Охотоморской плиты на спутниковых снимках. // Вестник ОНЗ РАН. – 2015а. – Т. 7. <http://onznews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>
21. Морозова Л. И. Предвестники землетрясения в Непале 28 апреля 2015 г. (M = 7,9) на спутниковых метеорологических снимках. // Вестник ОНЗ РАН. – 2015б. – Т. 7. <http://onznews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>
22. Мушкетов И. В., Мушкетов Д. И. Физическая геология. Т. 1. – Л.: МОНТН НКТП, 1935. – 908 с.
23. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В., Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизи-

ческих процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, стимулируемых ионизацией. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2015. – № 55. Вып. 4. – С. 521-538. 2015DOI: 10.7868/S0016794015040136

24. Рогожин Е. А. Применение тектонофизических подходов в решении сейсмотектонических задач (на примере Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. на Средних Курилах). // *Физика Земли*. – 2013. – № 5. – С. 47-57.

25. Уломов В. И. Синергетические явления в литосфере и синоптический прогноз сейсмической погоды. // *Структурная организация и взаимодействие упорядоченных социоприродных систем*. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – С. 151-166.

26. Флоренский П. В. Комплекс геолого-геофизических и дистанционных методов для изучения нефтегазоносных областей. – М.: Недра, 1987. – 205 с.

27. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. // *Pure Appl. Geophys.* – 1979. – Vol. 117. No. 5. – pp. 1025–1044.

28. Guo G., Jie Y. Three Attempts of Earthquake Prediction with Satellite Cloud Images. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2013. – No. 13. – pp. 91-95. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-91-2013>

29. Gup G., Xie G. Earthquake cloud over Japan detected by satellite. // *International Journal of Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 28. – pp. 5375-5376.

30. Liperovsky V. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V., Davidov V. F., Bogdanov V. V.: On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2005. – No. 5. – pp. 783-789, <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>, 2005.

31. Ouzounov D., Pulinets S., Liu J-Y, Hattori K., Han P. Multiparameter Assessment of Pre-Earthquake Atmospheric Signals. // In: *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, Editors (s): Dimitar Ouzounov, Sergey Pulinets, Katsumi Hattori, Patrick Taylor, Publisher: AGU/Wiley. – 2018. – pp. 339-359. doi.org/10.1002/9781119156949.ch20

32. Ouzounov D., Pulinets S., Parrot M., Shen X., Zhang X., Liu T., Hattori K., Davidenko D., Rozhnoi A., Solovieva M., Genzano N., Marchese F., Hernández-Pajares M., García-Rigo A. Validation of the Geosphere Coupling Phenomena Linked to Major Earthquake and Volcanoes Activities by Analyzing Atmospheric. // *Ionospheric Transitional Signals*, IUGG General Assembly, Montreal, Canada, 8-18 July 2019. – 2019.

33. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 41. – pp. 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>

34. Pulinets S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. // *Advances in Space Research*. – 2014. – Vol. 53. – pp. 709-723.

35. Pulinets S. A., Morozova L. I., Yudin I. A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. // *Research in Geophysics*. – 2014. – No. 4:4898. – pp. 45-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>

36. Pulinets S., Ouzounov D. The possibility of earthquake forecasting. // *Learning from Nature*, IOP Publishing, Bristol, December. – 2018. – 167 p. DOI 10.1088/978-0-7503-1248-6, 2018.

References

1. Avenarius I. G., Bush V. A., Treshchov A. A. Using satellite images to study the tectonic structure of the shelves. *Geology and Geomorphology of Shelves and Continental Slopes*. Moscow. Nauka, 1985. pp. 163-172. (In Russ.)

2. Vernadskii V. I. On the gas exchange of the earth's crust. *News of the Imperial Academy of Sciences. Series 6*. 1912. Vol. 6. Issue. 2. pp. 141-162. (In Russ.)

3. Grigor'ev A. A., Kondrat'ev K. Ya. Satellite monitoring of natural and anthropogenic disasters. *Research of the Earth from space*. 1996. No. 3. pp. 68-78. (In Russ.)

4. Dobrovolskii I.P. The theory of preparation of a strong tectonic earthquake. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1992. No. 6. pp. 31-47. (In Russ.)
5. Ezhov B.V. Manifestation of focal morphostructures in the structure of cloudiness and ice cover of water areas by the example of the Okhotsk Sea and Kamchatka. *Morphostructures of the central type of Siberia and the Far East*. Vladivostok. 1988. pp. 124-128. (In Russ.)
6. Ezhov B.V., Ishchenko L.I. Display of tectonic structures in the structure of cloudy and ice sheets. *Morphostructural studies in the Far East*. Vladivostok. Dalnauka, 1983. pp. 114-119. (In Russ.)
7. Eremenko V.Ya., Katterfel'd G.N. The use of space images in the study of regional and global systems of Earth lineaments. *Izvestiya. Universities. Geology and exploration*. 1978. No. 10. pp. 23-29. (In Russ.)
8. Kissin I.G. On a systematic approach to the problem of earthquake prediction. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013. No. 4. pp. 145-160. (In Russ.)
9. Kobets N.V. Geological and geomorphological interpretation of the seabed from space photographs and television images. In: *Proceedings of VSEGEI and LAEM. Application of new types of aerial surveys in geological research*. Leningrad. VSEGEI, 1976. pp. 21-34. (In Russ.)
10. Morozova L.I. Manifestation of the Main Ural Fault in a cloudy field on satellite images. *Exploration of the Earth from space*. 1980. No. 3. pp. 101-103. (In Russ.)
11. Morozova L.I. Cloud indicators of the geodynamics of the earth's crust. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1993. No. 10. pp. 108-112. (In Russ.)
12. Morozova L.I. A method for determining the tectonic activity of a territory in real time. Patent 11-2084. 51-5G01V9/00.21-INDR 9400316.1 (22) Republic of Uzbekistan. Publ. 04/26/1994, Bul. No. 3 (5).p. 115. (In Russ.)
13. Morozova L.I. On the modern tectonic processes of the Turan plate and its mountain frame (according to the dynamics of linear cloud anomalies above faults and earthquakes). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1997a. No. 5. pp. 65-72. (In Russ.)
14. Morozova L.I. Dynamics of cloud anomalies over faults during periods of natural and induced seismicity. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1997b. pp. 94-96. (In Russ.)
15. Morozova L.I. Satellite monitoring of earthquakes. Vladivostok. Dalnauka, 2005. 136 p. (In Russ.)
16. Morozova L.I. Experience of using precursors on satellite images in the analysis of earthquakes. Vladivostok. Dalnauka, 2007. 132 p. (In Russ.)
17. Morozova L.I. Satellite monitoring: displaying and identifying geo-ecological anomalies and catastrophes in the Far East region of Russia. *Engineering ecology*. 2008. No. 4. pp. 24-31. (In Russ.)
18. Morozova L.I. Clouds precursors of earthquakes. *Science First Hand*. 2011. No. 4 (40). pp. 104-115. http://sciencefirsthand.ru/c40_05_01_morozova.shtml (In Russ.)
19. Morozova L.I. Manifestation of geodynamic activity of the earth's crust in cloudy fields. *Geology and Geophysics*. 2012. Vol. 53. No. 4. pp. 541-550. (In Russ.)
20. Morozova L.I. Harbingers of strong earthquakes of the Okhotomorsk plate in satellite images. *Vestn. Otd. Nauk Zemle RAN*. 2015a. Vol. 7. <http://onznnews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>. (In Russ.)
21. Morozova L.I. Precursors of the earthquake in Nepal on April 28, 2015 ($M = 7.9$) in satellite meteorological images. *Vestn. Otd. Nauk Zemle RAN*. 2015b. Vol. 7. <http://onznnews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>. (In Russ.)
22. Mushketov I.V., Mushketov D.I. *Physical geology*. Vol. 1. Leningrad. MONTN NKTP, 1935. 908 p. (In Russ.)
23. Pulinets S.A., Uzunov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V. Physical foundations of generation of short-term precursors of earthquakes. Complex model of geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system, stimulated by ionization. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. No. 55. Issue 4. pp. 521-538. 2015. DOI:10.7868/S0016794015040136. (In Russ.)

24. Rogozhin E.A. Application of tectonophysical approaches in solving seismotectonic problems (on the example of the Simushir earthquakes on November 15, 2006 and January 13, 2007 in the Middle Kuril Islands). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013. No. 5. pp. 47-57. (In Russ.)
25. Ulomov V.I. Synergetic phenomena in the lithosphere and synoptic forecast of seismic weather. Structural organization and interaction of ordered socio-natural systems. Vladivostok. Dalnauka, 1998. pp. 151-166. (In Russ.)
26. Florenskii P.V. Complex of geological-geophysical and remote sensing methods for studying oil and gas bearing areas. Moscow. Nedra, 1987. 205 p. (In Russ.)
27. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Appl. Geophys.* 1979. Vol. 117. No. 5. pp. 1025-1044.
28. Guo G., Jie Y. Three Attempts of Earthquake Prediction with Satellite Cloud Images. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. No. 13. pp. 91-95. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-91-2013>
29. Gup G., Xie G. Earthquake cloud over Japan detected by satellite. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28. pp. 5375-5376.
30. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., Bogdanov V.V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2005. No. 5. pp. 783-789, <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>.
31. Ouzounov D., Pulinets S., Liu J-Y, Hattori K., Han P. Multiparameter Assessment of Pre-Earthquake Atmospheric Signals. In: *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, Editors (s): Dimitar Ouzounov, Sergey Pulinets, Katsumi Hattori, Patrick Taylor, Publisher: AGU/Wiley. 2018. pp. 339-359. doi.org/10.1002/9781119156949.ch20.
32. Ouzounov D., Pulinets S., Parrot M., Shen X., Zhang X., Liu T., Hattori K., Davidenko D., Rozhnoi A., Solovieva M., Genzano N., Marchese F., Hernández-Pajares M., García-Rigo A. Validation of the Geosphere Coupling Phenomena Linked to Major Earthquake and Volcanoes Activities by Analyzing Atmospheric. Ionospheric Transitional Signals, IUGG General Assembly, Montreal, Canada, 8-18 July 2019. 2019.
33. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. Vol. 41. pp. 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>
34. Pulinets S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. *Advances in Space Research*. 2014. Vol. 53. pp. 709-723.
35. Pulinets S.A., Morozova L.I., Yudin I.A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. *Research in Geophysics*. 2014. No. 4:4898. pp. 45-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>.
36. Pulinets S., Ouzounov D. The possibility of earthquake forecasting. *Learning from Nature*, IOP Publishing, Bristol, December. 2018. 167 p. DOI 10.1088/978-0-7503-1248-6, 2018.

УДК 55:504.75:550.348

DOI:

Оригинальная статья

Изучение изменений во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды

М. Г. Попов , О. Г. Попова 

Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г.
Москва, Ленинские горы, д. 1, e-mail: mgropov@list.ru, oksana-p@list.ru

Статья поступила: 05.08.2020, доработана: 31.08.2020, одобрена в печать: 02.09.2020

Резюме: Актуальность работы. При оценке сейсмической и экологической опасности напряженно-деформированное состояние геологической среды является важнейшей геодинамической характеристикой районов гидравлических (ГЭС) и атомных (АЭС) электростанций, предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), химической промышленности, стратегически важных объектов, густонаселенных мегаполисов и курортных районов. **Цель работы.** В статье обобщены полученные результаты значений геодинамических показателей напряженно-деформированного состояния среды для разных по своей тектонической активности районов РФ. **Методы исследования.** Локальный сейсмо-экологический мониторинг (ЛСЭМ) позволяет оценивать значения геодинамических показателей анизотропности γ и напряженного состояния среды S по энергии обменных волн PS от далеких землетрясений. Эти показатели характеризуют состояние среды во времени и в пространстве. Наблюдения во всех регионах проводились с помощью локальной сети (площадная расстановка) трех компонентными станциями типа Дельта-Геон. **Результаты.** Приведены основные закономерности изменения значений геодинамических показателей для одного интервала глубин: диапазон значений γ и S в районах разной тектонической активности, цикличность их изменений и влияние на них внешних природных факторов (Луны, Солнца, солнечной активности и т. д.). По результатам самых длительных наблюдений ЛСЭМ (1995-2006г) на Кавминводском полигоне (сейсмоопасный Минераловодский регион) получены 3-х мерные модели показателя анизотропности γ и проведена оценка показателей напряженного состояния S на разных уровнях глубин. Показано, что характер распределения показателя анизотропности γ непрерывно изменяется по глубине, латерали и во времени. Выявлена цикличность в изменении показателя S во времени на всех глубинах. Создание таких 3-х мерных моделей и для других особо важных объектов позволит дать более объективную картину напряженно-деформированного состояния геологической среды, что требует, однако, более длительных наблюдений.

Ключевые слова: локальный сейсмо-экологический мониторинг, обменные волны PS от далеких землетрясений, геодинамические показатели напряженного состояния среды.

Для цитирования: Попов М. Г., Попова О. Г. Изучение изменений во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды. *Геология и Геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 79 – 93. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x

DOI:

Original paper

Study of Changes in Time and in Space of Stressed State of Geological Environment

M. G. Popov^{ORCID}, O. G. Popova^{ORCID}

Lomonosov Moscow State University, 1 Lenin Hills, Moscow 119991, Russian Federation,
e-mail: mgpopov@list.ru, oksana-p@list.ru

Received: 05.08.2020, revised: 31.08.2020, accepted: 02.09.2020

Abstract: Relevance. When assessing seismic and environmental hazards, the stress-strain state of the geological environment is the most important geodynamic characteristic of the areas of hydraulic (HPP) and nuclear (NPP) power plants, nuclear fuel cycle (NFC) enterprises, the chemical industry, strategically important objects, densely populated megacities and resort areas. **Aim.** The article summarizes the results obtained for the values of the geodynamic indicators of stress-strain state of the medium for regions of the Russian Federation that are different in their tectonic activity. **Methods.** Local seismic-ecological monitoring (LSEM) allows us to assess the values of the geodynamic indicators of anisotropy and the stress state of the medium S from the energy of the exchange waves PS from distant earthquakes. These indicators characterize the state of the environment in time and space. Observations in all regions were carried out using a local network (areal arrangement) of three component stations of the Delta-Geon type. **Results.** The basic laws of changing the values of geodynamic indicators for one depth interval are presented: the range of γ and S values in regions of different tectonic activity, the cyclical nature of their changes, and the influence of external natural factors (the Moon, the Sun, solar activity, etc.) on them. According to the results of the longest observations of the LSEM (1995-2006) at the Kavminvodsky test site (seismic hazardous Mineralovodsk region), 3-dimensional models of the anisotropy index were obtained and stress state indicators S were evaluated at different depth levels. It is shown that the nature of the distribution of the anisotropy index continuously varies in depth, laterally, and in time. The cyclical nature of the change in S over time at all depths is revealed. The creation of such 3D models for other particularly important objects will allow us to give a more objective picture of the stress-strain state of the geological environment, which requires, however, longer observations.

Keywords: local seismic and environmental monitoring, PS exchange waves from distant earthquakes, geodynamic indicators of the stress state of the environment.

For citation: Popov M. G., Popova O. V. Study of Changes in Time and in Space of Stressed State of Geological Environment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. 10 (3): 79 – 93. (In Russ.) DOI: xx. xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

Введение

С позиций геодинамики и оценки сейсмического риска важнейшая характеристика верхней части земной коры – ее напряженно-деформированное состояние. Оценка тектонических полей напряжений и факторов, определяющих энергетику возможных сейсмических событий, существенно влияет на правильность выбора места проектирования и строительства мегаполисов, курортных территорий и особо опасных объектов в аспекте обеспечения их безопасности.

При оценке сейсмической и экологической опасности районов гидро- (ГЭС) и атомных (АЭС) электростанций, предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ),

химической промышленности, стратегически важных объектов и густонаселенных мегаполисов необходим геофизический мониторинг напряженно-деформированного состояния геологической среды, в частности, сейсмический мониторинг [Гамбурцев, 1982]. В густонаселенных урбанизированных районах проведение сейсмического мониторинга с искусственными источниками вызывает много организационных трудностей. Поэтому в настоящее время при проведении мониторинга используются волны от естественных источников. В основном проводят локальный сейсмо-экологического мониторинг (ЛСЭМ) геологической среды [Попова и др., 2008, 2016; Солодилов и др., 1999].

Рассмотрен опыт проведения ЛСЭМ в ряде регионов Российской Федерации с разным геотектоническим режимом (сейсмоопасные зоны, платформы) для определения возможного прогноза напряженного состояния среды при проектировании и строительстве особо опасных объектов, при строительстве высотных зданий в мегаполисах, а также в областях высокой сейсмической опасности, особенно в курортных регионах.

Методика наблюдений и интерпретаций

Проанализированы результаты непрерывного сейсмо-экологического мониторинга в следующих регионах: 1) сейсмоопасные районы (район Кавказских Минеральных вод, районы Геленджика и Камчатки), 2) Московский мегаполис, 3) районы планируемых и действующих особо опасных объектов (Северская АЭС, Кольская АЭС, Белоярская АЭС, Нижегородская АЭС, Тверская АЭС) [Попова и др., 2008, 2016а, б, 2017]. Длительность наблюдения в разных регионах колебалась от 2-3 месяцев до 11 лет в зависимости от задач мониторинга.

Для наблюдения использовались цифровые 3-х компонентные станции типа Дельта-Геон в модификациях 1-3 [Попова и др., 2001, 2008; Солодилов и др., 1999]. Станции Дельта – Геон были укомплектованы сейсмоприемниками СК-1П (собственная частота 1Гц), которые преобразуют механические колебания грунта в электрические и состоят из одной вертикальной компоненты (Z) и двух горизонтальных компонент (X и Y). Компоненты сейсмоприемника ориентировались строго фиксировано и одинаково, горизонтальная компонента X – на север, горизонтальная компонента Y – на восток и вертикальная компонента Z – вверх на зенит. При проведении локального сейсмического мониторинга в указанных выше регионах использовалась площадная расстановка пунктов наблюдения (локальная сеть). Площадь исследования обычно составляла порядка 60*60 км. Оптимальное количество станций на площади сети наблюдений 10-15, но не менее 5-7. Расстояние между станциями составляло 12-20 км, оптимально – 16 км. Во время наблюдений регулярно, обычно один раз в сутки, производилась запись калибровочного импульса определенной формы и амплитуды.

Оценка сейсмической и экологической опасности и напряженно-деформированного состояния геологической среды во времени на основе материалов ЛСЭМ решалась с использованием волн от естественных источников [Попова и др., 2001, 2008, 2016, 2017; Солодилов и др., 1999], в основном на основе записей далеких землетрясений. Оценивались геофизические параметры геологической среды в пространственно-временном аспекте и определялись зоны потенциальной геодинамической опасности (зоны риска).

Была разработана методика¹ обработки записей ЛСЭМ от естественных источников основанная на том, что энергия поперечных и обменных волн PS от далеких землетрясений (обменные волны PS также относятся к волнам поперечным) существенно зависит от степени трещиноватости, пористости, флюидизации и анизотропных свойств среды [Гик, 1997].

Анизотропные свойства среды и ее флюидонасыщенность в свою очередь определяются напряженным состоянием [Stampin, 1978, 1981]. В анизотропной среде распространяются не два, а три типа волн – одна продольная (P) и две поперечные (SV и SH); происходит т.н. расщепление поперечной волны. Волны типа SV и SH различаются по скорости распространения и поляризации. Расщепление поперечной волны является признаком анизотропной среды. Анализ записей обменных волн PS, по-разному поляризованных, типа SV и SH, позволяет изучать анизотропные свойства среды, которые в большой степени определяются ее напряженным состоянием [Stampin, 1978, 1981].

Степень напряженности обусловлена близостью или удаленностью от источников тектонических напряжений: горно-складчатых областей (орогенов), внутри-платформенных глубинных очагов.

Обменные проходящие волны PS от далеких землетрясений с эпицентральными расстояниями $\Delta > 30^\circ$ позволяют изучать среду непосредственно под точкой наблюдения [Померанцева, Мозженко, 1997], поскольку в этом случае лучи, вдоль которых распространяются колебания, близки к вертикали в отличие от взрывов, при которых трудно оценить, на каком участке пути от источника до приемника в среде произошли изменения.

Согласно разработанной методике в каждом пункте наблюдения геодинамического полигона по записям далеких землетрясений оцениваются два показателя:

– γ показатель анизотропности среды (безразмерная величина) под каждой точкой наблюдения: $\gamma = E_R/E_V$, где E_V и E_R – энергия радиальной (PS_V) и тангенциальной (PS_R) составляющих записи обменных волн от далеких землетрясений соответственно.

– S интегральный показатель напряженного состояния среды в районе наблюдения, определяемый расчетным путем на основе изучения распределения параметра γ по площади наблюдательной сети мониторинга [Попова и др., 2008].

Оба показателя являются безразмерными величинами. Показатель анизотропности [Попова и др., 2008] не следует путать с коэффициентом анизотропии χ [Шнеерсон, 2006]. Показатель анизотропности γ позволяет только констатировать наличие в среде анизотропии в большей или меньшей степени.

Для каждого пункта наблюдения исследуемого региона по энергии проходящих обменных волн далеких землетрясений (PS) рассчитывается значение показателя анизотропности γ [Попова и др., 2008] в выбранном диапазоне глубин (диапазоны глубин могут быть разными в зависимости от задач исследований). Далее строятся схемы распределения величины γ по площади исследования, соответствующие разным диапазонам глубин для разных интервалов времени наблюдения. Затем по специальной формуле [Попова и др., 2008] оценивается интегральный показатель напряженного состояния среды S для площади всей расстановки станций наблюдения. В результате можно получать зависимости изменения показателя S во времени

¹ Стандарт организации. СТО 93.020-2013/5 «Способ оценки напряженного состояния геологической среды с использованием сейсмических записей далеких землетрясений». <http://geoenv.ru/index.php/ru/info/innovations/innovatsii-i-standarty>.

и по глубине, а также набор схем распределения показателя γ для различных диапазонов глубин и разных интервалов времени.

Основные результаты изучения геодинамических показателей γ и S

Наиболее длительный непрерывный сейсмо-экологический мониторинг из всех выше перечисленных регионов проводился в регионе Минераловодского выступа (прогностический полигон Кавказских Минеральных Вод) (11 лет), Московского мегаполиса (2 года), Томского полигона (площадка под Северскую АЭС) (около 2-х лет), и Нижегородского полигона (площадка под Нижегородскую АЭС) (1 год). Именно по этим материалам удалось выявить закономерности изменения геодинамических показателей напряженного состояния среды γ и S во времени в разных средах и провести соответствующее обобщение [Попова и др., 2016, 2017, 2018].

Для большей части указанных выше регионов оценки показателей γ и S во времени проведены для одного диапазона глубин равном 0-30 км (согласно задачам исследования) (рис. 1). На основании анализа результатов [Попова и др., 2001, 2008, 2016а, б, 2017, 2018] сделаны следующие выводы:

– геодинамические показатели напряженного состояния в этом диапазоне глубин изменяются во времени в средах разной тектонической активности, однако уровень и контрастность изменений оценочных геодинамических показателей существенно в 100-10 раз отличаются в сейсмоопасных и в асейсмичных (платформенных) регионах [Попова и др., 2016а].

– выявлено влияние внешних природных факторов на изменение геодинамических показателей напряженного состояния среды, на усиление сейсмической активности, а также на амплитудно-частотные характеристики микросейсмического фона. К внешним природным факторам относятся: ежесуточные приливные воздействия Солнца и Луны, лунные и солнечные затмения, влияние Луны в различных ее фазах, солнечная активность (магнитные бури), изменение скорости вращения Земли, воздействие катастрофических далеких землетрясений [Николаев, 1994; Попова, 2007, 2008, 2016; Сытинский, 1989]

– установлена цикличность изменения показателей напряженного состояния среды с периодом 0,5 года и 1,0 год, связанная с изменением скорости вращения Земли, либо с климатическим фактором для регионов любой тектонической активности [Барсуков, 1994; Попова, 2008, 2016а; Шабаров, Тарасов, 2003; Brady, 1974]. Для сейсмоопасных областей выявлена также цикличность, связанная с циклом тектонической активности данного региона.

– разработаны критерии прогноза усиления сейсмической активности в сейсмоопасных регионах [Попова и др., 2008].

Все особенности изменения показателей напряженного состояния среды и амплитудно-частотных параметров микросейсмического фона в разных районах проведения ЛСЭМ позволили сделать вывод о необходимости проведения такого мониторинга на всех стадиях планирования и эксплуатации особо опасных объектов. Причем, в сейсмоопасных регионах такой мониторинг должен быть непрерывным, в платформенных регионах может быть циклическим. Выявленные среднесрочные критерии усиления сейсмической активности позволят заблаговременно оценить возможную опасность для предотвращения техногенных катастроф.

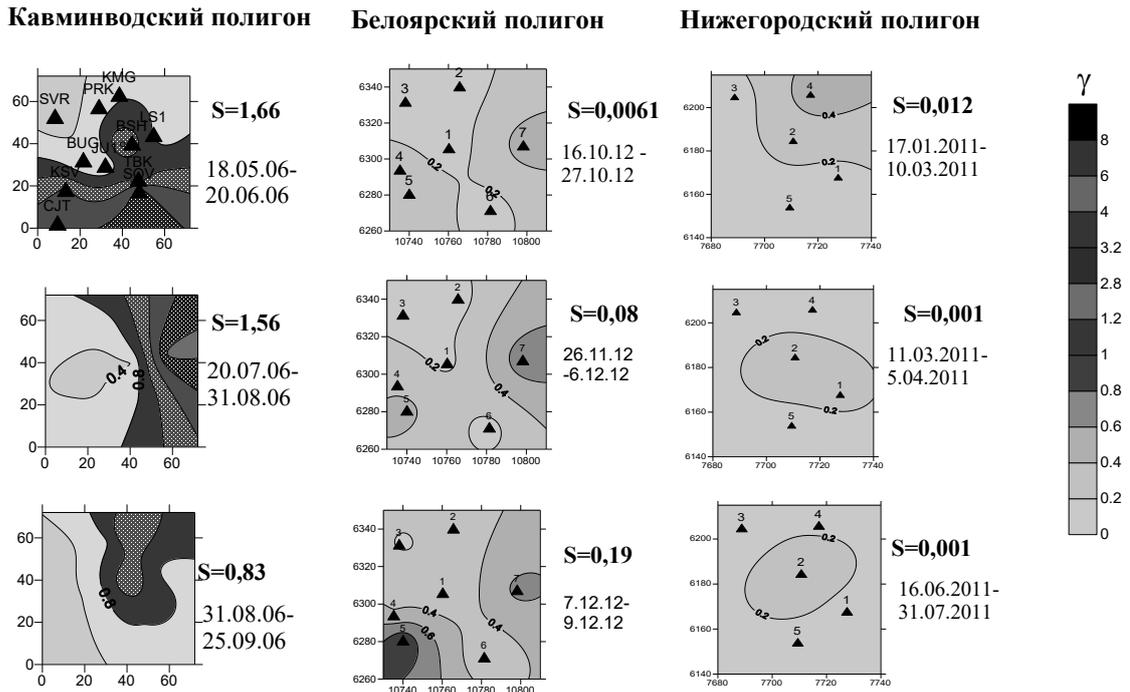


Рис. 1. Схемы распределения показателя анизотропности γ для Кавминводского, Белоярского и Нижегородского полигонов в разные интервалы времени для интервала глубин 0-30 км.

1 – пункты наблюдения. /

Fig. 1. Distribution schemes of the anisotropy index γ for the Kavminvodsky (on left), Beloyarsky (centered) and Nizhny Novgorod (on right) test sites at different time intervals for the depth interval 0-30 km 1 – observation points.

Для Кавминводского, Кольского и Нижегородского полигонов проведена оценка показателей напряженного состояния геологической среды γ и S для более дробного разбиения среды на глубинные интервалы [Попова и др., 2017, 2018]. Но только для Кавминводского полигона удалось выявить закономерности изменения показателей напряженного состояния геологической среды с глубиной, поскольку наблюдения мониторинга в этом регионе были самые длительные.

Изучение 3-хмерного распределения показателей анизотропности среды γ и напряженного состояния среды S в районе Кавминводского сейсмоопасного полигона

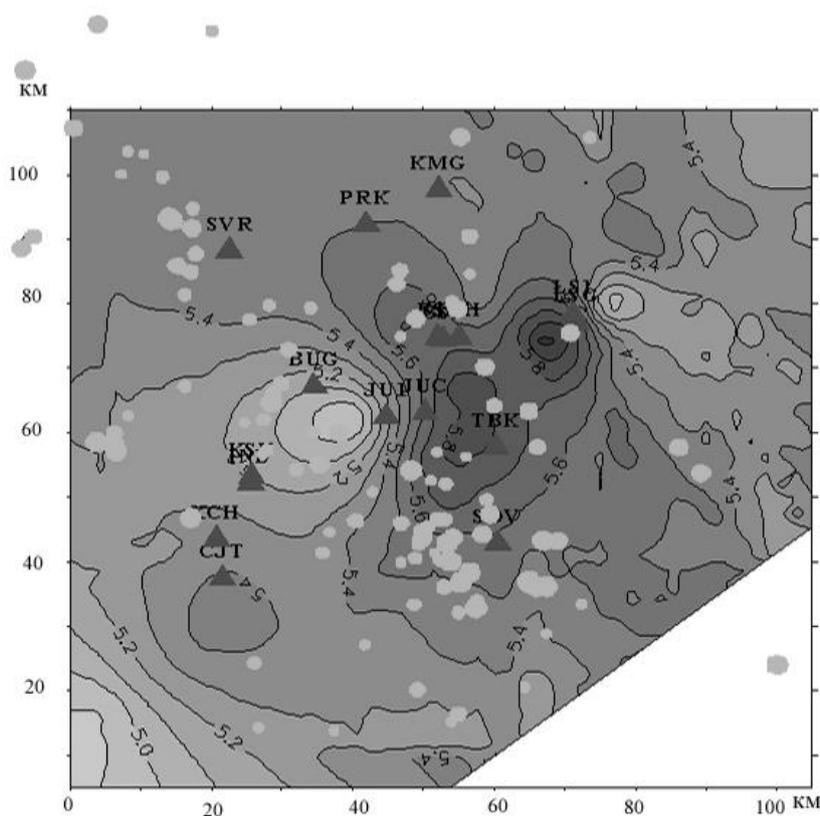
Кавминводский полигон расположен в сейсмоопасном густонаселенном курортном регионе Кавказских Минеральных Вод. Поэтому изучение его напряженного состояния и оценки сейсмической опасности во времени является очень важным. Изучение распределения показателей γ и S во внутренних точках среды и связь их с глубинным строением в районе Кавказских Минеральных Вод является примером для таких детальных исследований в других сейсмоопасных районах и в районах расположения особо опасных объектов.

Район Кавказских Минеральных вод сейсмически активен и относится к зоне, где возможны 7-8-мибалльные землетрясения (по шкале MSK) [Милановский и др., 1989]. Региональные материалы безусловно свидетельствуют о том, что сейсмич-

ность в этом районе мелкофокусная, коровая. На картах распределения эпицентров землетрясений по глубинам, видно, что очаги ниже 20-25 км здесь практически отсутствуют. Очевидно, что все современные деформации связаны с распределением напряжений в самой верхней части литосферы, где идут перемещения и взаимодействие относительно небольших блоков.

Скоростное строение Кавминводского полигона

Скоростное строение среды Кавминводского полигона определялось по записям Р-волн от далеких землетрясений, зарегистрированных при сейсмо-экологическом мониторинге, методом сейсмической томографии [Аки et al., 1977]. На территории полигона на начальном этапе наблюдений (первые 2-3 года) регистрация далеких землетрясений осуществлялась с помощью 15-16 трехкомпонентных цифровых станций, а далее количество станций было уменьшено до 10-12. Учитывались временные задержки Р-волн от регионального годографа с применением метода сейсмической томографии [Солодилов и др., 1999]



Условные обозначения / Legends

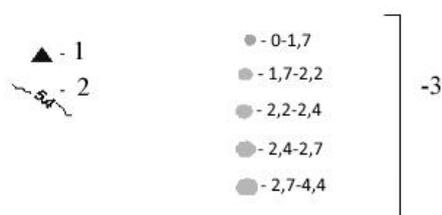


Рис. 2. Скоростное строение среды в слое 0-7 км (Кавминводский полигон).

1 – пункты наблюдения, 2 – изолинии скорости, 3 – эпицентры местных землетрясений с разными магнитудами ($M = 0-4,4$).

Fig. 2. The velocity structure of the medium in the 0-7 km stratum (Kavminvodsky test site). 1 – observation points, 2 – velocity isolines, 3 – epicenters of local earthquakes with different magnitudes ($M = 0-4.4$).

В верхней части земной коры (0-7 км) определена резко-контрастная изометричная высокоскоростная структура, простирающаяся в направлении С-СЗ – Ю-ЮВ (рис. 2). Перепад скоростей высокоскоростной структуры по отношению к окружающим низкоскоростным геоблокам составляет 0,8 км/с. Эта высокоскоростная структура прослеживается на глубину до 18 км и разрушается на уровне глубин 25-30 км. Размеры структуры по простиранию не определены, т.к. она протягивается за пределы района исследований. Поперечные размеры высокоскоростной структуры изменяются от 20 до 30 км. На глубинах более 30 км имеет место низкоскоростная кора и достаточно контрастная по скоростям верхняя мантия до глубин 84 км. На скоростном разрезе в крест простирания высокоскоростной структуры достаточно контрастно вырисовывается высокоскоростное ядро до глубин 20 км с превышением скорости по отношению к окружающей среде до 0,8-1,0 км/с

Гипоцентры большинства местных землетрясений на всех уровнях глубин в большей мере тяготеют к внешним частям высокоскоростной структуры (рис. 2) [Попова и др., 2001]. В связи с этим важно отметить, что ранее при анализе особенностей строения земной коры сейсмоактивных районов по материалам ГСЗ [Егоркин, 1991; Крылов и др., 1993; Попова и др., 1998], было показано, что очаги сильных землетрясений (Газлийского, Спитакского, Казанджигского, Дагестанского и др.) также приурочены к периферийным (градиентным) зонам высокоскорост-

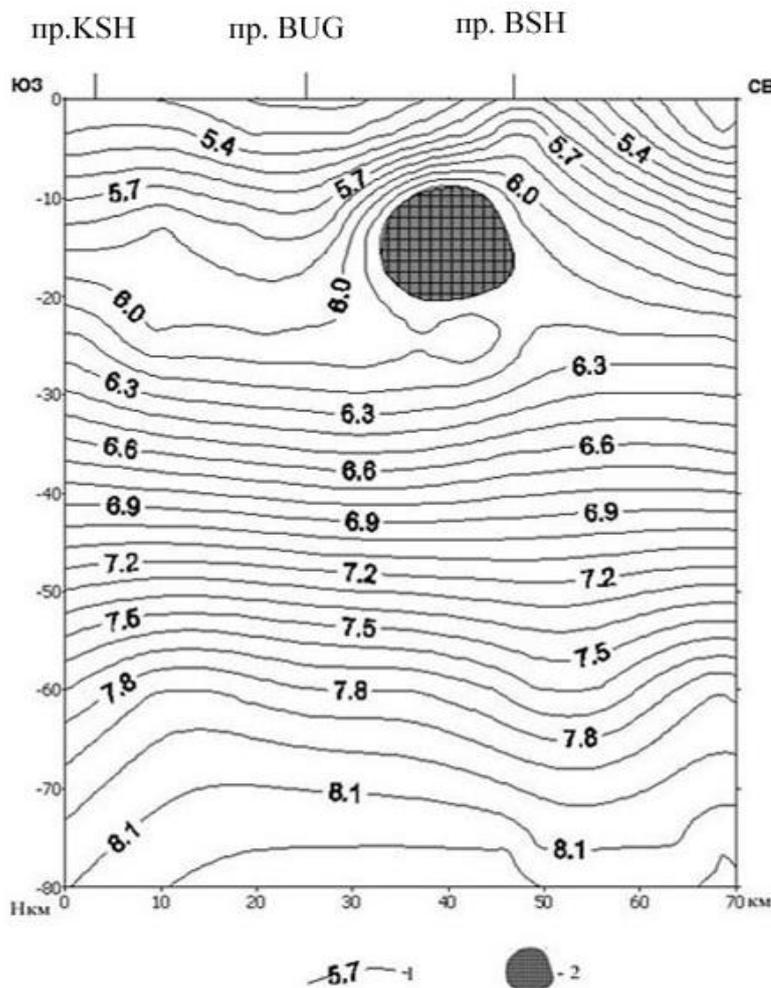


Рис. 3. Скоростной разрез в крест простирания высокоскоростной структуры (пр. KSH, пр. BUG, пр. BSH – проекции пунктов наблюдения на линию профиля). 1 – изолинии скорости, 2 – высокоскоростное ядро. / Fig. 3. Velocity profile into across the strike of a high-velocity structure (KSH pr., BUG pr., BSH pr. – projection of observation points onto the profile line). 1 – velocity isolines, 2 – high-velocity core.

ных структур консолидированной коры. Таким образом, наблюдается связь сейсмогенерирующего объема активизированной коры с определенным типом коровых структур – куполовидными, возможно диапировыми образованиями, содержащими высокоскоростные ядра, что отвечает представлениям Гамбурцева Г. А. [Гамбурцев, 1982] и Добровольского И. П. [Добровольский, 1991; Dobrovolsky et al., 1979] о свойствах сейсмогенной коры.

Согласно теории Добровольского И. П. [Добровольский, 1991] и других авторов [Scholz et al., 1973] для накопления потенциальной энергии, необходимой для возникновения сильного землетрясения, размеры высокоскоростной структуры должны быть значительными. Так, горизонтальные размеры структур, с которыми связаны катастрофические землетрясения Газли, Казанджика и Спитака не менее 120-150 км [Егоркин, 1991; Попова, 1998].

Рассматриваемый район Кавминвод по типу скоростного разреза коры подобен районам, где происходили сильные землетрясения, но отличается меньшими поперечными размерами структуры – накопителя упругой энергии, что в принципе позволяет прогнозировать и более низкий энергетический класс сейсмических событий. Горизонтальные размеры высокоскоростной структуры, выявленной на территории Кавминводского полигона в крест простирания не превышают 30 км, и маловероятно, чтобы эта структура смогла накопить энергию, способную вызвать катастрофическое землетрясение. Это подтверждают и результаты изучения местной сейсмической активности, максимальные величины магнитуд (M) не превышают 5,1-5,3 [Милановский, 1989].

В итоге можно сделать вывод, что Приэльбрусский Минераловодческий район, в котором расположен Кавминводский полигон, вероятно, не является территорией катастрофической опасности. Сейсмоактивность региона ограничена умеренными магнитудами и характеризуется постоянным устойчивым фоном слабых местных и микроземлетрясений.

Трехмерное распределение показателей напряженного состояния

Для изучения характера изменения показателя анизотропности γ по глубине и во времени для 26 интервалов наблюдения (см. табл. 1) были построены 3-х мерные модели показателя анизотропности γ . Эти 26 интервалов наблюдения соответствуют 3-м годам непрерывных наблюдений, в течение которых на территории Кавминводского полигона работало максимальное количество цифровых станций (около 15). Кроме того, в течение этого периода наблюдения не отмечалось влияния такого внешнего природного фактора как далекое катастрофическое землетрясение [Попова и др., 2007], которое могло бы существенным образом изменить показатели анизотропности γ и напряженного состояния S , вызвав при этом активизацию местной сейсмической активности. Можно считать, что в течение указанных 3-х лет напряженное состояние среды определялось только местными тектоническими процессами.

Полученные 3-хмерные модели показателя γ приведены на рисунке 3 для 8-ми интервалов наблюдения. Как видно из рисунка, характер распределения показателя анизотропности по площади полигона непрерывно изменяется по глубине, по латерали и во времени. В интервалах времени с 1 по 10 (примерно 1,5 года наблюдений) на глубинах до 10 км значения показателя γ малы ($<0,8$), среда на глубинах 0-10 км

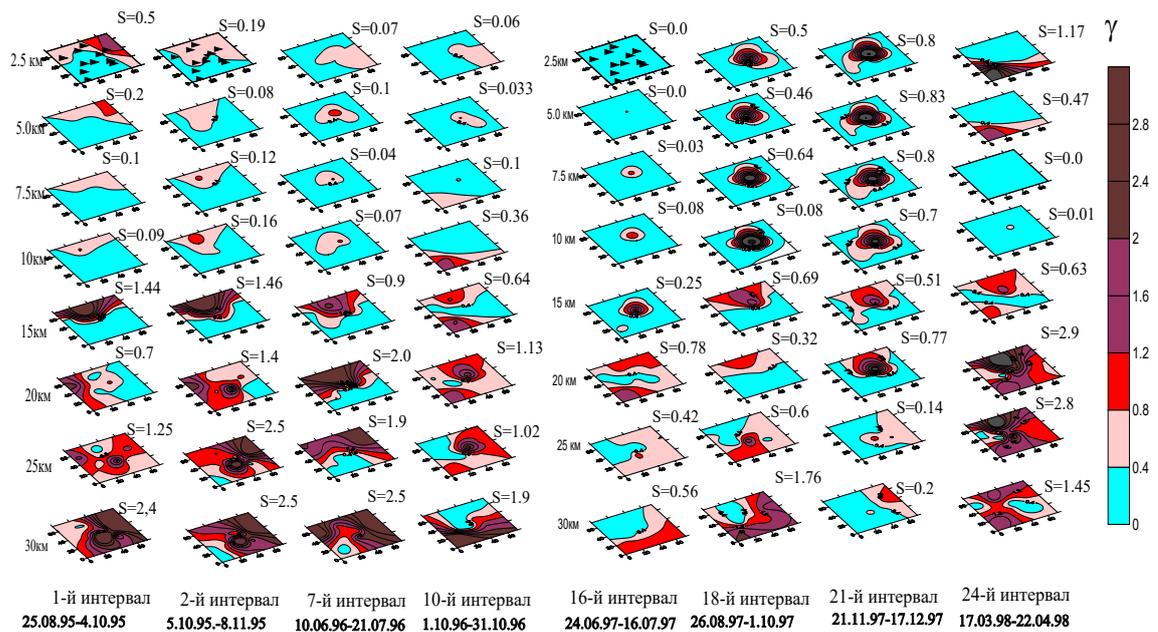


Рис. 4. Трехмерные модели распределения показателя анизотропности γ (Кавминводский полигон). /

Fig. 4. Three-dimensional distribution models of the anisotropy index γ (Kavminvodsky test site).

From left to right – observation intervals: 1st, 2nd, 7th, 10th, 16th, 21st and 24th.

практически изотропна. Глубины более 15 км отличаются повышенными значениями показателя γ (1,6-2,8).

Начиная с 16-го интервала наблюдений на глубинах 7,5-15 км в области ядра куполообразной высокоскоростной структуры образуется локальный очаг повышенных значений показателя анизотропности γ (рис. 4).

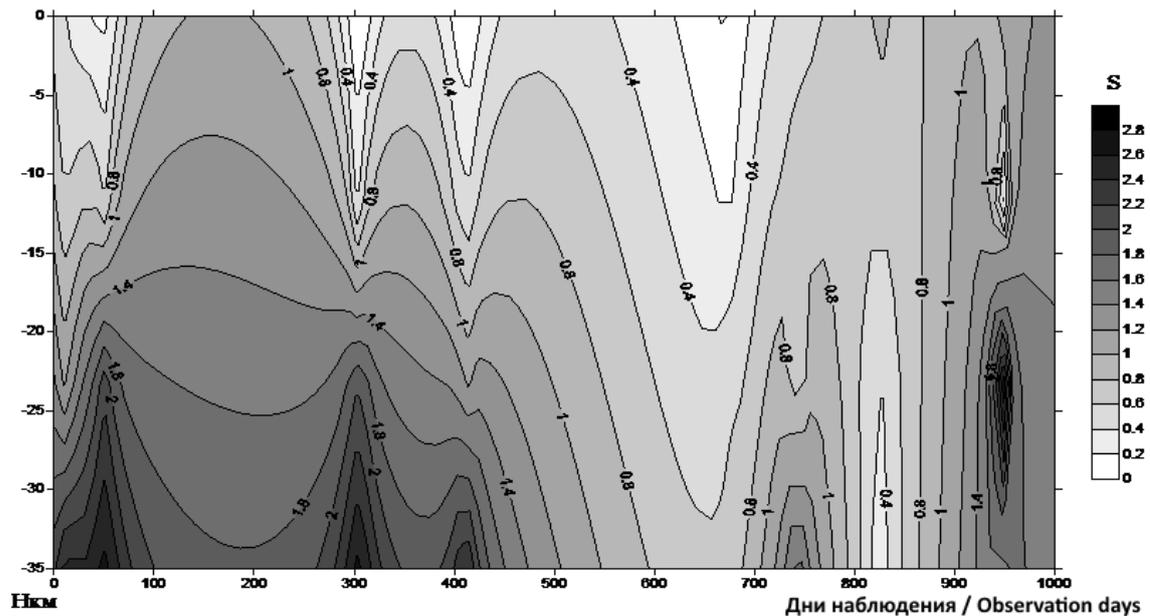


Рис. 5. Изменение показателя напряженного состояния S во времени и по глубине. /

Fig. 5. The change in the stress state index S in time and in depth.

Таблица 1. / Table 1.

Временные интервалы наблюдения, для которых были построены 3-хмерные модели распределения показателя анизотропности γ . / Observation time intervals for which 3-dimensional models of the distribution of the anisotropy index γ were constructed.

№ временного интервала / No. of time interval	Время наблюдений / observation time	№ временного интервала / No. of time interval	Время наблюдений / observation time
1	25.08.95-04.10.95	14	18.02.97-26.03.97
2	05.10.95-08.11.95	15	30.03.97-23.06.97
3	14.11.95-28.12.95	16	24.06.97-16.07.97
4	29.12.95-31.01.96	17	17.07.97-25.08.97
5	01.02.96-19.02.96	18	26.08.97-01.10.97
6	27.03.96-09.06.96	19	02.10.97-20.10.97
7	10.06.96-21.07.96	20	21.10.97-20.11.97
8	22.07.96-03.09.96	21	21.11.97-17.12.97
9	04.09.96-30.09.96	22	18.12.97-05.02.98
10	01.10.96-31.10.96	23	06.02.98-16.03.98
11	01.11.96-01.12.96	24	17.03.98-22.04.98
12	03.12.96-10.01.97	25	23.04.98-15.06.98
13	11.01.97-17.02.97	26	17.07.98-20.08.98

Этот очаг увеличивается в размерах, распространяется до приповерхностной части геологической среды и становится очень «интенсивным» (значения γ более 2,8) (21-й интервал наблюдений) (рис. 3), что указывает на возрастание напряженного состояния на глубинах (0–10) км. При этом значения показателя γ на глубинах более 15 км существенно ослабевают.

Перед 24-м интервалом времени в районе изучаемого полигона произошло резкое изменение характера распределения показателя анизотропности. В результате отмечается исчезновение локального очага повышенных значений показателя на глубинах (0–10) км, среда на этих глубинах становится практически изотропной. При этом на глубинах более 15 км значения показателя γ резко возрастают (рис. 4).

Для каждого интервала наблюдения для всех схем распределения показателя γ , соответствующих разным глубинным уровням, был рассчитан показатель напряженного состояния S и построена зависимость изменения этого параметра по глубине и во времени (рис. 5). Из рисунка видна цикличность в изменении напряженного состояния во времени на всех глубинах. Выделяется временной интервал (0-500 дней), когда среда находится в напряженном состоянии. Причем, напряжение распространяется снизу вверх. Далее выделяется интервал, когда в среде напряженность отсутствует (500-700 день наблюдения), ослабление напряжения распространяется сверху вниз. А с 700 дня наблюдения среда вновь находится в напряженном состоянии, однако в данном случае повышенное напряженное состояние характерно для всего разреза.

Выводы

Таким образом, по данным проходящих обменных волн PS от далеких землетрясений в районе геодинамического полигона Кавказских Минеральных Вод получены 3-х мерные модели показателя анизотропности γ . Установлено, что характер распределения показателя анизотропности по площади полигона непрерывно изменяется по глубине, латерали и во времени. Выявлена цикличность в изменении показателя напряженного состояния среды на всех глубинах изучаемой среды. Среда как бы «дышит», периоды напряженного состояния сменяются отсутствием напряжения в среде. Причем, в это «дыхание» вовлечены все уровни исследуемых глубин от поверхности до глубины 30 км.

Из приведенных данных следует, что длительный локальный сейсмо-экологический мониторинг позволяет оценивать напряженное состояние среды во времени и пространстве. Аналогичные (выше приведенным) длительные исследования ЛСЭМ рекомендуется проводить во всех сейсмоопасных регионах, в районах проектирования АЭС, ГЭС и стратегически важных объектов, а также в густонаселенных мегаполисах с целью оценки тектонических полей напряжений и факторов, определяющих энергетику возможных сейсмических событий.

Литература

1. Барсуков О.М. Годичные вариации сейсмичности и скорости вращения Земли. // Физика Земли. – 1994. – №4. – С. 96-98.
2. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
3. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. №4. – С. 804-815.
4. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ РАН СССР, 1991. – 216 с.
5. Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам. // В кн.: Глубинное строение территории СССР. / Ред. В. В. Белоусов, Н. И. Павленкова, Г. И. Кветковская. – М.: Наука, 1991. – С. 118-135.
6. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р и S волнах. – Новосибирск: Наука, 1993. – 199 с.
7. Милановский Е.Е., Расцветаев А.В., Кухмазов С.У., Бирман А.С. и др. Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа. // В сб.: Геодинамика Кавказа. – М.: Наука, 1989. – С. 99-105.
8. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. – М.: Наука, 1994. – 222 с.
9. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земли. – М.: Недра, 1997. – 256 с.
10. Попова О.Г., Коновалов Ю.Ф., Попов М.Г. Особенности структуры земной коры сейсмоопасных и асейсмичных регионов по данным геотраверсов (на примере профилей Базальт, Рубин, Кварц и Армаш-Ахалцихе). // Вулканология и сейсмология. – 1998. – №4. – С. 178-189.
11. Попова О.Г., Коновалов Ю.Ф., Кухмазов С.У. Технология и результаты геодинамического мониторинга с применением локальной сети сейсмических станций. // Материалы международной конференции «Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов». – Воронеж. – 2001. – С. 164-166.
12. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Неядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние среды удаленных территорий. Геофизика

XXI столетия: 2006 г. // В сборнике трудов восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. – М. – 2007. – С. 200-204.

13. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф. Результаты долговременного сейсмического мониторинга в сейсмоопасном районе Кавказских Минеральных Вод. // Геоэкология. – 2008. – №2. – С. 135-140.

14. Попова О. Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В., Васютинская С.Д. Основные результаты по локальному сейсмо-экологическому мониторингу в разных регионах Российской Федерации. // Геоэкология. – 2016а. – №6. – С. 483-496.

15. Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В., Лаврик Е.В., Изучение геодинамики и оценка напряженного состояния среды в районе проектируемой Нижегородской АЭС по материалам сейсмо-экологического мониторинга. // Материалы Сергеевских чтений, выпуск 18. Инженерная геология. Геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. – М.: РУДН, 2016б. – С. 193-197.

16. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В. Геодинамическое состояние среды территорий планируемых и действующих атомных электростанций, расположенных в разных тектонически активных областях. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №4. – С. 99-108.

17. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В. Оценка геодинамики платформенных территорий по результатам сейсмо-экологического мониторинга. // Геоэкология. – 2018. – №4. – С. 40-52.

18. Солодилов Л.Н., Попова О.Г., Коновалов Ю.Ф.. Возможность мониторинга состояния земной коры с использованием записей далеких землетрясений. // Разведка и охрана недр. – 1999. – №11. – С. 51-53.

19. Сыгинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью. // Физика Земли. – 1989. – №2. – С. 13-21.

20. Шабаров А.П., Тарасов Б.Г. Геодинамическое состояние массива горных пород в циклах Земли и Солнца. // Тезисы докладов «Пятые геофизические чтения имени В.В. Федынского» 2003 г. – М.: Центр Геон им. В.В. Федынского, 2003. – С. 51-52.

21. Шнеерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. – М.: ГЕРС, 2006. – 160 с.

22. Aki K., Christoffersson A., Husebye E. S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82. No. 2. – pp. 277-296.

23. Brady B. T. Theory of Earthquake. // Pageophys. – 1974. – Vol. 112. No. 4. – 701 p.

24. Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. // Geophys J. R. astr. Soc. – 1978. – No. 53. – pp. 426-467.

25. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. // Wave motion IVO. – 1981. – No. 3. – pp. 343-391.

26. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Mishkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zone. // Pure Appl. Geophys. – 1979. – Vol. 117. No. 5. – pp. 1025-1044.

27. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis. // Science. – 1973. – Vol. 181. – pp. 803-809.

References

1. Barsukov O. M. Annual variations of seismicity and speed of rotation of the Earth. Physics of the Earth. 1994. No. 4. pp. 96-98. (In Russ.)

2. Gamburtsev A. G. Seismic monitoring of a lithosphere. Moscow. Science. 1982. 200 p. (In Russ.)

3. Gik L. D. Physical simulation of seismic wave propagation in porous and fractured media. Geology and geophysics. 1997. T. 38. No. 4. pp. 804-815. (In Russ.)

4. Dobrovolsky I. P. Theory of preparation of a tectonic earthquake. Moscow. IFZ Academy of Sciences of the USSR. 1991. 216 p. (In Russ.)

5. Egorkin A. V. The structure of crust on seismic geotraverses. In the book: Deep structure of the territory of an USSR. Edition V. V. Belousov, N. I. Pavlenkova, G. I. Kvetkovskaya. Moscow. Science. 1991. pp. 118-135. (In Russ.)
6. Krylov S. V., Mishenkin B. P., Mishenkina Z. R. Detailed seismic researches of a lithosphere on P and S waves. Novosibirsk. Science. 1993. 199 p. (In Russ.)
7. Milanovsky E. E., Rastsvetayev A. V., Kukhmazov S. U., Birman A. S., etc. The newest geodynamics of the Elbrus and Mineralnye Vody region of North Caucasus. In the book: Geodynamics of the Caucasus. Moscow. Science. 1989. pp. 99-105. (In Russ.)
8. Nikolayev A. V. Problems of induced seismicity. The induced seismicity. Moscow. Science. 1994. 222 p. (In Russ.)
9. Pomerantseva I. V., Moszhenko A. N. Seismic research with Earth equipment. Moscow. Nedra. 1997. 256 p. (In Russ.)
10. Popova O. G., Konovalov Yu. F., Popov M. G. Features of structure of crust of seismodangerous and aseismic regions according to geotraverses (on the example of the Basalt profiles, Rubin, Quartz and Armash-Akhalsikhe). *Volcanology and seismology*. 1998. No. 4. pp. 178-189. (In Russ.)
11. Popova O. G., Konovalov Yu. F., Kukhmazov S. U. Technology and results of geodynamic monitoring using a local network of seismic stations. Materials of the international conference "Modern geodynamics, depth structure and seismicity of platform territories and adjacent regions". Voronezh. 2001. pp. 164-166. (In Russ.)
12. Popova O. G., Grey A. V., Konovalov Yu. F., Nedyadko V. V. Influence of catastrophic earthquakes on tension of the environment of remote territories. *Geophysics of the XXI century: 2006. The collection of works of the eighth geophysical readings of V. V. Fedynsky*. Moscow. 2007. pp. 200-204. (In Russ.)
13. Popova O. G., Grey A. V., Konovalov Yu. F. Results of long-term seismic monitoring in the seismodangerous Region of Caucasus Mineralnye Vody region. *Geoecology*. 2008. No. 2, pp. 135-140. (In Russ.)
14. Popova O. G., Popov M. G., Arakelyan F. O., Nedyadko V. V., Vasyutinskaya S. D. The main results on local seismo – to environmental monitoring in different regions of the Russian Federation. *Geoecology*. 2016a. No. 6. pp. 483-496. (In Russ.)
15. Popova O. G., Popov M. G., Arakelyan F. O., Nedyadko V. V., Lavrick E. V., Study of geodynamics and assessment of the stressed state of the environment in the area of the designed Nizhny Novgorod NPP based on the materials of seismic-ecological monitoring. Materials of Sergei readings, issue 18. *Engineering geology. Geoecology. Fundamental problems and applications*. Moscow. Russian Peoples Friendship University. 2016b. pp. 193-197. (In Russ.)
16. Popova O. G., Makeev V. M., Popov M. G., Arakelyan F. O., Nedyadko V. V. A geodynamic condition of the environment of territories of the planned and operating nuclear power plants, active areas located in different tectonic. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2017, No. 4. pp. 99-108. (In Russ.)
17. Popova O. G., Makeev V. M., Popov M. G., Arakelyan F. Shch., Nedyadko V. V. Assessment of geodynamics of platform territories by results of seismo-ecological monitoring. *Geoecology*. 2018. No. 4. pp. 40-52. (In Russ.)
18. Solodilov L. N., Popova O. G., Konovalov Yu. F. A possibility of monitoring of a condition of crust with use of records of far earthquakes. *Investigation and protection of a subsoil*. 1999. No. 11. pp. 51-53. (In Russ.)
19. Sytinsky A. D. On Connection of Earthquakes with Solar Activity. *Physics of the Earth*. 1989. No. 2. pp. 13-21. (In Russ.)
20. Shabarov A. P., Tarasov B. G. Geodynamic state of rock mass in Earth and Sun cycles. Theses of the reports "Fifth geophysical readings named after V. V. Fedynsky". Moscow. Center of Geon named after V. V. Fedynskogo. 2003. pp. 51-52. (In Russ.)
21. Schneerson M. B. Introduction to seismic anisotropy: theory and practice. Moscow. GERS. 2006. 160 p. (In Russ.)

22. Aki K., Christoffersson A., Husebye E. S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. No. 2. pp. 277-296.
23. Brady B. T. *Theory of Earthquake*. Pageophys. 1974. Vol. 112. No. 4. 701 p.
24. Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys J. R. astr. Soc.* 1978. No. 53. pp. 426-467.
25. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave motion IVO*. 1981. No. 3. pp. 343-391.
26. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Mishkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zone. *Pure Appl. Geophys.* 1979. Vol. 117. No. 5. pp. 1025-1044.
27. Scholz C. H., Sykes L. R., Aggarwal Y. P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*. 1973. Vol. 181. pp. 803-809.

GEOPHYSICS

УДК

DOI:

Review paper

Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city

V. B. Zaalishvili¹, A. Pinar², M. Erdik², O. G. Burdzieva¹, D. A. Melkov¹¹Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: cgi_ras@mail.ru;²Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul 34342, Turkey, e-mail: 4alipinar@gmail.com

Received: 20.08.2020, revised: 03.09.2020, accepted: 04.09.2020

Abstract: Relevance. The last decades in Russia have been characterized by high growth rates of population, industry, infrastructure in large cities and industrial centers located in seismically active regions. The construction did not always take into account the characteristics of local soils and the level of seismic hazard. The study of the consequences of strong and destructive earthquakes created the conditions for new scientific developments in engineering seismology and earthquake-engineering. Seismic zoning of urbanized territories makes it possible to assess the seismic risk of the territory, take measures to strengthen existing buildings and carry out the construction of buildings and structures with a given seismic resistance. This problem is especially relevant for the regions of the Caucasus. The Republic of North Ossetia-Alania is located in a fairly high seismically active zone. It seems natural to assess the seismic risk in the capital of the republic – the city of Vladikavkaz. **Aim.** The aim of the work is to develop and implement modern methodology for the expected seismic risk assessment of a city on the example of Vladikavkaz city. **Methods.** The methods associated with the assessment (probabilistic or deterministic) of ground motion include consideration a number of processes: earthquake source, disaggregation of probabilistic hazard, empirical relationships of seismic attenuation, site effects, and construction mechanics. All of this demands regularization of Construction Norms parameters with different methodologies and corresponding methodology development based on GIS technology. **Results.** Previous test area assessment results are presented and tips for improvement and regularization are given. Consideration of specific types of soils and types of building stock with estimated intensities and vulnerabilities of building types caused a different level of expected economic losses.

Keywords: seismic hazard, intensity, soil conditions, seismic risk, economic and social losses.

For citation: Zaalishvili V. B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G., Melkov D. A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (3): 94 – 112. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

1. Introduction

An important problem of the modern seismic risk assessment methodology is the lack of a still reliable account of the features of seismic impact and the response of the existing building stock in their relationship. It is enough to recall the consequences of the Spitak earthquake (1988), the unexpected colossal losses of which were caused by the coincidence of the prevailing period of seismic impact, formed by the influence of a thick stratum of soft sedimentary deposits overlain by a layer of rock, on the initial seismic signal, with the period of natural or predominant vibration of high-rise buildings that

were either destroyed or critically damaged. An important aspect of the methodology is the dependence between the effect of the amplitude-frequency characteristics of a seismic signal on the foundation soils and building stock and the level of the impact itself and its spectral composition, which is often caused by significant nonlinear phenomena (up to soil liquefaction). In fact, the duration of the incoming seismic signal also has a decisive influence on the earthquake effect. The noticeable influence of the relationship between the direction of incoming seismic waves and the orientation of a building stock on the severity of its destruction and damage, as well as the effect of multiple earthquakes and various dynamic effects on the state of building stock and its seismic resistance are well known. Finally, despite the development of a number of modern methods for seismic risk assessment insufficient attention is paid to the results of seismic microzonation with a changing level of seismic impact, which causes a variation in the calculated intensity increments. A full accounting of seismic effects and their relationship with the features of a building stock and foundation soils on the basis of the latest achievements will make it possible to develop a new methodology for state assessment and forecasting the behavior of the “soil-building stock” system during strong earthquakes.

2. Seismic risk concepts

To assess seismic hazard, a probabilistic approach is currently used in the world. The approach is caused by the probabilistic nature of an earthquake itself. The seismic resistance of a building stock is determined not only by the strength of its elements (construction, material, etc.) but also by the conditions which occur during operational loads. During strong earthquakes, the strength characteristics of building stock will be determined by various features of the seismic load. Seismic effects are characterized by the load level and the range of periods or frequencies of the incoming vibrations. Under intense loads, soils exhibit significant physical nonlinearity, characterized by a change in their amplitude and vibration frequency. Numerous experimental studies show that constructions usually vibrate with the frequency or period of their natural vibrations regardless of the frequency of the external influences. In this case, the prevailing periods of natural or free vibrations of most buildings and structures are in the range $T = 0.1-2.0$ s. Thus, the vibration frequency of the dynamic load experienced by a structure during earthquakes, as a rule, is in the range of 0.5-10 Hz. On the other hand, as a result of the interaction of the system “foundation soils – structure”, during intense loads under the conditions of noticeable physical nonlinearity of soils, the prevailing or resulting vibrations will differ significantly from the frequency of free vibrations.

Despite the development of a large number of adaptive systems for the protection of buildings and structures, this fact makes the forecasting of building stock behavior during strong earthquakes rather uncertain. Currently, techniques and methods for seismic hazard and risk assessment of territory have been developed; new data on the soil layer behavior under intense seismic loads and its influence on the transformation of vibration frequencies during the passage of waves excited by strong earthquakes have been obtained. At the same time, there is still no single information and technical system that allows performing the entire range of work in the format of structural-dynamic, kinematic, physical and mathematical models of the spatial data infrastructure and realizing calculations in a single information field. The absence of reliable accounting of resonance phenomena in the “soil-structure” system associated with their interaction is one of such problems of modern methods of the expected seismic risk assessment.

In this regard, it is useful enough to recall the consequences of the Spitak earthquake of 1988, the colossal losses in which were caused by the coincidence of the frequency of seismic impact, distorted by the initial signal passage through a thick layer of weak lacustrine sediments, covered with rocks, and the natural frequencies of buildings of the so-called 111 series. These were buildings on the territory of the city of Leninakan, that were all destroyed or critically damaged, in contrast to the similar buildings in the city of Kirovokan. So establishment of the various sides of the complex diversity of the interaction of seismic impact and the urbanized environment is of a high importance. Analysis and subsequent adequate consideration of the features of seismic impacts on the designed and the existing construction site will significantly reduce both economic and social damage through a preliminary or subsequent regulation of the hazardous characteristics of a construction site in an urbanized area.

The term “seismic risk” was first identified as a special concept, different from the actual term “seismic hazard” in the foundational work of Cornell [Cornell, 1968]. In Russia, the issues of seismic zoning were considered by I. E. Gubin, S. V. Medvedev, Yu. V. Riznichenko. [Gubin, 1950; Medvedev, 1960; Riznichenko, 1965]. The influence of soil conditions was investigated in the works of Egorov, Popov V. V. (1945), A. N. Safaryan (1963). Further development of the methods of long-term forecasting was obtained in the works of G. A. Sobolev, V. I. Ulomov, M. I. Bogdanov. [Sobolev, 1992; Ulomov et al., 1993; Ulomov 1994; Balassanian et al. 1999; Ulomov et al., 2015].

At present, a large number of studies are concerned with seismic hazard [Pinar et al., 2001, 2016; Zaalishvili, Rogozhin, 2011; Yamamoto et al., 2020] and seismic risk assessments [Shah, 1995, 2009; Shah, et al., 1987, 1992; Balassanian et al., 1999; Erdik, 2005, 2013, 2017; Erdik et al., 2000, 2018; Durulkal et al., 2008; Chan et al., 1998; Davidson et al., 1999; Dong et al., 1994; Yuchang and Kemon, 1991; Zaalishvili et al., 2001]. The following works of Trifunac [Trifunac, Todorovska, 1998], Bazzurro and Cornell [Bazzurro, Cornell, 2004] and many other foreign researchers' works [Yang et al., 2000; 2018; Campbell, K. W., & Bozorgnia, 2003; Bolisetti et al., 2018; Chandra, Gueguen, 2019; Dammala, 2019; Das, Chakraborty, 2020; Kwok et al, 2007; Phillips & Hashash, 2009; Rathje, et al., 2010; Riga et al., 2018; Sonmezer et al., 2018] are devoted to the study of nonlinear properties. The works analyze the consequences of strong earthquakes [Hartzell et al., 1999; Kaklamanos et al., 2013, 2015]. Sometimes, the analysis is done using strong motion databases [Mahani, A. B., & Kazemian, 2018; Kaklamanos & Bradley, 2018; Afshari & Stewart, 2019; Pagliaroli et al., 2018; Pavel et al., 2019; Wang et al., 2019; Zeghal et al., 1995] or with the help of mathematical modeling [Poul et al., 2018; Stupazzini et al., 2009; Terziv & Ignatakis, 2018; Thebian et al., 2018; Tsiapas & Bouckovalas, 2019]. In the works of A. V. Nikolaev and V. B. Zaalishvili [Zaalishvili, Kanukov, 2013; Zaalishvili, 2016; Zaalishvili et al., 2014, 2018, 2019a, b, 2020], the experiments have been described and the methods have been developed to assess the nonlinear behavior of soils using the in situ instrumental method directly in the investigated area.

To predict the expected consequences of strong earthquakes, as well as other disasters, a detailed study of the features of urbanized territories is required. At the end of the 20th century, different approaches for assessing the seismic risk of already existing buildings and structures were developed in Russia. They took into account various factors that, with varying accuracy, determine the level of an expected seismic risk. One of the first such techniques, considering world experience, was developed by S. Yu. Balasanyan. in 1991.

Aizenberg Ya. M., Klyachko M. A., Koff G. L. [Klyachko, 1994; Klyachko, Polovinchik, 1994; Polovinchik, Klyachko, Koff, 1995] laid the foundation and made a significant contribution to the formation and subsequent development of domestic approaches of risk assessment. Developed by Zaalishvili V. B. in 2000 method of rating assessment of soil conditions and seismic risk of the territory seems to be a more complete and, apparently, more adequate forecasting technique. This method was first applied for the allocated territory of Tbilisi during the process of implementing the international project of the INTAS Program “Seismic hazard assessment for big cities in Georgia using the modern concept of seismic microzonation with consideration of soil non-linearity” (1999-2001). Later, in 2004, a rating assessment of the complex of engineering-geological, hydrogeological, geomorphological and other features of soil conditions was for the first time successfully implemented in Russia for the capital of North Ossetia under the next international NATO “Science for Peace” Program Project “Seismic Risk of Large Cities of Caucasus: Tools for Risk Management. Azerbaijani, Armenian, Georgian and Russian (North-Ossetian) scientists took part in the realization of this project. In this case, a rather extensive area of the city of Vladikavkaz (Kuibyshev street and the adjacent quarters) was chosen as the object of the study. It is known, that the vulnerability of building stock during strong earthquakes depends significantly on its type and infrastructure characteristics. Different types of construction of buildings are characterized by the different seismic vulnerability. The traditional use of the letters to denote different types of buildings derives from the Modified Mercalli-Richter Scale of 1956 (MM1). This classification characterizes different levels of vulnerability quite roughly. Similarly, the current MSK-64 seismic scale directly identifies building classes by type of construction and resulting differences in the vulnerability or building exposure to seismic effects. The vulnerability curves do not take into account resonance phenomena; it necessitates a set of curves for each vibration frequency. Assessment of buildings` resonant frequencies, which, first of all, depend on the type of structure and number of storeys must be carried out. And microseismic method could be used.

The aim of the work is to develop the existing methodology of a building stock seismic risk assessment and to work out new approaches for taking into account the interaction of building stock and foundations in the urbanized territories based on the use of modern knowledge and technologies. To achieve this goal, the following tasks are required:

- Creation of a data infrastructure that allows carrying out the modeling and various calculations of seismic effects (including the influence of the location of faults and the influence of local soil conditions), data on the building stock and its interrelationships, which together make it possible to simulate scenarios (with the help of modern computational power)

- Development of computational algorithms for modeling the initial seismic impacts for different recurrence periods, the response of the soil strata and building stock to these effects, with support for the possibility of multivariate calculations and the use of the Monte Carlo method.

- Modeling based on known and developed methods for seismic risk assessment, comparing the results and choosing the most optimal methodology for the conditions of the North Caucasus.

The considered and the other tasks are the methodological basis and are included in each stage of work (detailed zoning – seismic microzonation – risk assessment)

3. Seismic hazard assessment

Seismic hazard assessment carried out in connection with the analysis of the risks of urbanized areas can be realized using probabilistic or deterministic approaches. A probabilistic approach would be relevant for probable losses estimation in a given area or geocell. However, since all probable losses in a given geocell cannot manifest themselves simultaneously, the integral effect of individual (single) losses will give an overestimation of the total losses in the urban area. In addition, a spatial-system approach is required for the assessment of the life cycles' disruption. As general, estimates of earthquake losses in urban areas have traditionally been deterministically associated with an earthquake scenario (or the set of scenarios).

An earthquake scenario can be assessed by disaggregating the probabilistic hazard to find the source that contributes the most to the formation of the integral hazard (Thenhaus and Campbell 2003; Somerville and Moriwaki 2003; Faccioli and Pessina 2003).

The methods associated with the assessment (probabilistic or deterministic) of ground motion include consideration of the following processes:

- Process at the source of the earthquake
- Disaggregation of probabilistic hazard
- Empirical relationships of seismic attenuation
- Effects close to faults (directivity graph and radiation directivity)
- Influence of soil conditions

Nowadays reliable empirical models exist in terms of peak acceleration, velocity and displacement (PGA, PGV, and PGD) and pseudospectral velocity (PSV) at the specific frequencies and damping factors for a given earthquake intensity, distance, fault mechanism, and local geology [e. g. Boore et al. 1993; Campbell and Bozorgnia 1994; Gregor 1995; Fukushima and Tanaka 1990; Ambraseis and Bommer 1995; Campbell 2003a, 2003b]. Although the statistical results were obtained for the territories which are fully equipped with monitoring systems (for example, California and Japan), the comparison shows that with identical definitions of the input parameters, the difference between the attenuation ratios in the western United States, Japan and Europe is less than the actual dispersion in any of them. [Fukushima and Tanaka 1990; Ambraseys and Bommer 1995]. This substantiates the use of the data for the territory of Turkey and the Greater Caucasus. We will also consider numerical modeling procedures for determining ground motion based on the mechanism of fracture disruption and wave propagation. At shorter distances, the phenomena associated with the finite dimensions of the fault become significant. These phenomena are primarily caused by the final velocity of disruption propagation, as a result of which some parts of the fault emit energy earlier than others; thus, waves emitted with delays then interfere, causing significant directivity effects. The modeling method used, for example, in the FINSIM program [Beresnev, Atkinson, 1997, 1998], is described in works and previous publications devoted to the basics of the stochastic technique. The time series for the sub-faults are generated using the Boore procedure, which assumes a baseline ω^2 spectrum and takes into account the propagation of seismic waves to the observation point, using defined duration and attenuation operators. The program uses the standard stacking operation, in which the rupture from the hypocenter propagates radially, initiating secondary sources during its passage. The random component enters at the moment of the sub-source starting, etc. Analysis and consequent account of initial accelerograms transformation will become the basis for site effect analysis at strong seismic loadings (Figure 1) [Zaalishvili et al., 2010].

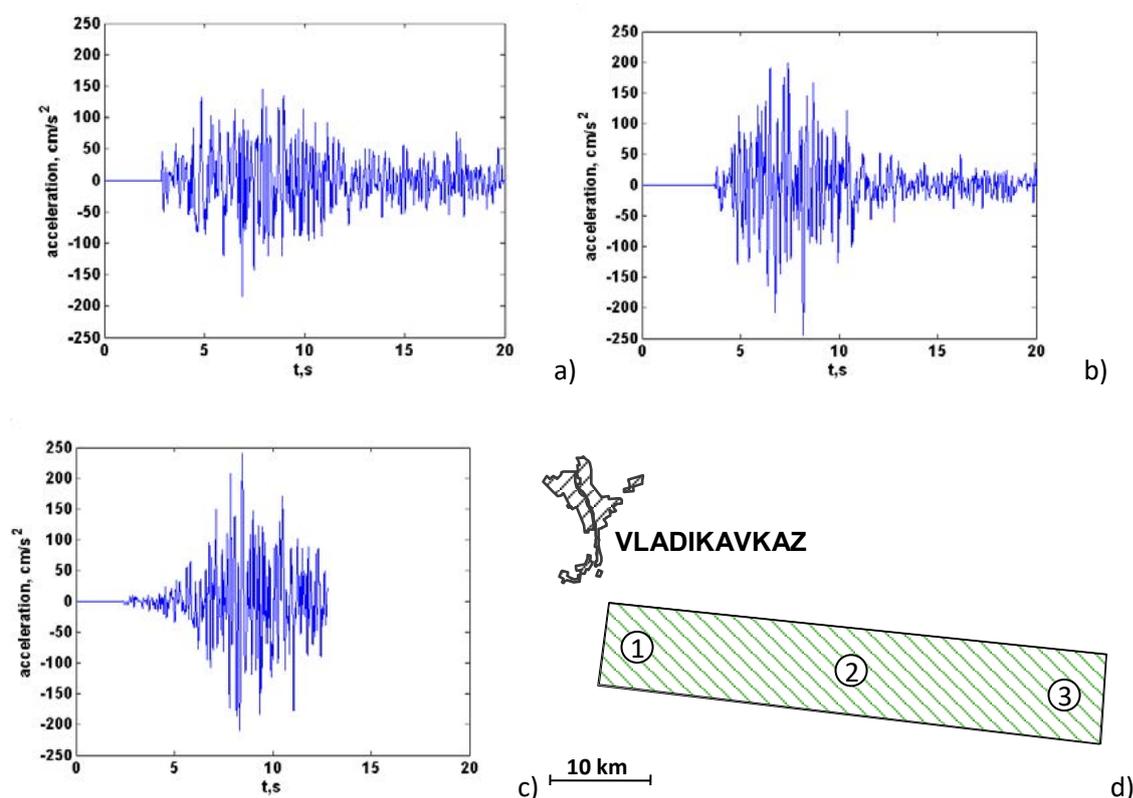


Fig. 1. Synthetic accelerograms for different source locations:
a – western part of fault; *b* – middle part of fault; *c* – eastern part of fault; *d* – scheme of sources of scenarios earthquakes

Seismic microzonation (SMZ) can be viewed as a method of zoning of a city or a large construction site in areas with the same ground response for standard seismic effect of a certain level and assessment of the relative changes in the characteristics of vibrations on the surface relative to the characteristics of vibrations of so-called reference site to which the initial intensity is attributed. In Russia the reference sites are sites with average seismic properties of ground conditions of certain territory. In Armenia and Georgia sites with the worst ground conditions are generally considered as reference, although in some cases they can be averages. In the United States the reference sites are Rock sites. In former USSR sites with standard ground conditions traditionally were chosen after macroseismic investigation of historical strong earthquakes.

Sites with the same intensity are combined in different seismic zones. Engineering-geological, hydrogeological and geomorphological conditions are taken into account. On the other hand, the target of seismic microzonation is development of initial data of various levels of seismic impacts for structural engineering and urban planning. The territory is divided into a grid with equal cells. Further the parameters of the forming characteristics of ground conditions in each of these cells are defined, which requires active use of GIS technology [Zaalishvili, Berezko, 1999]. In particular, such studies have been carried out in 2000, in the process of implementation of the international project for a large area of Tbilisi, with various types of soils, in different physical conditions [Zaalishvili et al., 2001].

In general, the process of seismic microzonation can be divided into three phases. In the first phase, initial regional seismic characteristics of the earthquake at rock level are

determined for each cell. In the second stage, the site profiles are modeled on the basis of the results of the drilling and field testing. The third phase includes an analysis of the expected response of sites to evaluate characteristic of earthquake on the surface and interpreting the results of microzonation [Ansal et al., 2004, 2010]. When the available data of engineering geological zoning (usually the results of surveys of past years) do not correspond to modern requirements (for example, insufficient data on fill content in gravels), the instrumental studies based on some selected grounds in the territory is essential for the reliability of the final result.

In the paper approaches used abroad is combined with techniques of Russian-Georgian school of seismic microzonation, especially instrumental method which is the primary method of SMZ. Seismic process is a complex multifactor process, so final maps of seismic microzonation are based on the results of integrated use of instrumental, calculational and recently developed instrumental-calculation methods. On the basis of this approach in 2010 SMZ Map of Vladikavkaz city was developed (Figure 2).

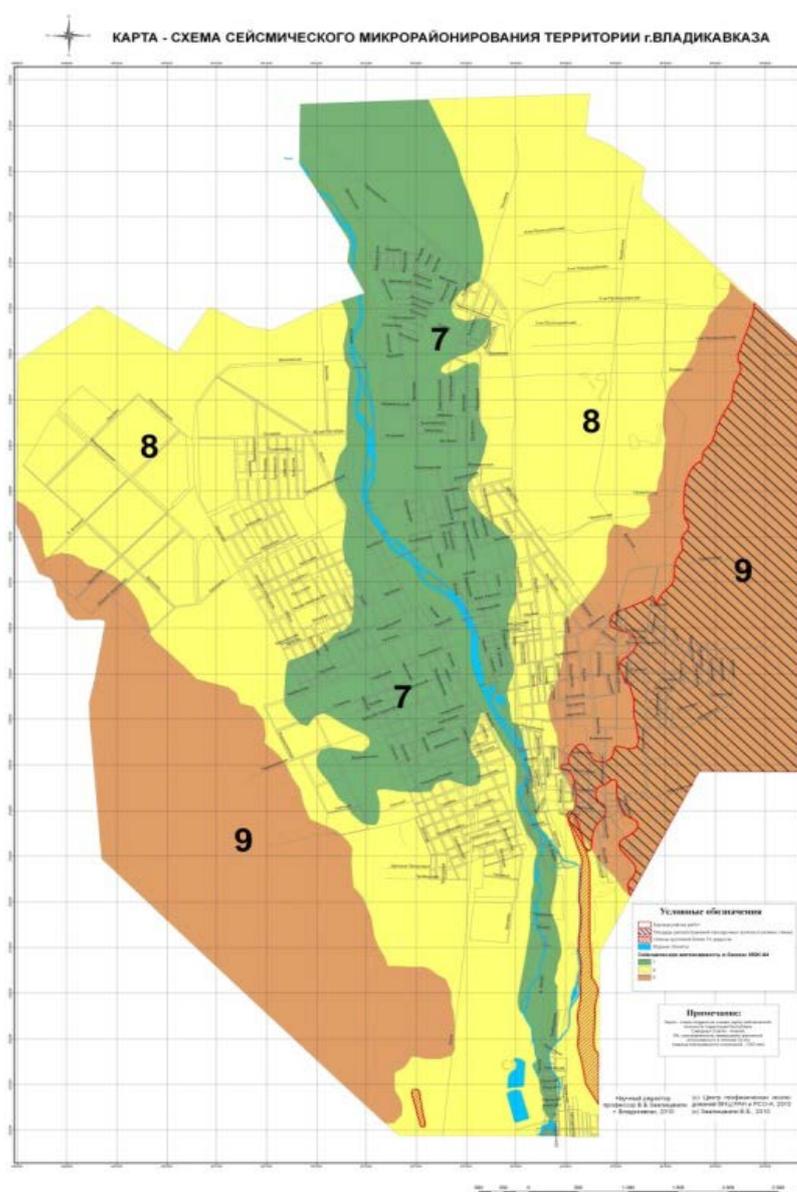


Fig. 2. Seismic microzonation Map of the territory of Vladikavkaz city

4. Vulnerability of buildings and structures

Tables 1-2 show number of damaged buildings, degree of damage d and the corresponding values of the damage coefficient DR for different intensity levels I.

The value of the damage coefficient above 30% from an economic point of view should be considered as very high for repair and, therefore, can be considered 100% loss for functioning in certain cases.

Each intensity level in the macroseismic scale represents a certain number of buildings that must be exposed to a certain extent within the range of damage levels from 1 to 5.

Vulnerability value for a building of types A, B, C, D, taking into account the data in Table 1 and Table 2 at various levels of macroseismic intensity can be calculated using the following expression:

$$V_i = \sum_{i=0}^5 N_i (DR)_i \tag{2}$$

It must be noted that “averaged” express assessment technique based on MSK-64 scale concept is applied. It is applicable for the most of the buildings of the investigated area and allowed to make assessment in a short time. Specifics of new building types as for the site 1 are considered in section 8. Life-cycle cost and seismic reliability analysis could give more precise and detailed result [19].

Table 1.

Number of damaged buildings N (% of total) with corresponding degree of damage d at different intensity levels on the MSK – 64 scale [Sobolev, 1997].

Seismic intensity I, MSK-64 scale	Building type							
	A		B		C		D	
	Number of damaged buildings, N (%)	Degree of damage d	Number of damaged buildings, N (%)	Degree of damage d	Number of damaged buildings, N (%)	Degree of damage d	Number of damaged buildings, N (%)	Degree of damage d
7	10	1	15	0	50	0	65	0
	35	2	35	1	50	1	35	1
	50	3	50	2				
	5	4						
8	10	2	10	1	10	0	45	0
	35	3	35	2	35	1	50	1
	50	4	50	3	50	2	5	2
	5	5	5	4	5			
9	15	3	10	2	10	1	15	0
	35	4	35	3	35	2	50	1
	50	5	50	4	50	3	35	2
			5	5	5	4		

Table 2.

**Degree of damage d and the corresponding values of the damage coefficient DR
[Sobolev, 1997]**

Degree of damage d	1	2	3	4	5
Damage coefficient DR	0.02	0.10	0.30	0.80	1.00

In the study area, four structural types of buildings were identified. For each type, a seismic vulnerability was calculated. The value of the degree of vulnerability lies in the range $0 \leq V \leq 1$. The closer V is to unity, the higher the vulnerability of the building. A value of 1 corresponds to the complete collapse of the building. The results are presented in Table 3 and in Fig. 3.

Table 3

**Vulnerability V_i , corresponding to four types of buildings
on the MSK-64 [Sobolev, 1997]**

Building type	Macroseismic intensity on MSK-64 scale					
	V	VI	VII	VIII	IX	XII
A	0.001	0.015	0.227	0.565	0.825	1
B	0	0.001	0.057	0.227	0.565	1
C	0	0	0.010	0.072	0.227	1
D	0	0	0.002	0.015	0.06	1

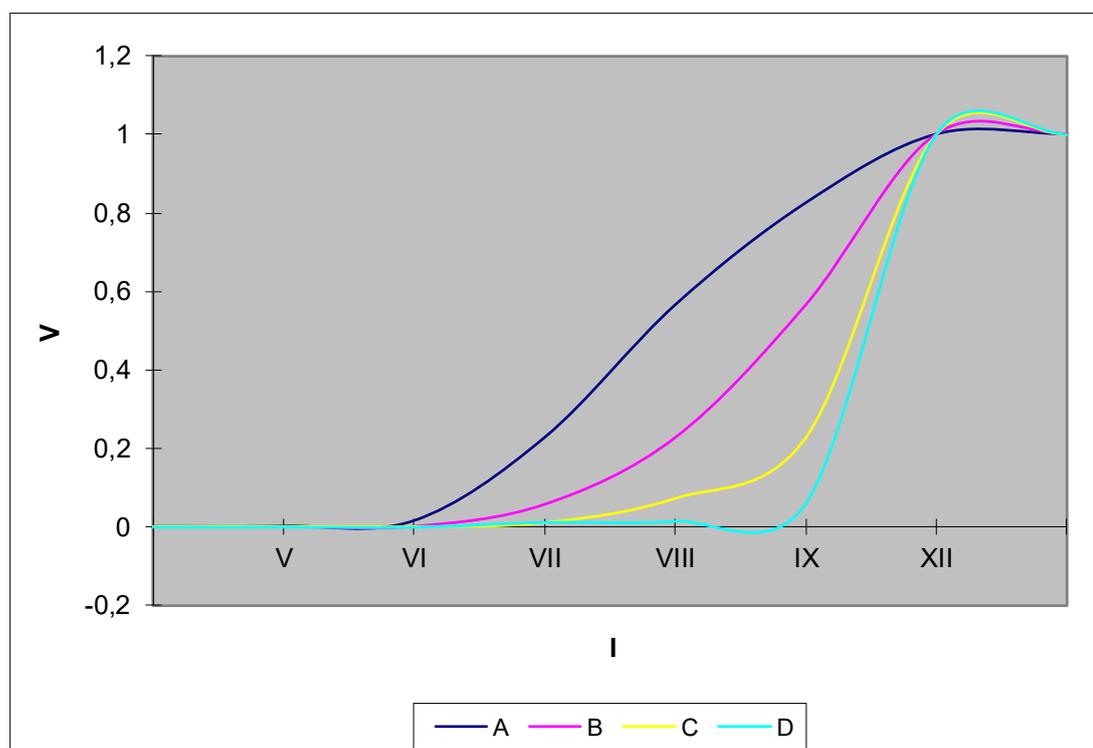


Fig. 3. The dependence of the vulnerability of buildings V from the intensity I

5. Seismic risk assessment

On one or another urbanized area, the population, buildings and structures, various communications and socio-economic activities are considered as the “elements of risk”. Buildings and life support systems form an “artificial environment”. Physical losses of the elements of risk, which may result from a particular earthquake scenario, require an extensive and comprehensive collection of “inventory” or initial data, i. e. the collection of the following information: demographic distribution at different times of the day; building stock and its typification; life support systems and infrastructure (main roads, railways, bridges, overpasses, public transport, distribution of electricity, water supply, sewerage, gas supply, telephone communications, including cell towers and the possibility of their operation at maximum loads), including their nodal points (stations, pumps, switchgears, storage systems, power transmission towers, sewage treatment plants, airports, seaports, etc.); main and critical facilities (dams, power plants, large chemical and fuel storage tanks) in the form of GIS databases. In fact, the issue is to develop the main elements of the domestic HAZUS system [HAZUS, 1999, 2014]. The vulnerability functions of the elements at risk represent the possibility of its response to an earthquake exceed its various limit states based on physical and socio-economic impacts. Vulnerability assessments are usually based on the analysis of the previous earthquake data (the observed vulnerability) and on the analytical studies (predicted vulnerability). The main physical vulnerability is associated with buildings, infrastructure and life support. Secondary physical vulnerability is associated with consequential losses. Socio-economic factors of vulnerability include accidents, social disruption and injuries, as well as economic consequences, not only associated with damage to the facilities but also production downtime, supply disruptions, etc.

To construct scenarios of losses, caused by earthquakes, vulnerability matrices, which link damage classes to impact intensity, must be used. The principles, underlying the MSK-64 scales and the new developed domestic seismic scale of the MSK type, will be used for the territory of the North Caucasus. Several approaches will be used to assess the losses directly under the conditions of various earthquake scenarios and average losses (for the different probability of nonexceedance) and a comparative analysis will be performed.

HAZUS is a standardized methodology for estimating earthquake losses implemented in GIS [Whitman and Lagorio, 1999]. HAZUS provides a quantitative estimate of losses in terms of direct costs to repair and replace damaged buildings and life support components; direct costs associated with the loss of function (for example, loss of business income); victims; people who have lost their homes; expenses for the elimination of blockages; regional economic implications; loss of functionality in terms of loss of function and recovery time for buildings, critical facilities such as hospitals and life support systems.

KOERILoss is a software developed by Earthquake Engineering, Bogadishi University (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI)). The software uses a loss estimation methodology (probabilistic or deterministic) developed by KOERI to perform the analysis for estimation of potential losses from earthquakes. The Code or Norms for the assessment of seismic scenarios was developed by the Italian National Seismic Service (SSN) [Di Pasquale and Orsini, 1997]. This model uses seismic intensity, which supposes its adaptation to the Russian MSK scale.

According to the definition, the risk is the probability of economic and social damage for a given territory over a certain period of time.

It is possible to assess risks, expressed as a percentage of losses for individual elements of risk or in monetary terms of these losses. The percentage of seismic risk is more convenient because such expression is more stable for certain elements of risk. The percentage ratio of losses does not depend on inflation and makes it possible to compare the results of assessments according to the materials of different countries, regardless of the ratio of the currency rate.

The area of the study was located on the territory of 1.35 km²; Gorky Street was considered as its southern border, the northern boundary passed along the of Dzhanayev Str., Markov Str., Osipenko Lane and Shchukin Brothers Str.; in the west, the region stretched to the Terek River, and in the east it was limited by the corresponding line of the constructed Vesna district. The built-up part of the area was conditionally divided into six approximately equal sites, which are named from east to west: 1) Vesna, 2) Balkinsky passage – Pionerov Street, 3) Pionerov Street – Lermontovskaya Street, 4) Lermontovskaya Street – Frunze Street, 5) Frunze Street – Lenin Street 6) Lenin Street – Terek River. Within each of the site, on the vector graphic, various objects and their number of storeys (separate houses and their groups, schools, institutes, administrative and public buildings, markets, etc.) were allocated, for each of which constructional types of buildings (A, B, C, D) and their number of storeys were established (Fig. 4). Constructional types of buildings were chosen while considering the design estimation documentation, as well as during the inspection of structures in-situ. The researchers of the institute were involved for this purpose. In each of the above-mentioned sites, its total area was determined, as well as the total area occupied by various built-up objects.

Data for some types of damage calculation is necessary in order to estimate the total damage:

- L_1 is economic damage as a result of damage and (or) destruction of residential buildings and structures;
- L_2 is economic damage as a result of damage and (or) destruction of urban infrastructure (excluding indirect losses);
- L_3 is economic damage as a result of damage and (or) destruction of buildings for social welfare services (institutions of management, health care, etc.);
- L_4 is social damage.

Damage caused by the secondary effects of earthquakes is taken into account by introducing specially designed multiplying coefficients for additional costs associated with the mitigation of the consequences (caused by the soils deformation, landslides, mudflows, etc.) including those connected with the impact of additional engineering protection structures from hazardous processes.

The total economic losses L is calculated as the sum of individual types of losses for all zones of varying intensity [Balassanian et al., 1999]:

$$L_i = \sum_{j=1}^j S_{ij} \times V_{ij} \times C_{ij} \quad (4)$$

where, S_{ij} is building stock density of type j in the zone with intensity i ; V_{ij} is an average vulnerability of a single object; C_{ij} is the average cost of a single object.

Distribution of economic losses during an intensity 8 earthquake is shown in Fig. 5, which clearly shows that the largest economic losses should be expected in areas 2 and 3, which, first of all, is due to soil conditions. At the same time, the risk of economic losses for site 1 (“Vesna” micro-district) is insignificant, due to the fact that the development of this area consists entirely of D-type buildings. At the same time, considering possible

tilting of buildings caused by soil liquefaction, an economic risk will increase several times and according to our assessments will be about 400 million rubles (damage to about 30% of building stock).

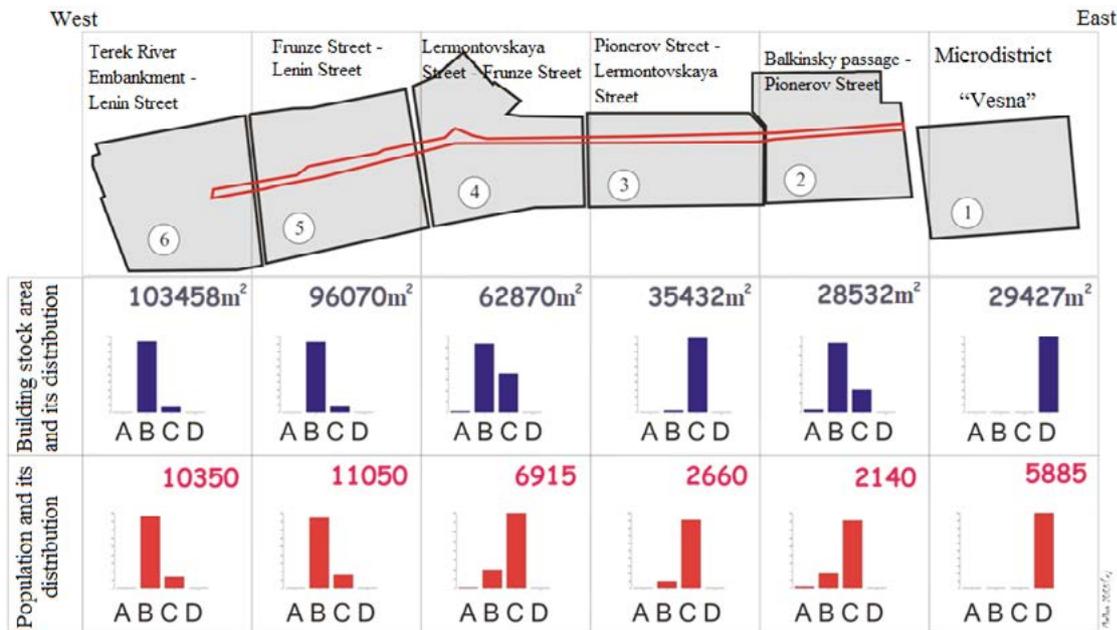


Fig. 4. Initial data for seismic risk assessment

Economic losses in the case of 8 points earthquake

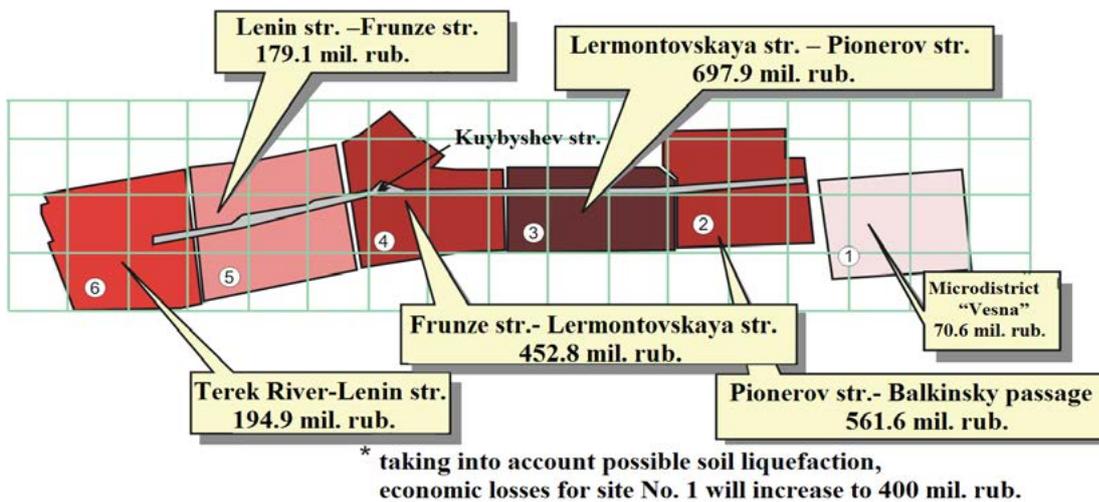


Fig. 5. Expected economic losses in the case of 8 points earthquake for Vladikavkaz (for average soil conditions)

5. Results and discussion

Based on the analysis of the results of geological surveys on Kuybyshev Street on the territory of Vladikavkaz six sites with different soil conditions were identified. Then, using the method of expert assessments, rating evaluations of the soils of the foundations

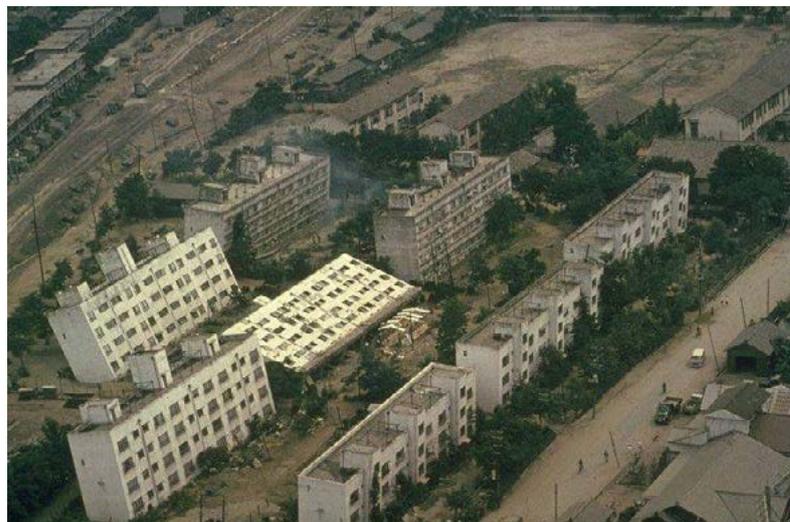
According to detailed seismic zoning and seismic microzonation data, the calculated intensity for the indicated site varies within 7-9 points.

Analysis of the calculation results shows that, depending on the type of buildings, the vulnerability varies widely. It can be well seen that the modern development of the “Vesna” micro-district is sharply distinguished by the minimality of the predicted vulnerability. Here it is almost zero at 6-9 points of impact. On the other hand, an analysis of the instrumental records of stations located in different soil conditions shows that this region is characterized by a significant seismic hazard due to the foundation soils in the form of a thick layer (20 meters or more) of clayey soils with a free-flowing consistency.

The results of the analysis of the worst effects of earthquakes show that the base plates, although they prevent the effect of the uneven settlement on the integrity of buildings,



*Fig. 6. Micro-district Vesna, Vladikavkaz
 $M_{\max} = 7.1$. Photo: T. V. Zaalishvili*



*Fig. 7. Soil liquefaction June 16, 1964, Niigata, Japan,
 $M_{\max} = 7.5$. Photo: Joseph Penzien*

with soft base soils make them very vulnerable to tipping. Examples of such accidents are well known (Niigata, 1964). In general, the question of the traditional increase in the intensity of a site in order to enhance them is still controversial, since even a second sagging of individual parts of a heavy building will lead to significant damage. Some authors believe that buildings are not recommended to be strengthened and believe that it is even harmful because, on soft soils, a heavy building may simply “sink” in the ground. Therefore, it is necessary to implement special measures to strengthen the soil itself.

When implementing the seismic impact of the expected level, and, as noted above this is the magnitude of $M = 7$ with an earthquake intensity of 9-10 points in the epicenter, an earthquake that is generated directly in the southern part of the city, will have the same intensity in the investigated site.

Considering that soil liquefaction usually takes place for flooded soils already with 8-point intensity, a very realistic manifestation of a seismic event similar to Niigata (Fig. 7.) seems quite feasible at the “Vesna” site (Fig. 6). It should be noted that during the Niigata earthquake (Japan, 1964), good quality houses simply lay on the ground almost undamaged. With minimal social losses, the economic damage was great. For site No. 1 (Vesna), represented by the ground layer, which contains a layer of soil of flowing consistency, the economic loss a priori will increase by 2.5 times and, according to calculations, will amount to 400 million rubles. (Fig. 5.). Due to the very high quality of buildings, by the way, designed for 8 points, social losses here will be minimal. Social losses during earthquakes are mainly determined by the level of damage to buildings and structures. At the same time, the so-called secondary effects in the form of landslides, soil liquefaction, floods can become defining and abnormally high at a certain confluence of negative factors. As noted above, it is necessary to note the problem of fires, which often accompany destructive earthquakes due to completely regular violations of gas pipelines, power lines, etc.

But the most of the buildings are masonry type, especially in historical regions, some of them are unique and needs special approach for vulnerability assessment and reinforcement techniques for risk mitigation.

Conclusions

Finally the issue of seismic risk assessment implementation technique in the North Caucasus consists in adoption and developing the main elements for the analog of HAZUS system. To construct scenarios of losses, caused by earthquakes, vulnerability matrices, which link damage classes to impact intensity, must be used. The principles, underlying the MSK-64 scales and the new developed domestic seismic scale of the MSK type, will be used for the territory of the North Caucasus as it shown for the test area of Kuibisheva street in Vladikavkaz city. Several approaches will be used to assess the losses directly under the conditions of various earthquake scenarios and average losses (for the different probability of nonexceedance) and a comparative analysis must be performed.

References

1. Ambraseys, N. N. and Bommer J.J. (1995). “Attenuation relations for use in Europe: An overview”. Proc. 5th SECED Conf. On European Seismic Design Practice: Research & Applicatinons, Balkema. pp. 67-73.
2. Ansal A, Erdik M, Studer J, Springman S, Laue J, Buchheister J, Giardini D, Faeh D, Koksai D (2004) Seismic microzonation for earthquake risk mitigation in Turkey. In: Proceedings of the 13th World Conference of Earthquake Engineering, Vancouver, BC. p. 1428

3. Ansal A., Tönük G., Kurtuluş A. (2010) Microzonation for Earthquake Scenarios (Chapter 2) //Earthquake Engineering in Europe, ed. By M. Garevski, A. Ansal. Springer, 2010. pp. 125-144.
4. Afshari, K., & Stewart, J. P. (2019, Aug). Insights from California Vertical Arrays on the Effectiveness of Ground Response Analysis with Alternative Damping Models [Article]. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 109 (4). pp. 1250-1264. <https://doi.org/10.1785/0120180292>
5. Balassanian S., Ashirov T., Chelidze T., Gassanov A., Kondorskaya N., Molchan G., Pustovitenko B., Trifonov V., Ulomov V., Giardini D., Erdik M., Ghafory-Ashtiany M., Gruenthal G., Mayer-Rosa D., Schenk V. and Stucchi M.; 1999: Seismic hazard assessment for the Caucasus test area. *Annali di Geofisica*, 42. pp. 1139-1151.
6. Bazzurro, P., & Cornell, C. A. (2004, Dec). Nonlinear soil-site effects in probabilistic seismic-hazard analysis [Article]. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 94 (6). pp. 2110-2123. <https://doi.org/10.1785/0120030216>
7. Beresnev I.A., Atkinson G.M. (1997). Modeling finite fault radiation from ω spectrum. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 87. pp. 67-84.
8. Beresnev I.A., Atkinson G.M. (1998). FINSIM – a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seismological Research letters*. Vol. 69. No. 1.
9. Bolisetti, C., Whittaker, A. S., & Coleman, J. L. (2018, Apr). Linear and nonlinear soil-structure interaction analysis of buildings and safety-related nuclear structures [Article]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 107. pp. 218-233. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.026>
10. Boore, D. M. (1983). “Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of radiated spectra.” *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 73. pp. 1865-1894.
11. Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2003, Feb). Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra [Article]. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 93 (1). pp. 314-331. <https://doi.org/10.1785/0120020029>
12. Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y. (1994). “Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerogram recorded from 1957 to 1993.” 5th US National Conf. on Earthq. Engrg., Chicago.
13. Campbell, K. W. (2003a). “Engineering models of strong ground motion.” *Earthquake Engineering Handbook*, edited by W. Chen and C. Scawthorn, CRC Press, New York.
14. Campbell, K. W. (2003b). “Strong-motion attenuation relationships.” *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, edited by W. Lee, H. Kanamori, P. Jennings and C. Kisslinger, Academic Press.
15. Chan, L. S., Chen, Y., Chen, Q., Chen, L., Liu, J., Dong, W., & Shah, H. (1998). Assessment of global seismic loss based on macroeconomic indicators. *Natural Hazards*, 17 (3), 269-283.
16. Chandra, J., & Gueguen, P. (2019, Nov). Nonlinear Response of Soil-Structure Systems using Dynamic Centrifuge Experiments [Article]. *Journal of Earthquake Engineering*, 23 (10), 1719-1741. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1398692>
17. Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 58, p. 1583-1606.
18. Dammala, P. K., Kumar, S. S., Krishna, A. M., & Bhattacharya, S. (2019a, Jun). Dynamic soil properties and liquefaction potential of northeast Indian soil for non-linear effective stress analysis [Article]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17 (6), 2899-2933. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00592-6>
19. Das, A (Das, Angshuman), Chakraborty, P (Chakraborty, Pradipta) (2020) Influence of Motion Energy and Soil Characteristics on Seismic Ground Response of Layered Soil *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING* DOI: 10.1007/s40999-020-00496-6

20. Davidson, R. A., Gupta, A., Kakhandiki, A., & Shah, H. C. (1999). Urban earthquake disaster risk assessment and management.
21. Di Pasquale G., Orsini, G. (1997). "Proposta per la valutazione di scenari di danno conseguenti ad un evento sismico a partire dai dati ISTAT." Atti del 8° Convegno nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Taormina, 477-486. EERI. (1986). "Reducing earthquake hazards: Lessons learned from earthquakes." EERI Publication, 86-02, San Francisco, Calif.
22. Dong, W. M., Shah, H. M., Klun, J., Green, S., & Earthquake Engn Res, I. (1994). ESTIMATING RESIDENTIAL DWELLING LOSSES – THE CALIFORNIA RESIDENTIAL EARTHQUAKE RECOVERY FUND (CRERF) EXPERIENCE.
23. Durukal, E., Erdik, M., & Uçkan, E. (2008), Earthquake risk to industry in Istanbul and its management. *Natural Hazards*, Vol. 44, No. 2, 199-212. doi 10.1007/s11069-007-9119-0.
24. Erdik, M. (2005), Earthquake Risk, Earthquake Rapid Response System, and Early Warning System in Istanbul. *Macalester International*, Vol. 15, Article 12 (Available at: <http://digitalcommons.macalester.edu/macintl/vol15/iss1/1>), 99-124.
25. Erdik, M. (2013). Earthquake Risk in Turkey. *Science*, 341 (6147), 724-725. <https://doi.org/10.1126/science.1238945>
26. Erdik, M. (2017). Earthquake risk assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (12), 5055-5092. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0235-2>
27. Erdik, M., Durukal, E., Biro, Y., & Birgören, G. (2000), İstanbul'da Binalar için Deprem Riski ve Risk Azaltımına Yönelik Somut bir Öneri. İkinci İstanbul ve Deprem Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 27 Mayıs 2000, İstanbul Teknik Üniversitesi Maçka Kampüsü, (pp. 131-149). İstanbul.
28. Erdik, M., Ulker, O., Sadan, B., & Tuzun, C. (2018). Seismic isolation code developments and significant applications in Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 413-437. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.009>
29. Fukushima, Y. and Tanaka, T. (1990). "A new attenuation relationship for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan." *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 757-783.
30. Gregor, N. J. (1995). "The attenuation of strong ground displacements." EERC Report No: UCB/EERC-95/02, Univ. of California at Berkeley.
31. Gubin, I. E., Seismotektonicheskii metod seismicheskogo raionirovaniya (Seismotectonic Method of Seismic Zoning), *Trudy Geofiz. instituta AN SSSR (Proc. Geophys. Inst. Acad. Sci. SSSR)*, 1950, no. 13 (140). 2.
32. Hartzell, S., Harmsen, S., Frankel, A., & Larsen, S. (1999, Dec). Calculation of broadband time histories of ground motion: Comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake [Article]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89 (6), 1484-1504.
33. HAZUS (1999). "Earthquake loss estimation methodology, Technical Manual, RMS, NIBS and FEMA." IDNDR-Radius, http://www.reliefweb.int/ocha_ol/programs/idndr/radius.html
34. HAZUS-MH 2.1 Technical Manual: Earthquake Model, FEMA, Washington, DC, 2014.
35. Kaklamanos, J., Bradley, B. A., Thompson, E. M., & Baise, L. G. (2013, Jun). Critical Parameters Affecting Bias and Variability in Site-Response Analyses Using KiK-net Downhole Array Data [Article]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103 (3), 1733-1749. <https://doi.org/10.1785/0120120166>
36. Kaklamanos, J., Baise, L. G., Thompson, E. M., & Dorfmann, L. (2015, Feb). Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites [Article]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69, 207-219. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.10.016>
37. Kaklamanos, J., & Bradley, B. A. (2018, Oct). Challenges in Predicting Seismic Site Response with 1D Analyses: Conclusions from 114 KiK-net Vertical Seismometer Arrays [Article]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108 (5A), 2816-2838. <https://doi.org/10.1785/0120180062>

38. Klyachko, M. A. (1994). ARGUMENTS FOR EARTHQUAKE HAZARD MITIGATION IN THE KAMCHATKA REGION. In B. E. Tucker, M. Erdik, & C. N. Hwang (Eds.), *Issues in Urban Earthquake Risk* (Vol. 271, pp. 215-219).

39. Klyachko, M. A., & Polovinchik, J. F. (1994). APPLICATION OF GIS AND SCENARIO TECHNIQUES TO URBAN EQ RISK ANALYSIS AND MITIGATION.

40. Kwok, A. L., Stewart, J. P., Hashash, Y. M. A., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., & Yang, Z. (2007, Nov). Use of exact solutions of wave propagation problems to guide Implementation of Nonlinear seismic ground response analysis procedures [Article]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (11), 1385-1398. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2007\)133:11\(1385\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:11(1385))

41. Mahani, A. B., & Kazemian, J. (2018, Nov). Strong ground motion from the November 12, 2017, M 7.3 Kermanshah earthquake in western Iran [Article]. *Journal of Seismology*, 22 (6), 1339-1358. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9761-x>

42. Medvedev, S. V., *Voprosy seismicheskogo raionirovaniya (Problems of Seismic Zoning)*, *Byull. Soveta po seismologii (Bulletin of Seismological Council)*, 1960, no. 8.

43. Pagliaroli, A., Aprile, V., Chamlagain, D., Lanzo, G., & Poovarodom, N. (2018, May). Assessment of site effects in the Kathmandu valley, Nepal, during the 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake sequence using 1D and 2D numerical modelling [Article]. *Engineering Geology*, 239, 50-62. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.011>

44. Pavel, F., Vacareanu, R., & Pitilakis, K. (2019, May). Intensity-dependent site amplification factors for Vrancea intermediate-depth earthquakes [Article]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17 (5), 2363-2380. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00563-x>

45. Phillips, C., & Hashash, Y. M. A. (2009, Jul). Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses [Article]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (7), 1143-1158. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.01.004>

46. Pinar, A., Honkura, Y., & Kuge, K. (2001). Seismic activity triggered by the 1999 Izmit earthquake and its implications for the assessment of future seismic risk. *Geophysical Journal International*, 146 (1), F1-F7. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01476.x>

47. Pinar A., Z. Coskun, A. Mert & D. Kalafat (2016) Frictional strength of North Anatolian fault in eastern Marmara region, *EARTH PLANETS AND SPACE*, 2016, 1880-5981, 68.

48. Polovinchik, I. F., Klyachko, M. A., & Koff, G. L. (1995). Development of Geoinformational System (GIS) for analysis and management of seismic risk on the urban areas. 10th European Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Vols 1-4, 1141-1146.

49. Poul, M. K., & Zerva, A. (2018, Sep). Efficient time-domain deconvolution of seismic ground motions using the equivalent-linear method for soil-structure interaction analyses [Article]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 112, 138-151. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.032>

50. Rathje, E. M., Kottke, A. R., & Trent, W. L. (2010a, Apr). Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Response Analysis [Article]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (4), 607-619. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000255](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000255)

51. Riga, E., Makra, K., & Pitilakis, K. (2018, Jul). Investigation of the effects of sediments inhomogeneity and nonlinearity on aggravation factors for sedimentary basins [Article]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, 284-299. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.016>

52. Riznichenko, Yu. V. (1965) From the Earthquake Source Activity to Ground Motions, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Zemli*, no. 11, pp. 1-12.

53. Shah, H. C. (1995). THE INCREASING NATURE OF GLOBAL EARTHQUAKE RISK. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 5 (1), 65-67.

54. Shah, H. C. (2009). Catastrophe Risk Management in Developing Countries and the Last Mile. 1755 Lisbon Earthquake: Revisited, 7, 111-120.

55. Shah, H. C., Wong, F. S., & Dong, W. (1987). IRAS – AN EXPERT SYSTEM FOR EARTHQUAKE INSURANCE AND INVESTMENT RISK ASSESSMENT.
56. Shah, H. C., Bendimerad, M. F., Stojanovski, P., & Int Assoc Earthquake, E. (1992). RESOURCE-ALLOCATION IN SEISMIC RISK MITIGATION.
57. Sobolev, G. A. (1992) Fizika ochaga i prognoz zemletryasenii (Source Physics and Prediction of Earthquakes), Moscow: Geofiz. Tsentr RAN, IFZ RAN, 1992. (In Russian)
58. Sonmezer, Y. B., Bas, S., Isik, N. S., & Akbas, S. O. (2018, Nov). Linear and nonlinear site response analyses to determine dynamic soil properties of Kirikkale [Article]. Geomechanics and Engineering, 16 (4), 435-448. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.4.435>
59. Stupazzini, M., Paolucci, R., & Igel, H. (2009, Feb). Near-Fault Earthquake Ground-Motion Simulation in the Grenoble Valley by a High-Performance Spectral Element Code [Article]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99 (1), 286-301. <https://doi.org/10.1785/0120080274>
60. Terzi, V. G., & Ignatakis, C. E. (2018, Jul). Nonlinear finite element analyses for the restoration study of Xana, Greece [Article]. Engineering Structures, 167, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.034>
61. Thebian, L., Najjar, S., Sadek, S., & Mabsout, M. (2018, Apr). Numerical investigation of dip-slip fault propagation effects on offshore seabed sediments [Article]. Engineering Geology, 237, 149-167. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.008>
62. Trifunac, M. D., & Todorovska, M. I. (1998, Jan). Nonlinear soil response as a natural passive isolation mechanism – the 1994 Northridge, California, earthquake [Article]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 17 (1), 41-51. [https://doi.org/10.1016/s0267-7261\(97\)00028-6](https://doi.org/10.1016/s0267-7261(97)00028-6)
63. Tsiapas, Y. Z., & Bouckovalas, G. D. (2019, Jan). Equivalent linear computation of response spectra for liquefiable sites: The spectral interpolation method [Article]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 116, 541-551. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.033>
64. Ulomov V., Strakhov V., Giardini D. (1993) Seismic hazard assessment in Northern Eurasia *Annali di Geofisica*. Vol. XXXVI. №3-4. June-July. 1993. pp. 83-92.
65. Ulomov V. (1994) Structural and dynamical regularity of Eurasia intracontinental seismicity and some aspects of seismic hazard prediction // XXIY General ESC Assembly. 1994 September 19-24. Proceedings and Active Report 1992-1994. Vol. 1. Athens. Greece. P. 271-281.
66. Ulomov V.I., Bogdanov M.I., Pustovitenko B.G., Peretokin S.A. Strom A.L., Akatova K.N., Danilova T.I., Medvedeva N.S. Analysis of the seismic hazard of the North Caucasus and Crimea as part of the general seismic region of the territory of the Russian Federation. *Journal of Engineering Research*, 13, 2015, pp. 12-27. (in Russian)
67. Wang, H. Y., Jiang, W. P., Wang, S. Y., & Miao, Y. (2019, May). In situ assessment of soil dynamic parameters for characterizing nonlinear seismic site response using KiK-net vertical array data [Article]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17 (5), 2331-2360. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-00539-3>
68. Whitman, R. V. and Lagorio, H. J. (1999). “The FEMA-NIBS methodology for earthquake loss estimation, <http://www.fema.gov/hazus/hazus4a.html>.
69. Yamamoto Y., D. Kalafat, A. Pinar, N. Takahashi, Z. Coskun, R. Polat, Y. Kaneda & H. Özener, Fault geometry beneath the western and Central Marmara Sea, Turkey, based on ocean bottom seismographic observations: Implications for future large earthquakes, *TECTONOPHYSICS*, 2020, 0040-1951, 791, 1, 1-14.
70. Yang, J., Sato, T., & Li, X. S. (2000, Jan). Seismic amplification at a soft soil site with liquefiable layer [Article]. *Journal of Earthquake Engineering*, 4 (1), 1-23. <https://doi.org/10.1142/s1363246900000023>
71. Yang, X. L., & Li, Z. W. (2018, May). Kinematical analysis of 3D passive earth pressure with nonlinear yield criterion [Article]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42 (7), 916-930. <https://doi.org/10.1002/nag.2771>

72. Yuchang L. and Kemon L. (1991) The economic influences of the earthquakes in cities, Earthquake strategy for cities, Earthquake Press, Beijing, 1991, pp. 308-319.

73. Zaalishvili V. B., Berezko A. E. (1999) View assessments seismic risk urban areas by using GIS//International Symposium "Engineering seismology and earthquake resistance". 19-21 May. Tbilisi, 1999. p. 15 (In Russian)

74. Zaalishvili V. B., Chachava N. T., Gogmachadze S. A. Seismic risk assessment methods in old Tbilisi. Natural Disasters designing for safety. Proceedings of UIA work programmed conference. UIA-Chamber of Architects of Turkey. – Istanbul. 2001, pp. 81-88.

75. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Burdzieva O. G. (2010) Determination of seismic impact on the basis of specific engineering-seismological situation of region // "Earthquake engineering. Buildings safety", 2010 No. 1. pp. 35-39 (in Russian).

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

77. Zaalishvili V. B., Kanukov A. S. Algorithm for creating information systems for urban planning activities. Seismic construction. Safety of structures. 2013. No. 6. pp. 19-22 (in Russian)

78. Zaalishvili V. B. Spectral characteristics of seismic waves at strong ground motions (2016, Apr) INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATE, 10, 1706-171.

79. Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Melkov D. A., Makiev V. D., Dzobelova L. V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. International Journal of GEOMATE. 2018. Vol. 15. No. 51. pp. 160-166.

80. Zaalishvili, V., Kanukov, A., Melkov, D., Burdzieva, O. (2019a, Nov). Transformation of spectral peculiarities of the soil response to dynamic impacts of varying value [Article]. Akustika, 34, 175-180.

81. Zaalishvili V. B., Burdzieva O. G., Kanukov A. S., Melkov D. A. (2019b) Seismic risk of modern city. Open Construction and Building Technology Journal. 2019. Vol. 13. No. 1. pp. 308-318.

82. Zaalishvili V. B., Burdzieva O. G., Kanukov A. S., Melkov D. A., Dzeranov B. V. Seismic risk of modern city //The Second Eurasian RISK-2020 Conference and Symposium. Innovations in Minimization of Natural and Technological Risks. Minimization of the Most Prevalent Project Risks in the Oil and Gas Industry. Abstracts. 2020. pp. 88-89.

83. Zeghal, M (Zeghal, M); Elgamal, AW (Elgamal, AW); Tang, HT (Tang, HT); Stepp, JC (Stepp, JC) (1995) Lotung downhole array. 2. Evaluation of soil nonlinear properties. Journal Of Geotechnical Engineering-ASCE. Vol. 121, issue 4. pp. 363-378. DOI: 10.1061/ (ASCE) 0733-9410 (1995) 121:4 (363)

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 550.8.052

DOI:

Оригинальная статья

Особенности строения и перспективы
нефтегазоносности палеоканала, выявленного
по данным МОГТ в восточной части Каракульско-
Смушковой зоны поднятий

А. А. Дробинский , Н. Н. Гольчикова , П. П. Камнев 

Астраханский государственный технический университет, Россия, 414056, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16, e-mail: a. drobinskiy@yandex. ru;

Статья поступила: 29.07.2020, доработана: 12.08.2020, одобрена в печать: 14.08.2020

Резюме: Актуальность работы. В настоящее время для многих недропользователей юга России представляют интерес нефтегазоперспективные объекты неглубокого залегания в виду небольших потенциальных затрат на их освоение. Данная работа посвящена изучению подобного объекта, связанного с перспективами выявления неантиклинальных ловушек углеводородного сырья. **Цель исследования.** В ходе сейсморазведочных работ 2008-2019 гг. на территории Каралатского лицензионного участка (Астраханская область, восток Каракульско-Смушковой зоны поднятий) по сейсмическим данным был выявлен уникальный по размерам и форме для данного района исследования палеорусловый объект, приуроченный к эрозионному врезу по кровле верхнемеловых отложений. Основным направлением исследования являлось изучение его строения, природы и перспектив освоения. **Методы исследования.** Изучение объекта проводилось на основе имеющихся данных сейсморазведки (метод общей глубинной точки, двумерная модификация). Выполнена обработка и интерпретация накопленного сейсмического материала, сделан расширенный анализ скоростей, проведены структурные построения. Проведено исследование динамики волновой картины на качественном уровне и путём атрибутного анализа. **Полученные результаты.** Палеорусло формировалось, предположительно, в неогене, в условиях наклона территории с севера на юг. В ходе его изучения было уточнено строение, конфигурация, предварительно оценены особенности залегания слагающих пород. Протяжённость объекта по оси – 25,4 км, площадь – 65,4 кв. км, глубина – 750-1050 м. Точную стратиграфическую принадлежность выполняющих врез осадков ещё предстоит уточнить в виду отсутствия соответствующих данных глубокого бурения на территории исследования. Результаты привязки к скважинам сопредельного Кирикилинского участка указывают, что вмещающие породы относятся к верхнему мелу, на отдельных участках врез достигает и нижнемеловых осадков. Изучение аналогичных объектов и история геологического развития района позволяют предположить, что выполняющие врез породы относятся к плиоцену. Исследования указывают на то, что объект приурочен к главному руслу древней дельты или нижнему течению реки, аналогичной современной р. Волга. Энергия волн, отраженных от горизонтов заполняющих пород, выше, чем от горизонтов вмещающих, что нехарактерно для известных палеорусловых объектов сопредельных территорий. При скоростном анализе волнового поля отмечены аномально низкие значения эффективных скоростей в зоне объекта. В результате получено подтверждение палеорусловой природы объекта, установлено сложное и непостоянное залегание пород с признаками латеральной смены литологического состава, возможного наличия флюидов. Полученные данные позволили предварительно оценить перспективы нефтегазоносности палеоканала и наметить планы дальнейшего изучения геофизическими методами, а также постановки поискового бурения.

Ключевые слова: сейсморазведка МОГТ-2D, обработка, интерпретация, палеоканал, неантиклинальная ловушка, нефть, газ.

Для цитирования: Дробинский А. А., Гольчикова Н. Н., Камнев П. П. Особенности строения и перспективы нефтегазоносности палеоканала, выявленного по данным МОГТ в восточной части Каракульско-Смушковской зоны поднятий. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 113 – 125. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF OIL AND GAS FIELDS

DOI:

Original paper

Structure features and oil and gas prospect of paleochannel revealed with 2D seismic data in The East of Karakulsko-Smushkovskaya uplift zone

A. A. Drobinskiy , N. N. Golchikova , P. P. Kamnev 

Astrakhan State Technical University, 16 Tatischeva Str., Astrakhan 414056, Russian Federation, e-mail: a.drobinskiy@yandex.ru

Received: 29.07.2020, revised: 12.08.2020, accepted: 14.08.2020

Abstract: Relevance. Today carbohydrates blocks holders in south of Russia take an interest in oil and gas potential objects with superficial bedding because of its reasonable exploration costs. This research work is devoted to study of so object concerned with carbohydrates traps revelation prospective. **Aim.** The unique because of its size and shape paleo-channel object confined with erosive cut on the top of cretaceous sediments was discovered with seismic data as the result of seismic prospecting works in 2008-2019 on the Karalatskiy block (Astrakhan region, East of Karakulsko-Smushkovskaya uplift zone). The main direction of the research was the studying of its structure, origin and exploration prospective. **Methods.** The study was based on available seismic data (common reflection point method, 2D modification). Processing and interpretation of total seismic data volume were realized, expanded velocity analysis was performed, structure mapping were carried out. The qualitative level dynamic analysis and attribute analysis were realized. **Results.** It is supposed that ancient river bed were forming in Neogene in condition of inclination of territory in south direction. The structure and configuration of this object were defined more precisely and bedding peculiarities were preliminary estimated during studying. The extension of the object is 25.4 kilometers, the area is 65,4 square kilometers, the depth is from 750 to 1050 meters. Exact stratigraphy of sediments filling up the cut, needs to be defined more exactly because of lack of boring data on the field. The results of matching with wells of neighbor Kirikilinskiy block show late cretaceous age of base rocks, some spans of the cut reach lower cretaceous sediments. The study of similar objects and geological history of the region allow supposing that rocks filling up the cut belong to Pliocene. Research shows that the object is confined to main channel of ancient delta or lower part of ancient river similar to present-day Volga River. Filling up rocks horizons reflected waves energy is higher than for base rocks, this occurrence is not typical for paleo-channel objects of contiguous areas. Abnormally low values of RMS velocities were detected during the velocity analysis in the object area. The confirmation of paleo-river genesis of the object was achieved as the result, complex and inconstant structure of the rocks with lateral lithology changing and potential presence of fluids was detected. The result data allowed to estimate preliminary perspectives of oil and gas content for the paleochannel and to outline the subsequent geophysical study and exploration drilling performance.

Keywords: exploration seismology 2D, processing, interpretation, paleochannel, non-anticlinal trap, oil, gas.

For citation: Drobinskiy A. A., Golchikova N. N., Kamnev P. P. Structure features and oil and gas prospect of paleochannel revealed with 2D seismic data in The East of Karakulsko-Smushkovskaya uplift zone. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (3): 113 – 125. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

Введение

В пределах Южного федерального округа РФ значительный интерес для коммерческого освоения малыми недропользователями с учётом современных условий представляют нефтегазоперспективные объекты, расположенные на сравнительно небольших глубинах, так как это позволяет сократить возможные затраты на поисковое и разведочное бурение. Исследователи юго-западной части Прикаспийской впадины в последнее время всё чаще обращают внимание на перспективы кайнозойского (т.н. третья нефтегазоносная толща) комплекса отложений, связанного с апшеронским и бакинским ярусами [Пыхалов и др., 2016]. В данной статье рассматривается выявленный по сейсмическим данным палеорусловый объект (палеоканал), расположенный в пределах Каралатского лицензионного участка Астраханской области, также сложенный кайнозойскими отложениями и являющийся перспективным для поиска ловушек углеводородов. В тектоническом отношении данное палеорусло приурочено к восточной части Каракульско-Смушковской зоны поднятий, расположено в непосредственной близости от северного склона Камызякского вала. Территориально объект относится к Камызякскому и Приволжскому районам области и находится в зоне достаточной доступности как для исследований сухопутной сейсморазведкой МОГТ-2D/3D, так и для глубокого бурения.

Объект впервые был замечен на данных редкой сети профилей съёмки МОГТ-2D, поставленной в 2008-2009 гг. с целью исследования девонско-каменноугольного перспективного комплекса. Первоначально было сделано предположение, что выделенная по кровле меловых отложений неоднородность является протяжённым грабеном. Однако после постановки детализационной съёмки МОГТ-2D в 2010-2011 гг., целью которой являлось уточнение структуры мезозойских отложений, сеть сейсморазведочных профилей в зоне данного объекта сгустилась, что позволило изучить его детальнее.

Следует отметить, что в ходе проведённых в прошлые годы исследований рассматриваемый палеоканал выделялся и картировался лишь в общих чертах из-за большего внимания к другим объектам, относящимся к карбону, юре, нижнемеловым и четвертичным отложениям он не изучался детально.

Цель исследования

Целью настоящего исследования являлось детальное изучение строения, истории геологического развития, определение планов дальнейшего исследования и рассмотрение перспектив промышленного освоения рассматриваемого палеоруслового объекта с учётом возможного наличия ловушек углеводородного сырья в его пределах. В виду наличия лишь сейсмического материала по площади исследования, планировалось извлечение максимального объёма доступной информации из сейсмических данных, а также использование сведений о строении района в целом, опыта изучения схожих объектов и отложений по соседним территориям.

Методы исследования

Исследование выполнено по выборке сейсмических профилей МОГТ-2D, отработанных с вибоисточником (шаг возбуждения 40-100 м; шаг приёма 20-50 м, длина годографа 3-5 км, кратность ОСТ 60-75) в объёме около 300 кв. км (непосредственно в зоне объекта), полученного в 2007-2011 гг. для структурного картирования

в масштабе 1:100 000 в ходе поисковых работ на нефть и газ, выполненных ОАО «Астраханская геофизическая экспедиция». Основными методическими приёмами являлись структурные построения, анализ структурных признаков, динамический (атрибутивный) анализ сейсмической записи на качественном уровне.

В виду отсутствия скважин глубокого бурения в пределах Каралатского лицензионного участка, изучение рассматриваемого палеоруслового объекта проводилось только по сейсмическим данным. Стратиграфическая привязка сейсмических данных к скважинным данным в пределах территории исследования не выполнялась в виду отсутствия скважин глубокого бурения в пределах Каралатского участка. Для привязки использовались скважины сопредельного Кирикилинского участка, корреляция горизонтов была выведена на них через имеющийся субрегиональный профиль, пересекающий несколько соседних участков.

В ходе обработки материала МОГТ-2D в заполняющих русло терригенных осадках было отмечено аномальное снижение эффективных скоростей отражённых волн (на фоне вмещающей толщи карбонатных пород верхнемелового возраста). Данная аномалия связана с соответствующим перепадом пластовых скоростей. Падение скорости упругих волн в пределах объекта также нашло выражение в виде «затяжки» отражений кровли нижнего мела, кровли юры под палеоканалом на временных разрезах (рис. 2б). Упомянутое смещение горизонтов было использовано для предварительного определения интервальной скорости пород, заполнивших эрозионный врез. Расчётное её значение составило 2200 м/с, что соответствует скорости терригенных отложений ожидаемого состава на данной глубине. Скоростная «затяжка» также позволяет судить о глубине вреза при сложностях в разделении отражений от пород, вмещающих и заполняющих палеорусло [Dow, 1978; Turhan et al., 1998].

Отдельные участки временных разрезов, в пределах которых присутствуют разрывные нарушения, характеризуются резким ухудшением прослеживаемости отражающих горизонтов под палеоканалом, что является признаком зон локальной трещиноватости. Данное явление подтверждает, что исследуемый объект может быть палеоканьоном, а также указывает на возможность вертикальной миграции углеводородов по разломам из нижележащих нефтематеринских толщ в песчаные тела палеорусла. Флюидопроводимость разломов может быть уточнена с помощью анализа сейсмических данных по специальным методикам [Акрамходжаев, 1986].

По суммарным временным разрезам был также выполнен атрибутный анализ, пример результатов которого представлен на рисунке 1.

Распределение значений атрибута «хаос», связанного с регулярностью энергии на разрезе, характеризуется наличием аномалий в пределах руслового объекта и под ним, отражающих сложность формы и невыдержанность отражающих границ пород, заполнивших врез. Распределение значений мгновенной фазы, подчёркивающее оси синфазности, позволяет увидеть различие структуры пород, вмещающих и заполнивших эрозионный врез, одновременно уточнив сложную конфигурацию границ последних [Fomel, 2007]. Судить о залегании пород можно по атрибуту «градиент магнитуды», распределение значений данной характеристики сейсмической записи позволяет подтвердить наличие в пределах палеоруслового тела невыдержанных по латерали пачек пропластков с разными углами падения в сечении разреза. Последний атрибут может использоваться для детального изучения заполнивших врез осадков.

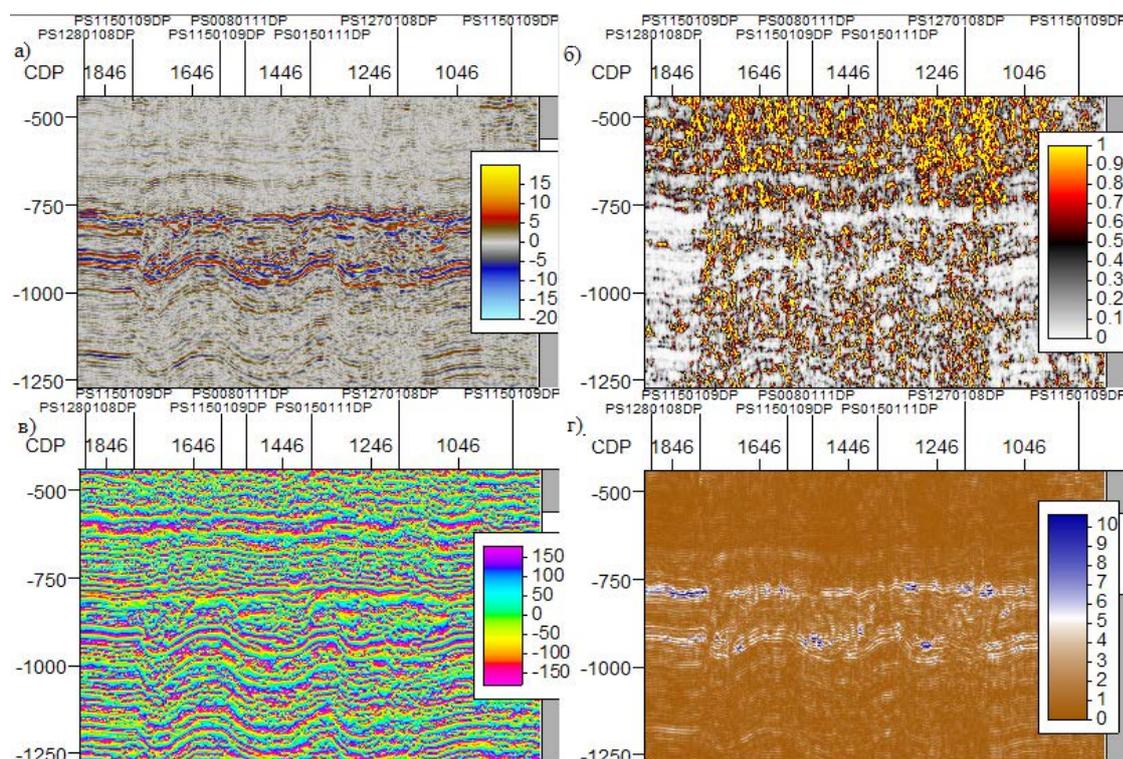


Рис. 1. Фрагмент временного сейсмического разреза по профилю 0130111 с выделением областей сечения палеоруслового объекта (а) и распределение атрибутов: б – «хаос»; в – мгновенная фаза; г – «градиент магнитуды».

Fig. 1. The part of seismic profile 0130111 with paleochannel section areas (a) and attributes assignment: b – «chaos»; c – instantaneous phase; d – «magnitude gradient».

По результатам атрибутного анализа можно сделать выводы:

- палеорусловая природа изучаемого объекта, в целом, подтверждается;
- залегание пород, заполняющих эрозионный врез, весьма сложное и непостоянное;
 - в пределах вреза выявлено много непротяжённых, однако, достаточно амплитудных отражений, которым может соответствовать смена состава пород, флюидов;
 - для выявления перспективных песчаных тел, пластов, к которым могут быть приурочены ловушки нефти и газа, можно использовать сейсмические данные, но эти данные должны быть максимально детальными, предпочтительно – трёхмерными [Turhanetal, 1998].

Результаты исследования

В ходе проведённой работы установлено, что объект представляет собой достаточно крупный эрозионный врез, являющийся, предположительно, погребённым руслом палеореки, заполненным терригенными образованиями, относящимся к бассейну древнего моря, располагавшемся южнее исследуемого участка.

Имеющиеся результирующие сейсморазведочные материалы позволяют сделать вывод о конфигурации и размерах геологического тела. Глубина до кровли осадков, слагающих данный объект, составляет около 750, а до подошвы – 950-1050

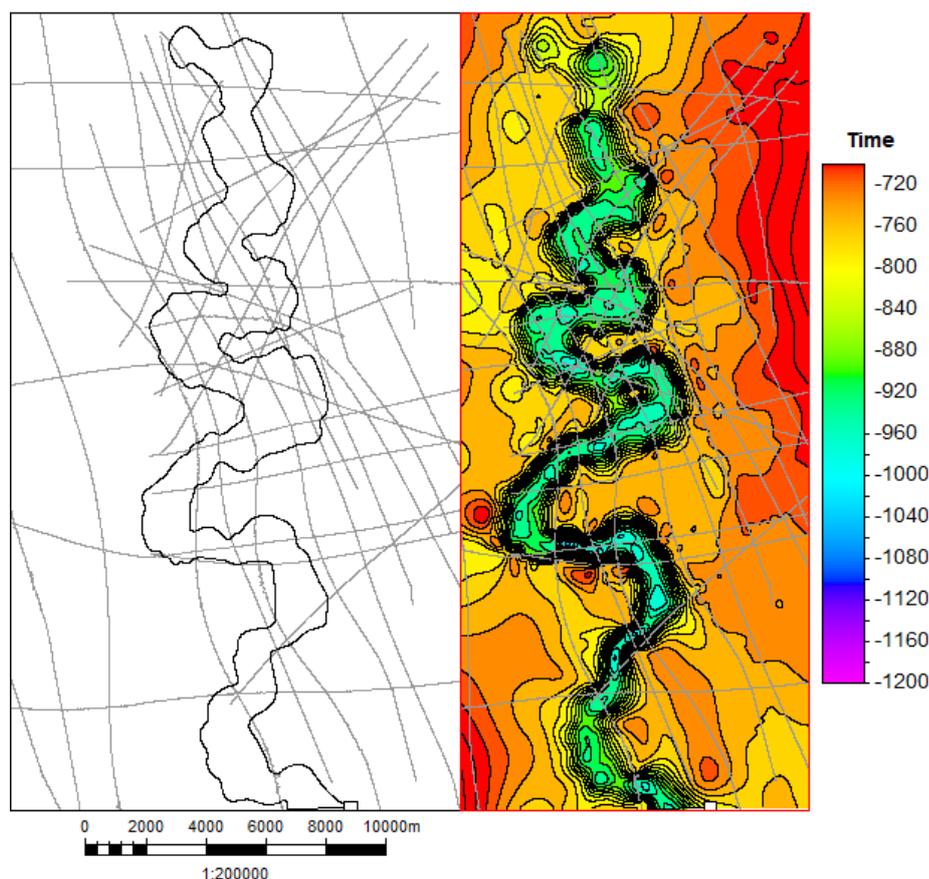


Рис. 2. Контур эрозионного вреза на схеме расположения профилей МОГТ-2D (а) и поверхность изохрон по кровле мела (изображения подготовлены авторами) (б). /

Fig. 2. Erosive cut contour on the general chart of 2D seismic work (a) and on the isochrones surface of the top of the Cretaceous (b) (authors images).

метров. Рассматриваемый палеоканал имеет примерную длину по оси около 25,4 км, среднюю ширину до 1,5-2 км (в пережимах – 0,7-1,3 км, в наиболее широких местах – 3,6 км), площадь – 65,4 кв. км, что позволяет рассчитывать на рентабельные для освоения прогнозные ресурсы углеводородов в случае подтверждения перспективности (рис. 2).

Сейсмический горизонт, соответствующий кровле верхнего мела, по которой был выделен палеоврез, имеет в пределах участка работ выдержанный наклон с севера на юг от абсолютных отметок –700 м до –860 м.

Севернее района исследования, например, на территории Волгоградской области, значительные по размеру эрозионные врезы выделялись неоднократно. Но на территории Астраханской области палеоканал сравнительно крупных размеров (как в плане, так и по мощности) обнаружен впервые. Есть основания предполагать, что изучаемый объект является древним руслом реки, аналогичной по своему расположению современной р. Волга [Воронин, 1999].

Отличительной особенностью данного палеоканала при выделении его на сейсмических разрезах является высокая энергия и сложная конфигурация отражений от геологических границ пород, выполняющих эрозионный врез, что может свидетельствовать как о значительных изменениях литологии, так и, в отдельных случаях, о наличии флюидов. Для большинства крупных эрозионных врез динамика

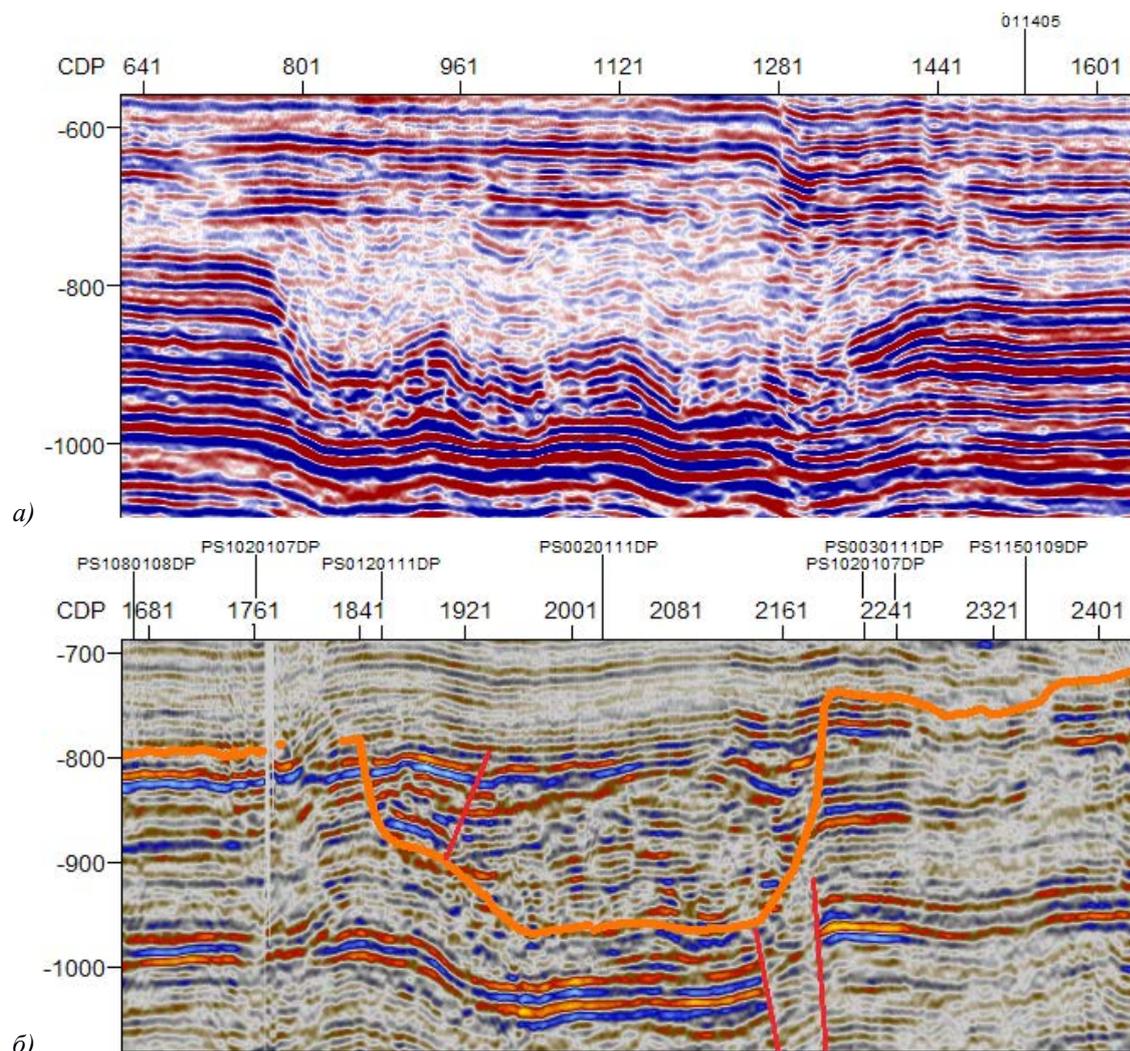


Рис. 3. Сравнение динамики волновой картины, характерной для эрозионных врезов Волгоградской области (а) и рассматриваемого объекта (Каралатский л. у.) (фрагмент временного мигрированного разреза по профилю 0160111; оранжевым показана корреляция по кровле верхнего мела) (б). /

Fig. 3. Comparison of the typical wave pattern dynamic of erosive cuts in Volgograd region (a) and of concerned object (part of time migrated section on 0160111 profile; orange is correlation of Cretaceous top) (b).

отражений внутренних геологических границ значительно ниже, чем для вмещающих пород (рис. 3) [Bloomer, 1977].

Характерной чертой описываемого объекта также является наличие в его пределах значительного числа небольших разломов и зон локальной трещиноватости. По сейсмическим данным можно отметить наличие крутых обрывистых берегов, что в сочетании со значительной глубиной и формой вреза позволяет назвать его палеоканьоном [Конибир, 1979].

История геологического развития. Результаты картирования и исследования геологического строения вмещающих пород позволяют изучить историю формирования и в свете её рассмотреть перспективы нефтегазоносности палеоканала. Стратиграфическую принадлежность отложений, слагающих и вмещающих рассматри-

ваемый объект, ещё предстоит уточнить, однако общие моменты формирования можно гипотетически представить. Русло реки, вероятно, формировалось во время одной из сравнительно длительных регрессий моря. Большая глубина вреза именно на рассматриваемом участке, а также сильное меандрирование могут указывать на локальное воздымание территории во время формирования русла в этой области [Михайлов, 1977]. Это может также объяснить значительную глубину палеорусла на данном участке и его местное сохранение, в то время как севернее и южнее русловые отложения могли быть размыты. В дальнейшем, при начале трансгрессии и смещении базиса эрозии, древняя река заполнила собственное русло обломочным материалом, который позднее был перекрыт мелководными морскими отложениями [Алексеев и др., 2005; Алиев, 1986; Воронин, 1999].

Следует отметить, что с учётом истории геологического развития изучаемого района региональный тренд наклона с севера на юг, который имеет поверхность подстилающих палеорусло отложений в наше время, с большой вероятностью существовал и во время формирования вмещающего эрозионного вреза [Глумов, 2004].

По результатам привязки сейсмических данных к скважинам Кирикилинским 4, 6 и 8 породы, вмещающие палеоканал, относятся к верхнему мелу. В наиболее глубоких местах врез достигает нижнемеловых отложений. Сделать предположение о возрасте осадков, выполняющих эрозионный врез, довольно сложно в виду отсутствия изученных бурением аналогичных объектов на сопредельных территориях. Однако на основе данных о палеотектонической обстановке можно предположить, что русло формировалось в неогеновое время. Согласно результатам региональных палеотектонических исследований, в раннем плиоцене на изучаемой территории происходило обмеление морского бассейна. Позднее происходило формирование преакчагыльских поднятий и широкое развитие эрозионных процессов [Воронин, 1999]. Данные по аналогичным объектам позволяют утверждать, что осадки, выполняющие эрозионные врезы, можно датировать тем же возрастом, что и сам эрозионный врез, считая их образующимися практически одновременно [Хобсон, 1980]. Следовательно, рассматриваемый палеоканал на основе анализа сейсмических данных можно отнести к плиоцену.

В виду достаточно крупных размеров палеоканала можно сделать следующие предположения о его позиционировании в древней речной системе:

- русло крупной реки, аналогичной современной Волге в нижнем течении;
- пойма реки в нижнем течении;
- главное русло древней дельты.

Уточнение происхождения объекта и выяснение обстановки его формирования будет являться одной из важнейших задач дальнейшего его исследования.

Рассмотрение перспектив нефтегазоносности объекта. Исходя из особенностей строения и формирования, гипотетически возможны несколько вариантов аккумуляции углеводородов в пределах исследуемого объекта:

- вертикальная восходящая миграция из вмещающих палеорусло пород;
- вертикальная восходящая миграция из пород более глубокого залегания (например, нефтематеринских отложений нижнего мела или средней юры) по разрывным нарушениям, которые пересекают палеорусло [Магара, 1982];

- вертикальная нисходящая миграция из перекрывающих глинистых толщ, богатых органикой и обладающих на региональном уровне известным потенциалом содержания УВ [Воронин, 1999; Dow, 1978];
- горизонтальная миграция по главному руслу, весьма вероятная в виду регионального наклона территории с севера на юг, с накоплением УВ в локальных ловушках в пределах палеорула;
- сами погребённые палеорусловые осадки, как замкнутая система, учитывая возможные пойменные условия образования, могли содержать достаточное количество ОВ для формирования залежей природного газа при внутренней миграции [Акрамходжаев, 1986; Ляшевич, 1983].

Отмеченное значительное меандрирование палеореки (рис. 1) может являться предпосылкой наличия крупных песчаных тел. При погружении с севера на юг в пределах меандров могут образовываться структуры примыкания к палеобрывам. На региональном склоне меандры, меняя направление, образуют множество небольших локальных структур с ярко выраженной амплитудой отражений, что, вероятно, может быть связано и с небольшими локальными залежами углеводородов [Coleman, 1980]. Возможные залежи могут иметь формы пластов, линз, карманов, колец, полуколец, козырьков и т. д. Гравитационные складки и структуры облекания над эрозионными останцами, сложенными плотными породами, являются наиболее легко различимыми по разрезам МОГТ-2D, и также являются перспективными (рис. 4) [Назаркин, 1979; Джумагулов, 1983].

Ожидаемый коллектор возможных залежей нефти или газа – обломочные породы различной размерности частиц, от песчаников и алевритов до галечников и гравеллитов. Значительную часть коллектора могут составлять чистые русловые кварцевые пески, к которым могут быть приурочены основные залежи УВ. Наиболее вероятные флюидоупоры – пласты глинистых пород, по латерали залежи могут

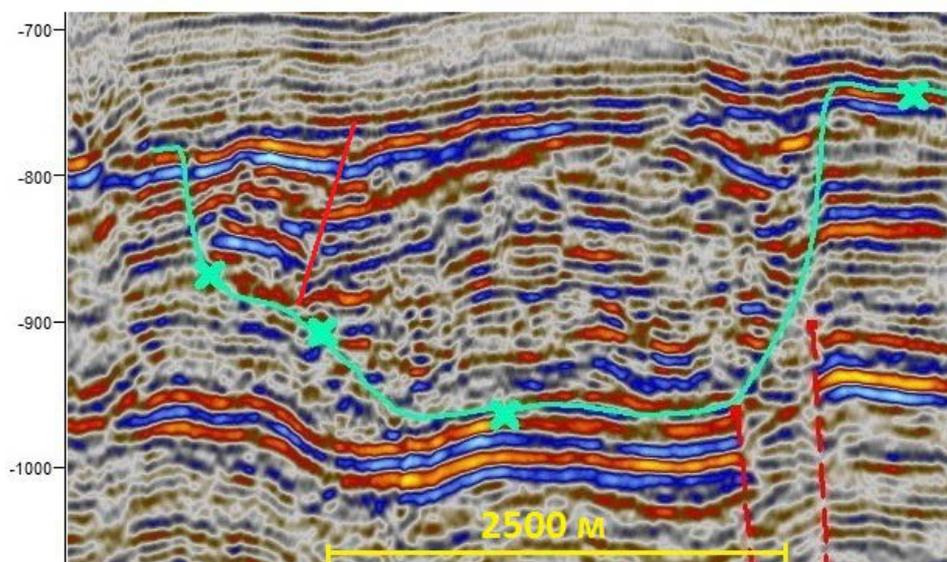


Рис. 4. Потенциально перспективная структура в пределах палеорула (увеличенный фрагмент временного мигрированного разреза по профилю 0160111; бирюзовым показана корреляция по кровле верхнего мела). /

Fig. 4. Potentially prospective structure within the bounds of ancient riverbed (zoomed part of time migrated section on 0160111 profile; turquoise is correlation of Cretaceous top).

быть ограничены в том числе плотными мергелями вмещающих меловых отложений. Следует отметить, что практически неизвестны случаи отсутствия залежей углеводородов в палеоканалах. В значительном числе случаев добываемый флюид – нефть [Конибир, 1979; Bloomer, 1977].

Примеры схожих по строению месторождений. Примером успешного открытия и освоения сходного по строению объекта является Покровское нефтяное месторождение, расположенное в Самарской области [Керимов, 1987]. На данном месторождении бурением выявлена шнурковая залежь нефти, представляющая собой вытянутую почти в меридиональном направлении полосу мелкозернистого кварцевого песчаника, залегающего среди глин. Длина оконтуренной залежи 10 км, ширина от 250 до 1300 м. С севера на юг вдоль её продольной оси мощность песчаника колеблется в пределах 5-10 м, к краям песчаники выклиниваются, замещаясь глинами.

На восточном борту НГБ Паудер-Ривер (США) песчаники свиты Ньюкасл, выполняющие древнее русло, протягиваются узкой полосой на расстояние около 40 км. С ними связана нефтяная залежь в литологически замкнутой ловушке, охватывающей ряд площадей. Ширина руслового заполнения от 1 до 2 км, на востоке резко увеличивается до 8-10 км.

Месторождение Гренд-Форк (Западно-Канадский НГБ) – в 1968 г. здесь была установлена промышленная нефтегазоносность русловых песчаников свиты Нижний Менвилл на глубине 860 м. Палеорусло реки, заполненное песчаниками, прорезает юрские глины свиты Райрдон. Резервуар представлен удлинённой линзой, простирающейся на расстояние 7 км. Начальные извлекаемые запасы нефти были оценены в 13,5 млн. т. Плотность нефти – 0,898 г/см³.

На месторождении Саут-Серес газонефтяная залежь приурочена к песчаникам Ред-Форк, выполняющим узкопалеорусло подковообразной формы, ширина которого не превышает 2 км. Общая длина песчаного тела около 16,8 км. Средняя пористость 20%. Начальные извлекаемые запасы 1,4 млн. т. Плотность нефти – 0,816 г/см³ [Ратнер, 1982].

Заключение

В ходе выполненной работы проведено уточнённое структурное картирование, оценены пространственные характеристики, выполнен анализ особенностей залегания, рассмотрена возможная история геологического развития и потенциальные перспективы нефтегазоносности палеоканала, выявленного по сейсмическим данным МОГТ-2D в восточной части Каркакульско-Смушковской зоны поднятий.

Объект является крупным или главным элементом палеоречной сети нижнего течения. Результаты детального скоростного и динамического (атрибутного) анализа сейсмической записи в зоне объекта подчёркивают сложность строения, подтверждают его палеорусловую природу, дают признаки изменчивости литологии и, возможно, пластового флюида. Расположение объекта и специфика его структуры указывают на возможность формирования залежей углеводородов в его пределах. Рассмотрение особенностей строения аналогичных объектов, давших положительный результат при поисковом бурении на УВС, позволяют считать данный объект перспективным для дальнейшего изучения.

По результатам проведённых исследований можно рекомендовать проведение переобработки и переинтерпретации имеющихся данных МОГТ-2D, ориентиро-

ванных только на изучение рассматриваемого палеорула, с применением специальных процедур обработки сейсмических данных, методов динамического анализа, AVO-анализа, приёмов прямого поиска УВ, желательного, с привлечением данных бурения на участке (планируется в 2020-2021 гг.). Данные таких работ позволят уточнить перспективы освоения объекта [Оруджева, Морозов, 1983].

Однако изучение извилистых в плане меандрирующих эрозионных врезов по данным МОГТ-2D затруднено из-за недостаточной эффективности миграции [Шлезингер, 1998]. Достоверные миграционные преобразования в таком случае возможны лишь по данным МОГТ-3D с достаточной апертурой. Постановка полевого этапа таких работ будет сравнительно недорогой, учитывая малую глубину залегания объекта. Обработка и интерпретация данных трёхмерной сейсморазведки поможет выбрать наиболее оптимальные точки заложения последующих поисковых и разведочных скважин.

Литература

1. Акрамходжаев А. М. Геология и методы изучения нефтегазоносности древних дельт. – М.: Недра, 1986. – 216 с.
2. Алексеев А. С., Копаевич Л. Ф., Барабошкин Е. Ю., Беньямовский В. Н., Габдуллин Р. Р., Олферьев А. Г., Яковичина Е. В. Палеогеография юга Восточно-Европейской платформы и её складчатого обрамления в позднем мелу. // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол. – 2005. – Т. 80. Вып. 4. – С. 30-44.
3. Алиев М. М. Верхний мел юга СССР. / М. М. Алиев, Н. А. Крылов, М. М. Павлова. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
4. Воронин Н. И. Тектонические и палеотектонические критерии прогноза и поиска залежей нефти и газа (на примере Прикаспийской впадины и прилегающих районов Скифско-Туранской платформы). – М.: Геоинформмарк, 1999. – 288 с.
5. Глумов И. Ф. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. / И. Ф. Глумов, Я. П. Маловицкий, А. А. Новиков, Б. В. Сенин. – М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2004. – 342 с.
6. Джумагулов А. Д., Бабадаглы В. А., Гаврилко В. М., Лазарук Я. Г. Особенности строения и прогноз коллекторов литологической залежи III продуктивного горизонта олигоценных отложений Северо-Восточной Ферганы. // Геология нефти и газа. – 1983. – Вып. 1. – С. 50-55.
7. Керимов В. Ю. Поиски и разведка залежей нефти и газа в стратиграфических и литологических ловушках. – М.: Недра, 1987. – 207 с.
8. Ляшевич З. В., Кузьмик Л. М., Штурман И. Т. Особенности распределения песчаного материала выгодской свиты. // Нефтяная и газовая промышленность. – 1983. – Вып. 2. – С. 18-19.
9. Михайлов В. Н. Динамика гидрографической сети неприливых устьев рек / В. Н. Михайлов, М. М. Рогов, Т. А. Макарова, В. Ф. Полонский. – М.: Гидрометеоздат, 1977. – С. 29-34.
10. Назаркин Л. А. Влияние темпа седиментации и эрозионных срезов на нефтегазоносность осадочных бассейнов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 336 с.
11. Оруджева Д. С., Морозов Л. И. Перспективы поисков залежей нефти и газа неантиклинального типа в отложениях палеогена Ферганской впадины. // Геология нефти и газа. – 1983. – Вып. 1. – С. 45-49.
12. Пыхалов В. В., Кудинов В. В., Гольчикова Н. Н. Четвертичный газоносный комплекс Астраханского Прикаспия. // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 2. – С. 39-44.
13. Ратнер В. П. Залежи нефти и газа в ловушках неантиклинального типа. Альбом-справочник / В. П. Ратнер, Н. Н. Булатов, М. А. Зубова, Л. П. Польстер. – М.: Недра, 1982. – 189 с.

14. Шлезингер А. Е. Региональная сейсмостратиграфия. – М.: Начуный мир, 1998. – 144 с.
15. Конибир Ч. Э. Б. Палеогеоморфология нефтегазоносных песчаных тел. / Пер. с англ. и ред. М. М. Грачевского и Е. В. Кучерука. – М.: Недра, 1979. – 256 с.
16. Магара К. Уплотнение пород и миграция флюидов. Прикладная геология нефти. / Пер. с англ. – М.: Недра, 1982. – 245 с.
17. Хобсон Г. Д. Достижения в нефтяной геологии. / Пер. с англ. под ред. С. П. Максимова. – М.: Недра, 1980. – 328 с.
18. Bloomer R. R. Depositional environments of a reservoir sandstone in West-Central Texas. // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. – 1977. – Vol. 61. No. 3. – pp. 340-358.
19. Coleman J. M. Geometry and distribution of sand bodies in deltaic rocks. // In: Facts and Princ. World Petroleum Occurrence, Conf., Calgary, June 26-28, 1978. – Calgary. – 1980.
20. Dow W. G. Petroleum source beds on continental slopes and rises. // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. – 1978. – Vol. 62. No. 9.
21. Fomel S. Local seismic attributes. // Geophysics. – 2007. – pp. 29-33.
22. Turhan T. M., Wagner D. E., Baysal E., LuL. A unified method for 2-D and 3-D refraction statics. // Geophysics. – 1998. – Vol. 63. – pp. 260-274.

References

1. Akramhodjaev A. M. Geology and methods of studying oil and gas content of ancient deltas. Moscow. Nedra. 1986. 216 p. (In Russ.)
2. Alekseev A. S., Kopaevich L. F., Baraboshkin E. Y., Benyamovskiy V. N., Gabdullin R. R., Olferev A. G., Yakovishina E. V. Paleogeography of South of East European platform and its folded frame in late Cretaceous. Bull. Mosc. Naturalists Soc. Part. Geology. 2005. Vol. 80. Iss. 4. pp. 30-44. (In Russ.)
3. Aliev M. M., Krhilov N. A., Pavlova M. M. Upper Cretaceous of USSR South. Moscow. Nauka. 1986. 232 p. (In Russ.)
4. Voronin N. I. Tectonic and paleotectonic criteria of prediction and search of oil and gas deposits (by the example of Caspian depression and adjacent regions of Scythian-Turanian platform). Moscow. Geoinformmark. 1999. 288 p. (In Russ.)
5. Glumov I. F., Malovitskiy Y. P., Novikov A. A., Senin B. V. Areal geology and oil and gas content of Caspian Sea. Moscow. JSC “Nedra-Buisnesscenter”. 2004. 342 p.
6. Jumagulov A. D., Babadaghi V. A., Gavrilko V. M., Lazaruk Y. G. Peculiarities of structure and collectors prediction for lithological deposit of Oligocene production horizon III in North-East Fergana. Geology of oil and gas. 1983. Iss. 1. pp. 50-55. (In Russ.)
7. Kerimov V. Y. Search and exploration of stratigraphic and lithologic traps oil and gas deposits. Moscow. Nedra. 1987. 207 p. (In Russ.)
8. Lyashevich Z. V., Kuzmik L. M., Shturman I. T. Distribution peculiarities of Vigodskaya series sand material. Oil and gas industry. 1983. Iss. 2. pp. 18-19. (In Russ.)
9. Mikhailov V. N., Rogov M. M., Makarova T. A., Polonskiy V. F. Dynamics hydrographic network of tideless creeks. Moscow. Hydrometeoizdat. 1977. pp. 29-34. (In Russ.)
10. Nazarkin L. A. Sedimentation rate and erosive processes influence on oil and gas content of sedimentary basins. Saratov. Publishing house of Saratov University. 1979. 336 p. (In Russ.)
11. Orudjeva D. S., Morozov L. I. Perspectives of oil and gas non-anticlinal type deposits search in Paleogene sediments of Ferganskaya depression. Geology of oil and gas. 1983. Iss. 1. pp. 45-49. (In Russ.)
12. Pikhhalov V. V., Kudinov V. V., Golchikova N. N. Forth gas contenting complex of Astrakhan Caspian Surrounding. Izvestiya TulSU, Earth Science. 2016. Iss. 2. pp. 39-44. (In Russ.)
13. Ratner V. Y., Bulatov N. N., Zubov M. A., Polster L. P. Oil and gas deposits in non-anticlinal traps. Album reference book. Moscow. Nedra. 1982. 189 p. (In Russ.)

14. Shlezinger A.E. Areal seismostratigraphy. Moscow. Nauchniy Mir. 1988. 144 p. (In Russ.)
15. Konibir C.E. B. Paleogeomorphology of sand bodies containing oil and gas. Translate from English and redaction of Grachevskiy M. M. and Kucheruk E. V. Moscow. 1979. 256 p. (In Russ.)
16. Magara K. Consolidation of rocks and fluids migration. Practical geology of oil. Translate from English. Moscow. Nedra. 245 p. (In Russ.)
17. Hobson G.D. Oil geology achievements. Translate from English under redaction of Maximov S.P. Moscow. Nedra. 1980. 328 p. (In Russ.)
18. Bloomer R. R. Depositional environments of a reservoir sandstone in West-Central Texas. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1977. Vol. 61. No. 3. pp. 340-358.
19. Coleman J.M. Geometry and distribution of sand bodies in deltaic rocks. In: Facts and Princ. World Petroleum Occurrence, Conf., Calgary, June 26-28, 1978. Calgary. 1980.
20. Dow W.G. Petroleum source beds on continental slopes and rises. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1978. Vol 62. No. 9.
21. Fomel S. Local seismic attributes. Geophysics. 2007. pp. 29-33.
22. Turhan T.M., Wagner D.E., Baysal E., Lu L. A unified method for 2-D and 3-D refraction statics. Geophysics. 1998. Vol. 63. pp. 260-274.

УДК 574:550. 42:662.511:556.3

DOI:

Оригинальная статья

Шахтные воды в управлении качеством грунтовых вод в Восточном Донбассе

А. И. Гавришин 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им.
М. И. Платова, Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
e-mail: agavrishin@rambler.ru

Статья поступила: 27.07.2020, доработана: 10.08.2020, одобрена в печать: 11.08.2020

Резюме: Актуальность работы. Ведущими факторами преобразования окружающей среды в регионе являются угледобывающая и углеперерабатывающая промышленности. Под влиянием этих факторов формируется множество негативных последствий и, прежде всего, интенсивное загрязнение грунтовых вод. **Цель исследований** – оценить роль шахтных вод в управлении загрязненностью грунтовых вод в Восточном Донбассе. **Методы исследования.** Для решения поставленной задачи применены стандартные методы математической статистики, цифровая компьютерная классификационная технология АГАТ-2, метод оценки качества вод по суммарному показателю загрязненности. Выполнен детальный анализ закономерностей формирования химического состава и загрязненности шахтных и грунтовых вод в Восточном Донбассе. Шахтные воды содержат очень высокие концентрации многих компонентов, значительно превышающие ПДК. **Результаты работы.** Наибольшие концентрации отмечены по Fe и Mn, для которых превышения ПДК составляют сотни, а в отдельных случаях тысячи раз. Обычно превышение ПДК в десятки раз обнаружено для Al, Li, Be, Ni, Se, Cu и Zn. Из макрокомпонентов значительное загрязнение проявляется по концентрациям SO₄, Na, Mg и M. В грунтовых водах наибольшую долю в загрязнение вод также вносят Fe и Mn, отмечается превышение ПДК по Al, Zn, Be, Li, Se, Cu, а также по SO₄, Na, Mg и M. Сравнение списка компонентов загрязненности шахтных и грунтовых вод убедительно свидетельствует, что шахтные воды играют ведущую роль в управлении качеством грунтовых вод. Актуальность исследований заключается в том, что впервые для важного в промышленно-экономическом отношении региона РФ выполнена оценка качества шахтных вод и их влияния на загрязнение грунтовых по требованиям к ПДК вод в соответствии с нормативами США, ЕС и РФ. Очень высокий уровень загрязненности шахтных и грунтовых вод свидетельствует о настоятельной необходимости выполнения мониторинговых наблюдений, проведения мер по реабилитации состояния окружающей среды в регионе и совершенствования очистных технологий, в первую очередь, по уменьшению концентраций Fe, Mn и величины минерализации.

Ключевые слова: шахтные, грунтовые воды, химический состав, показатель загрязненности, Восточный Донбасс.

Для цитирования: Гавришин А. И. Шахтные воды в управлении качеством грунтовых вод в Восточном Донбассе. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 126 – 137. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

GEOECOLOGY

DOI:

Original paper

The mine water in the management of groundwater pollution in the Eastern Donbass

A. I. Gavrishin 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str.,
Novocherkassk 346428, Russian Federation, e-mail: agavrishin@rambler.ru

Received: 27.07.2020, revised: 10.08.2020, accepted: 11.08.2020

Abstract: Relevance. Coal mining and coal-processing industries are the leading drivers of environmental transformation in the region. These factors are influenced by many negative effects and, above all, intense groundwater pollution. **Aim** of the research is to assess the role of mine water in the management of groundwater pollution in the Eastern Donbass. **Methods.** To solve the problem, standard methods of mathematical statistics, digital computer classification technology AGTA-2, and method of assessing water quality according to the total pollution indicator are used. A detailed analysis of the patterns of chemical composition and contamination of mine and groundwater in the Eastern Donbass has been carried out. Mine water contains very high concentrations of many components, much higher than MAC. **Results.** The highest concentrations are recorded by Fe and Mn, for which the excesses of MAC are hundreds, and in some cases thousands of times. Typically, the excess of MAC is found tenfold for Al, Li, Be, Ni, Se, Cu and Zn. Of the macro components, significant pollution is manifested by concentrations of SO₄, Na, Mg and M. In groundwater, Fe and Mn also contribute to groundwater pollution, and there is an excess of MAC for Al, Zn, Be, Li, Se, Cu, as well as SO₄, Na, Mg and M. The relevance of the research lies in the fact that for the first time for the industrial and economic region of the Russian Federation, an assessment of the quality of mine waters and their impact on groundwater pollution according to the requirements of the MAC of water in accordance with the regulations of the United States, the EU and the Russian Federation has been carried out. Comparison of the list of mine and groundwater pollution components strongly demonstrates that mine water plays a leading role in the management of groundwater quality. The very high level of mine and groundwater pollution demonstrates the urgent need to carry out monitoring observations, to rehabilitate the environment in the region and to improve treatment technologies, primarily to reduce the concentrations of Fe, Mn and mineralization.

Keywords: mine and groundwater, chemical composition, pollution indicator, Eastern Donbass.

For citation: Gavrishin A.I. The mine water in the management of groundwater pollution in the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (3): 126 – 137. DOI: xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x.

Введение

Добыча полезных ископаемых сопровождается интенсивным изменением естественного энерго- и массопереноса, когда из недр на поверхность земли извлекают огромные массы горных пород, полезного ископаемого, подземных вод и т. д. В Восточном Донбассе угледобывающая и углеперерабатывающая промышленности оказывают существенное влияние на состояние окружающей среды и наносят серьезный экологический ущерб территории региона. Главными факторами негативного воздействия на окружающую среду являются закрытые и брошенные, действующие и недавно ликвидированные угольные шахты, породные отвалы, обогатительные фабрики и другие объекты. Указанные факторы формируют техногенную

трещиноватость горных пород, деформацию зданий и сооружений, заиливание водотоков, засоление почв. Кроме того массовая ликвидация шахт интенсифицировала процессы оседания земной поверхности, подтопления территорий, формирование мощных потоков загрязнения воздушной, водной и геологической сред, выделение «мертвого воздуха» и другие отрицательные явления [Гавришин, 2019; Гавришин и др., 2018; Закруткин и др., 2015; Gavrishin, 2018b, 2020a; Reshetnyak et al., 2014; Zakrutkin, Sklyarenko, 2015]. Аналогичные негативные последствия характерны для многих угольных бассейнов [Грязев и др., 2018; Колесникова, 2017; Appelo, Postma, 2005; Chen, 2014; Gavrishin, 2020a; Giulio, Jackson, 2016; Neidell et al., 2019; Pfunt et al., 2016]. **Главная цель** настоящих исследований – оценить роль шахтных вод в управлении загрязненностью грунтовых вод в Восточном Донбассе.

Методика исследований

Для характеристики химического состава шахтных и грунтовых вод применены стандартные методы математико-статистического анализа данных. В качестве основного способа оценки загрязненности воды использована широко применяемая в геохимии и геоэкологии оценка степени загрязнения вод, почв, грунтов, донных осадков и т. п. по коэффициенту концентрации и суммарному показателю загрязненности. При этом введены категории степени загрязненности воды и окружающей среды (табл. 1). Так как шахтные воды оказались очень мощным загрязнителем, то помимо обычных категорий загрязненности (норма, риск, кризис и бедствие) дополнительно введена категория «катастрофа». Для категории «норма», когда концентрации загрязняющих компонентов ниже ПДК, значение суммарного показателя должно быть меньше 2; далее границы категорий установлены с кратностью 8: $2*8=16$, $16*8=128$ и т. д. (табл. 1).

Коэффициент концентрации i -го компонента рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{iC} = C_i / C_{ПДК}$$

где C_i – концентрация компонента, $C_{ПДК}$ – предельно допустимая или фоновая концентрация компонента.

Степень загрязненности воды и окружающей среды по n компонентам оценивается по суммарному показателю загрязненности:

$$Z_C = \sum_i K_{iC} - (n-1).$$

Категории загрязненности вод и окружающей среды приведены в таблице 1.

Суммарный показатель загрязненности дает возможность оценивать качество химического состава любых типов вод (атмосферные, поверхностные, подземные, техногенные) относительно любых нормативных показателей (питьевые, рыбохозяйственные, требования СанПиН, СНиП, ВОЗ, США, ЕС и др.), по набору любых компонентов. В настоящей работе использованы: ПДК к питьевым водам по нормам «Агентства по охране окружающей среды США (U. S. EPA)»; ПДК по «Директиве Европейского Союза по качеству питьевой воды, предназначенной для потребления человеком»; по нормативу к ПДК питьевых вод РФ [ГН, 2003] и рыбохозяйственных вод [ПДК, 2010].

Для детального анализа качества шахтных вод выполнено выделение однородных типов вод с применением компьютерной технологии AGAT-2, реализующей G-метод классификации многомерных наблюдений (выделение однородных сово-

Таблица 1. / Table 1.

Категории загрязненности воды и окружающей среды. / Water and environmental pollution categories

Суммарный показатель. / Total pollution	Категории загрязненности воды и окружающей среды. / Water and environmental pollution categories
<2	Норма (удовлетворительная). / Norm
≥2-16	Риск (напряженная). / Risk
≥16-128	Кризис (чрезвычайная). / Crisis
≥128-1024	Бедствие. / Disaster
≥1024	Катастрофа. / The Great Disaster

купностей), который основан на оригинальном критерии Z^2 – Гавришина [Gavrishin, 2018a; Tossi et al., 2010].

На основе критерия Z-квадрат развита новая цифровая компьютерная технология классификации многомерных наблюдений АГАТ-2. Эта технология позволяет: строить классификацию наблюдений в условиях самоорганизации (задача без учителя); выделять таксоны различных уровней; использовать зависимые признаки; не ограничивать соотношение между числом наблюдений (N) и числом признаков (M); оценивать сходства-различия между однородными таксонами и др. Указанная цифровая технология классификации многомерных наблюдений (G-метод) успешно применена при изучении природных и антропогенных систем на Земле, Луне, Марсе, Юпитере, кометах, астероидах и в дальнем космосе [Gavrishin, 2018a; Tossi et al., 2010].

В название вод ионы включаются при содержании более 25-20%-молей и компоненты располагаются в порядке возрастания содержаний. Название вод приводится по классификации Алекина-Посохова.

Характеристика химического состава шахтных вод

Интенсивная разработка угольных месторождений в Восточном Донбассе ведется более 100 лет. Наряду с периодами относительной стабилизации состава шахтных вод установлены периоды интенсификации процессов окисления, растворения и выщелачивания. После завершения ликвидации угольных шахт вынос сульфат-иона, железа и других растворенных веществ (426 млн. т/год) достигли максимальных значений, т.е. влияние горного фактора привело к существенному ухудшению экологического состояния окружающей среды в регионе. В таблице 2 приведены статистические параметры распределений концентраций, лимитируемых макро- и микрокомпонентов в шахтных водах Восточного Донбасса.

Анализ данных таблицы 2 свидетельствует, что по многим компонентам наблюдаются большие различия между средними арифметическими и медианными значениями, между минимальными и максимальными концентрациями; относительный стандарт превышает 100% и это свидетельствует о несимметричности распределений концентраций компонентов. Далее выполнен анализ качества химического состава шахтных вод путем расчета коэффициента концентрации (K_i) и суммарного показателя загрязненности воды (Z_C) относительно российских и зарубежных нормативов (табл. 3).

Таблица 2. / Table 2.

**Содержания макро- и микрокомпонентов в шахтных водах /
Macro and microcomponents in minewaters**

Компонент / Component	X	X _{ме}	X _{min}	X _{max}	S
pH	7,0	7,0	3,7	9,0	0,95
SO ₄	2837	2058	607	12084	2187
Cl	347	214	10	1897	333
Na	966	518	62	2116	465
Mg	267	216	6	1581	262
M	5301	4516	1624	17496	3171
Al	3,01	0,11	0,02	105	21,7
Be	0,0017	0,0007	0,0000	0,04	0,01
Fe	33,7	6,2	0,06	401	97
Cd	0,0017	0,0001	0,0001	0,04	0,01
K	25,5	13,3	1,5	272	56
Co	0,028	0,001	0,001	0,042	0,1
Li	0,31	0,13	0,01	2,2	0,51
Cu	0,005	0,002	0,001	0,061	0,013
Mn	5,1	2,7	0,001	38,9	9,4
Ni	0,073	0,001	0,001	1,8	0,38
Pb	0,0011	0,0010	0,0010	0,003	0,0004
Se	0,017	0,005	0,005	0,12	0,029
Sr	6,1	5,7	0,15	14,5	3,65
Cr	0,007	0,002	0,001	0,073	0,017
Zn	0,134	0,043	0,005	2,55	0,53

Примечание. Во всех таблицах: X – среднее арифметическое, X_{ме} – медиана, X_{min}, X_{max} – минимальная и максимальная концентрации, S – стандартное отклонение. / Note. In all tables: X is the arithmetic mean, X_{me} is the median, X_{min}, X_{max} are the minimum and maximum concentrations, S – Is the standard deviation.

Данные таблицы 3 свидетельствуют, что по категории загрязненности для питьевых вод шахтные воды надежно относятся к категории «бедствие». Наиболее высокими загрязняющими показателями характеризуются Fe и Mn, по которым коэффициент концентрации превышает сотни раз. Кроме того, сильное загрязнение отмечается по Al, Li, Be, Ni, а по макрокомпонентам для SO₄, Na, Mg и M. Относительно требований к рыбохозяйственным водам суммарный показатель равен 1013, что очень близко к категории «катастрофа».

Для более детального анализа особенностей роли шахтных вод в управлении качеством грунтовых вод выполнена классификация состава шахтных вод с выде-

Таблица 3. / Table 3.

**Оценка качества шахтных вод (мг/л) /
Assessment of the quality of mine water (mg/l)**

Компонент. / Component	X	K _i по ПДК США. / MOC USA	K _i по ПДК ЕС. / MOC EU	K _i по ПДК РФ-п. / MOC RF Drinking	K _i по ПДК РФ-р. / MOC RF fish-and-zids
pH	7,0	0	0	0	0
SO ₄	2837	11,3	11,3	5,7	28,4
Cl	347	1,4	1,4	1,0	1,2
Na	966	Н	Н	4,8	8,3
Mg	267	Н	5,3	5,3	6,7
M	5301	10,6	3,5	5,3	5,3
Al	3,01	15,5	15,5	15,1	75,3
Be	0,0017	0,4	Н	8,5	8,5
Fe	33,7	112	168	112	337
Cd	0,0017	0,3	0,3	1,7	0,3
K	25,5	Н	2,1	0,9	0,5
Co	0,028	Н	Н	0,3	2,8
Li	0,31	Н	Н	10,3	10,3
Cu	0,005	0,004	0,003	0,005	5
Mn	5,1	102	102	51	510
Ni	0,073	Н	Н	3,7	7,3
Pb	0,0011	0,1	0,1	0,1	0,2
Se	0,017	0,02	1,7	1,7	8,5
Sr	6,1	Н	Н	0,9	3,1
Cr	0,007	0,1	0,14	0,14	0,14
Zn	0,134	0,03	0,03	0,13	13,3
Z _C		240,8	307,4	209,6	1013

Примечание. ПДК РФ-п – ПДК РФ для питьевых вод; ПДК РФ-р – ПДК РФ – для рыбохозяйственных вод; Н – отсутствие нормативного показателя. / Note. MPC RF-p is MPC RF for drinking water; MPC RF-r is MPC RF – for fishery waters; Н – no normative indicator.

лением однородных типов, с помощью цифровой компьютерной технологии АГАТ-2 [Gavrishin, 2018a; Tossi et al., 2010]. Выделено четыре основных гидрогеохимических типа шахтных вод [Gavrishin, 2018b]. Первый тип связан с преобразованием исходных слабоминерализованных гидрокарбонатно-сульфатных вод в кислые (pH – до 2) сульфатные воды с высоким содержанием Fe, Mn, Al, Си и других металлов и обусловлен интенсивным развитием процессов окисления серы [Bazhin et al., 2010] и растворения сульфатов.

Второй тип – это хлоридно-сульфатные нейтральные воды, в незначительной степени обогащенные Fe и Mn. Теперь, наряду с процессами окисления серы, приблизительно равную роль начинают играть процессы увеличения концентраций хлор-иона за счет притока хлоридных подземных вод при углублении угольных шахт.

Третий тип шахтных вод фиксирует преобразования гидрокарбонатно-сульфатных вод в сульфатно-хлоридные. На первое место выходит процесс роста концентрации Cl за счет притока хлоридных подземных вод при отработке глубоких шахтных горизонтов. Рост концентрации SO₄ и процесс окисления сульфидов переходят на второе место. После завершения массовой ликвидации угольных шахт третий тип в шахтных водах не образуется.

По четвертому типу образуются оригинальные содовые гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридные и хлоридные натриевые воды. Теперь ведущую роль начинает играть приток содовых подземных вод, который формируется в результате испарительно-конденсационных процессов в водоуглеродной газовой фазе [Gavrishin, 2018b]. В районе угольных шахт, где образуются содовые воды четвертого направления, наиболее высоки перспективы обнаружения нефтегазовых скоплений. В таблице 4 приведен общий химический состав гидрогеохимических типов шахтных вод по результатам опробования после завершения процесса ликвидации угольных шахт.

Теперь по результатам классификации состава шахтных вод (табл. 4) появляется возможность определить роль различных типов шахтных вод в загрязнении грунтовых. Установлено, что к первому типу отнесено 61% наблюдений, ко второму – 30%, к третьему – 0%, к четвертому – 9%.

Результаты оценки качества химического состава гидрогеохимических типов шахтных вод приведены в таблице 5. Рассчитаны коэффициенты концентрации и суммарный показатель загрязненности отдельно для каждого гидрогеохимического типа в соответствии с ПДК для питьевых и рыбохозяйственных вод.

Таблица 4. / Table 4.

Химический состав гидрогеохимических типов шахтных вод (мг/л и %-моль). / Chemical composition of hydrogeochemical types of minewater (mg/land %-mole)

Тип. / Type	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	Fe	M
1	5,73	256	4766	230	359	400	1435	43,8	7480
		4	90	6	16	30	54		
2	6,73	536	4123	660	322	306	1719	3,2	7667
		8	76	17	14	22	64		
3	отсутствует. / missing								
4	7,30	426	1216	211	38	32	806	1,1	2730
		18	66	16	5	7	88		

Таблица 5. / Table 5.

**Оценка качества химического состава типов шахтных вод. /
Assessment of the quality of the chemical composition of mine water types**

	X-1	1	2	X-2	3	4	X-4	5	6
pH	5,7	1,1	1,1	6,7	0	0	7,3	0	0
SO ₄	4766	9,5	47,7	4123	8,2	41,23	1216	2,43	12,16
Cl	230	0,7	0,8	660	1,9	2,2	211	0,6	0,7
Na	1930	9,6	16,1	1408	7,0	11,7	667	3,3	5,6
Mg	400	8	10	306	6,1	7,6	32	0,6	0,8
M	7480	7,5	7,5	7667	7,7	7,7	2730	2,7	2,73
Al	22	110	550	0,1325	0,6	3,3	1,46	7	36,5
Be	0,009	45	45	0,0006	3	3	0,0004	2	2
Fe	166	553	1660	13,9	46,3	139	8	26,6	80
Cd	0,001	1	0,2	0,0004	0,4	0,08	0,00045	0,45	0,1
K	14	0,5	0,3	63	2,1	1,3	14,1	0,5	0,3
Co	0,14	1,4	14	0,004	0,04	0,4	0,007	0,07	0,7
Li	0,40	13,3	13,3	0,60	20	20	0,41	13,7	13,7
Cu	0,013	0,013	13	0,0033	0,003	3,3	0,006	0,006	6
Mn	14	140	1400	3,28	32,8	328	2,1	21	210
Ni	0,49	24,5	49	0,001	0,05	0,1	0,014	0,7	1,4
Pb	0,001	0,1	0,2	0,001	0,1	0,2	0,001	0,1	0,2
Se	0,011	1,1	5,5	0,030	3	15	0,006	0,6	3
Sr	7,4	1,1	3,7	9,13	1,3	4,5	3,4	0,5	1,7
Cr	0,029	0,6	0,6	0,0023	0,5	0,5	0,001	0,02	0,02
Zn	0,55	0,55	55	0,050	0,05	5	0,035	0,035	3,5
Z _c		909	3873		121	574		63	361

Примечание. X-1, X-2, X-4 – средние концентрации компонентов по первому, второму и четвертому типам шахтных вод в мг/л; 1, 3 и 5 – сравнение с ПДК питьевых вод; 2, 4 и 6 – сравнение с ПДК рыбохозяйственных вод. / Note. X-1, X-2, X-4 are average concentrations of components for the first, second and fourth types of mine water in mg/l; 1, 3 and 5 – comparison with MPC for drinking water; 2, 4 and 6 – comparison with MPC for fishery waters.

Данные таблицы 5 свидетельствуют о том, что максимумом загрязненности характеризуются воды первого гидрогеохимического типа; ситуация соответствует «бедствию» и «катастрофе» (суммарный показатель загрязненности 909 и 3873), и именно этот тип играет ведущую роль в управлении качеством вод в Восточном Донбассе. Наибольшую долю в загрязнение вод вносят Fe и Mn, по которым коэффициент концентрации достигает тысяч раз. Сильное загрязнение отмечается по Al, Li, Be, Ni и Zn, а по макрокомпонентам по SO₄, Na, Mg и M.

Воды второго гидрогеохимического типа характеризуются меньшей, чем первый тип, но значительной степенью загрязненности, которая соответствует «кризису» для питьевых вод и «бедствию» для рыбохозяйственных. Наибольшая доля загрязнения принадлежит Fe и Mn, а также Li, Se, Sr, Be, SO₄, Na, Mg и M. Четвертый гидрогеохимический тип вод наименее загрязнен; ситуация соответствует «кризису» и «бедствию». Наибольшие концентрации отмечены для Fe и Mn, повышенные – для Al, Li, Be, Zn, SO₄, Na, и M.

Таким образом, шахтные воды Восточного Донбасса содержат очень высокие концентрации многих компонентов, значительно превышающие ПДК. Наибольшие

Таблица 6. / Table 6.

Оценка качества грунтовых вод. / Assessment of groundwater quality

Компонент. / Component	X	Ki по ПДК США. / MOC USA	Ki по ПДК ЕС. / MOC EU	Ki по ПДК РФ-п. / MOC RF Drinking	Ki по ПДК РФ- р. / MOC RFfish-and- zids
pH	7,2	0	0	0	0
SO ₄	1566	6,3	6,3	3,15	15,66
Cl	333	1,3	1,3	0,95	1,11
Na	437	H	H	2,185	3,64
Mg	152	H	3,04	3,04	3,8
M	3230	6,46	3,15	3,23	3,23
Al	0,2	1	1	1	5
Be	0,0007	0,2	H	3,5	3,5
Fe	3,13	10,43	15,65	10,43	31,3
Cd	0,001	0,2	0,2	1	0,2
K	14,8	H	1,23	0,5	0,3
Co	0,002	H	H	0,02	0,2
Li	0,06	H	H	2	2
Cu	0,004	0,003	0,002	0,004	4
Mn	0,61	12,2	12,2	6,1	61
Ni	0,002	H	H	0,1	0,2
Pb	0,001	0,07	0,1	0,1	0,17
Se	0,016	0,32	1,6	1,6	8
Sr	3,1	H	H	0,44	1,55
Cr	0,002	0,02	0,04	0,04	0,04
Zn	0,08	0,02	0,02	0,08	8
Z _c		25,5	31,8	13,4	172,9

концентрации отмечены по Fe и Mn, для которых превышения ПДК составляют сотни, а в отдельных случаях тысячи раз. Обычно превышение ПДК в десятки раз обнаружено для Al, Li, Be, Ni и Zn. Из макрокомпонентов значительное загрязнение проявляется по концентрациям SO₄, Na, Mg и M.

Характеристика химического состава грунтовых вод

Химический состав грунтовых вод Восточного Донбасса охарактеризован по результатам опробования скважин, вскрывающих воды каменноугольных отложений, преимущественно в районах ликвидированных угольных шахт. Средний состав грунтовых вод по сравнению с шахтными водами характеризуется значительно меньшей минерализацией и концентрациями компонентов.

Результаты оценки степени загрязненности грунтовых вод приведены в таблице 6 относительно требований к питьевым водам по нормативам США, ЕС и РФ (категории «кризис» и «риск») и относительно ПДК к рыбохозяйственным водам по требованиям РФ-р (категория «бедствие»).

В грунтовых водах (табл. 6), как и в шахтных, наибольшую долю в загрязнение вод вносят Fe и Mn, отмечается превышение ПДК по Al, ZnBe, Li, Se, Cu, а также по SO₄, Na, Mg и M.

Выводы

Выполнен детальный анализ закономерностей формирования химического состава и загрязненности шахтных и грунтовых вод в Восточном Донбассе. Шахтные воды содержат очень высокие концентрации многих компонентов, значительно превышающие ПДК. Наибольшие концентрации отмечены по Fe и Mn, для которых превышения ПДК составляют сотни, а в отдельных случаях тысячи раз. Обычно превышение ПДК в десятки раз обнаружено для Al, Li, Be, Ni, Se, Cu и Zn. Из макрокомпонентов значительное загрязнение проявляется по концентрациям SO₄, Na, Mg и M. В грунтовых водах наибольшую долю в загрязнение вод также вносят Fe и Mn, отмечается превышение ПДК по Al, ZnBe, Li, Se, Cu, а также по SO₄, Na, Mg и M.

Сравнение списка компонентов загрязненности шахтных и грунтовых вод убедительно свидетельствует, что шахтные воды играют ведущую роль в управлении качеством грунтовых вод. Очень высокий уровень загрязненности шахтных и грунтовых вод свидетельствует о настоятельной необходимости выполнения мониторинговых наблюдений, проведения мер по реабилитации состояния окружающей среды в регионе и совершенствования очистных технологий, в первую очередь, по уменьшению концентраций Fe, Mn и величины минерализации.

Литература

1. Гавришин А.И. Оценка качества химического состава поверхностных вод в Восточном Донбассе. // Геозкология. – 2019. – №4. – С. 61-67. DOI: 10.31857/S0869-78092019461-67.
2. Гавришин А.И., Борисова В.Е., Торопова Е.С. Распределение химического состава шахтных вод на территории Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №2. – С. 5-15.
3. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. // Гигиенические нормативы. Минздрав. РФ. Пост. № 78. – М. – 2003. – 152 с.

4. Грязев М. В., Качурин Н. М., Стась Г. В. Пылегазовые выбросы с поверхности породных отвалов ликвидированных шахт угольного бассейна. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. №4 (38). – С. 500-509.
5. Закруткин В. Е., Скляренко Г. Ю., Родина А. О. О загрязнении подземных вод Восточного Донбасса. // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2015. – № 8-1. – С. 47-50.
6. Колесникова Л. А. Анализ состояния окружающей среды в регионах с угледобывающими предприятиями. // Уголь. – 2017. – №4. – С. 68-69.
7. ПДК водных объектов рыбохозяйственного значения. // Гигиенические нормативы. – М.: Приказ Росрыболовства от 18.01.2010 №20, 5 с.
8. Appelo C. A. J., Postma D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. // Taylor and Francis. – 2005. – 683 p.
9. Bazhin V. Yu., Beloglazov I. I., Feshchenko R. Yu. Deep conversion and metal content of Russian coals. // *Eurasian Mining*. – 2016. – No. 2. – pp. 28-36.
10. Chen H. L. Brief analysis of the technical points about the tailings pond environmental impact assessment. // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 955-959. pp. 1685-1689.
11. Gavrishin A. I. Multidimensional Classification Method in the Study of Naturel and Anthropogenic Systems. // *Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics*. – 2018a. – No. 5. – pp. 16-21.
12. Gavrishin A. I. Mine Waters of the Eastern Donbass and Their Effect on the Chemistry of Groundwater and Surface Water in the Region. // *Water Resources*. – 2018b. – Vol. 45. No. 5. – pp. 785-794.
13. Gavrishin A. I. Quality of surface water in Eastern Donbass, Russia. // International Conference “Process Management and Scientific Developments”. Birmingham. United Kingdom. June 9, 2020a. – pp. 111-116. DOI: 10.34660/INF. 2020.34.82.001.
14. Gavrishin A. I. Features of the chemical composition of groundwater in the Eastern Donbass. // International University Science Forum “Science. Education. Practice:” (Canada, Toronto), July 8, 2020b. Part 1. – pp. 162-168. DOI: 10.3660/INF. 2020.48.59.001.
15. Giulio D. C., Jackson R. B. Impact to Underground Sources of Drinking Water and Domestic Wells from Production Well Stimulation and Completion Practices in the Pavilion, Wyoming, Field. // *Environmental Science and Technology*. – 2016. – Vol. 50 (8). – pp. 4524-4536.
16. Neidell M., Gross T., Graff Zivin J., Chang T, Y. The Effect of Pollution on Worker Productivity: Evidence from Call Center Workers in China. // *American Economic Journal: Applied Economics*. – 2019. – Vol. 11 (1). – pp. 151-172.
17. Pfunz H., Houben G., Himmelsbach, T. Numerical modeling of fracking fluid migration through fault zones and fractures in the North German Basin. // *Hydrogeology Journal*. – 2016. – Vol. 24 (60). – pp. 1343-1358.
18. Reshetnyak O. S., Nikanorov A. M., Zakrutkin V. Ye., Gibkov Ye. V. The chemical composition of surface waters of technogenicall affected geo-systems in Eastern Donbas region. // *European Researcher*. – 2014. – No. 11-1 (86). – pp. 1978-1992
19. Tossi F., et al. Correlations between VIMS and RADAR data over the surfer of Titan: Implications for Titans surface properties. // *Icarus*. – 2010. – Vol. 208. No. 1. – pp. 366-384.
20. Zakrutkin V. E., Sklyarenko G. Y. The influence of coal mining on groundwater pollution (Eastern Donbass). // International multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. – 2015. – pp. 927-932.

References

1. Gavrishin A. I. Assessment of the quality of the surface water chemical composition in the East Donbass. *Geoecology*. 2019. No. 4. pp. 61-67. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869-78092019461-67. (In Russ.)

2. Gavrishin A. I., Borisova V. E., Toropova E. S. The distribution of the chemical composition of minewater in the territory of East Donbass. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2018. No. 2. pp. 5-15. (In Russ.)
3. ES 2.1.5.1315-03. Maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in the water of water bodies of drinking, cultural and domestic water use. Hygienic standards GN 2.1.5.1315-03. Ministry of Health. RF Fast. No. 78. Moscow. 2003. 152 p. (In Russ.)
4. Gryazev M. V., Kachurin N. M., Stas G. V. Dust and gas emissions from the surface of waste dumps of the liquidated mines of the coal basin. *Sustainable development of mountainous areas*. 2018. Vol. 10. No. 4 (38). pp. 500-509. (In Russ.)
5. Zakrutkin V. E., Sklyarenko G. Yu., Rodina A. O. On the pollution of groundwater in the East Donbass. *Modern trends in the development of science and technology*. 2015. No. 8-1. pp. 47-50. (In Russ.)
6. Kolesnikova L. A. Analysis of the state of the environment in regions with coal mining enterprises. *Ugol'*. 2017. No. 4. pp. 68-69. (In Russ.)
7. MPC of water bodies of fishery significance. Hygienic standards. Moscow. Order of the Federal Agency for Fishery of January 18, 2010 No. 20, 5 p. (In Russ.)
8. Appelo C. A. J., Postma D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Taylor and Francis. 2005. 683 p.
9. Bazhin V. Yu., Beloglazov I. I., Feshchenko R. Yu. Deep conversion and metal content of Russian coals. *Eurasian Mining*. 2016. No. 2. pp. 28-36.
10. Chen H. L. Brief analysis of the technical points about the tailings pond environmental impact assessment. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 955-959. pp. 1685-1689.
11. Gavrishin A. I. Multidimensional Classification Method in the Study of Naturel and Anthropogenic Systems. *Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics*. 2018a. No. 5. pp. 16-21.
12. Gavrishin A. I. Mine Waters of the Eastern Donbass and Their Effect on the Chemistry of Groundwater and Surface Water in the Region. *Water Resources*. 2018b. Vol. 45. No. 5. pp. 785-794.
13. Gavrishin A. I. Quality of surface water in Eastern Donbass, Russia. International Conference "Process Management and Scientific Developments". Birmingham. United Kingdom. June 9, 2020a. pp. 111-116. DOI: 10.34660/INF.2020.34.82.001.
14. Gavrishin A. I. Features of the chemical composition of groundwater in the Eastern Donbass. International University Science Forum "Science. Education. Practice." (Canada, Toronto), July 8, 2020b. Part 1. pp. 162-168. DOI: 10.3660/INF.2020.48.59.001.
15. Giulio D. C., Jackson R. B. Impact to Underground Sources of Drinking Water and Domestic Wells from Production Well Stimulation and Completion Practices in the Pavilion, Wyoming, Field. *Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 50 (8). pp. 4524-4536.
16. Neidell M., Gross T., Graff Z. J., Chang T. Y. The Effect of Pollution on Worker Productivity: Evidence from Call Center Workers in China. *American Economic Journal: Applied Economics*. 2019. Vol. 11 (1). pp. 151-172.
17. Pfunt H., Houben G., Himmelsbach T. Numerical modeling of fracking fluid migration through fault zones and fractures in the North German Basin. *Hydrogeology Journal*. 2016. Vol. 24 (60). pp. 1343-1358.
18. Reshetnyak O. S., Nikanorov A. M., Zakrutkin V. Ye., Gibkov Ye. V. The chemical composition of surface waters of technogenicall affected geo-systems in Eastern Donbas region. *European Researcher*. 2014. No. 11-1 (86).pp. 1978-1992.
19. Tossi F., et al. Correlations between VIMS and RADAR data over the surfer of Titan: Implications for Titans surface properties. *Icarus*. 2010. Vol. 208. No. 1. pp. 366-384.
20. Zakrutkin V. E., Sklyarenko G. Y. The influence of coal mining on groundwater pollution (Eastern Donbass). International multidisciplinary Scientific GeoConferenceSurveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. 2015. pp. 927-932.

УДК 504.3.054

DOI:

Оригинальная статья

Вопросы оценки эффективности внедряемых пылезащитных экранов на этапе проектирования

А. В. Иванов , А. В. Стриженок , И. К. Супрун 

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: www.igor_suprun@mail.ru

Статья поступила: 15.08.2020, доработана: 26.08.2020, одобрена в печать: 27.08.2020

Аннотация: Актуальность работы. Несмотря на очевидную техническую простоту пылезащитного экрана, долгое время использование подобных сооружений на территории России практически не практиковалось. Расширение территорий населенных пунктов и повышение степени внимания к социально-экологическим проблемам регионов и со стороны органов власти, и со стороны населения послужило толчком развития и внедрения пылезащитных экранов на объектах предприятий, в том числе, предприятий минерально-сырьевого комплекса. Тем не менее, существуют различные аспекты возможностей учета пылезащитных экранов программным обеспечением. **Цель работы.** Целью работы является выявление характера распространения твердых взвешенных веществ в воздухе карьера рассматриваемого предприятия, построение моделей рассеивания загрязняющих веществ в воздухе различными способами в рамках нормативных методик и их анализ. **Методы исследований.** Методы исследования включают в себя анализ проектных данных по выбросам загрязняющих веществ на рассматриваемом предприятии, рассмотрение материалов статей, посвященных исследованиям в этой области применения пылезащитных экранов. Работа проводилась с использованием программного комплекса УПРЗА «Эколог», применяемом для расчетов рассеивания загрязняющих веществ, реализующего утвержденные нормативные методики с возможностью учета параметров источников выброса, элементов рельефа местности и элементов застройки, а также с возможностью графического представления результатов. **Результаты работы.** Отмечено, что пылезащитные экраны, размещенные на границах карьерного поля, могут быть эффективны только в полупроницаемом исполнении и только при инверсионном характере движения воздуха в выемке. По итогам проведенных исследований сделан вывод о том, что фактически рекомендации по учету защитных сооружений в нормативной расчетной методике не позволяют корректно учесть использование экранов. При этом снижение концентрации может быть оценено лишь процентным уменьшением массы переносимой пыли.

Ключевые слова: пылезащитный экран, пылеперенос, инверсия, пыль, моделирование

Для цитирования: Иванов А. В., Стриженок А. В., Супрун И. К. Вопросы оценки эффективности внедряемых пылезащитных экранов на этапе проектирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 138 – 150. DOI: [xx.xxxxx/xxx-xxxx-xxxx-x-x](https://doi.org/10.26907/2541-7746.2020.10.138-150).

GEOECOLOGY

DOI:

Original paper

Issues of evaluating the effectiveness of the introduced dust screens at the design stage

A. V. Ivanov , A. V. Strizhenok , I. K. Suprun 

St. Petersburg Mining University, 221st Line, St Petersburg 199106, Russian Federation,
e-mail: www.igor_suprun@mail.ru

Received: 15.08.2020, revised: 26.08.2020, accepted: 27.08.2020

Abstract: Relevance. Despite the obvious technical simplicity of the dust shield, for a long time the use of such structures on the territory of Russia was practically not practiced. The expansion of the territories of settlements and an increase in the degree of attention to the socio-ecological problems of the regions both on the part of the authorities and on the part of the population served as an impetus for the development and implementation of dust screens at the facilities of enterprises, including enterprises of the mineral resource complex. However, there are various aspects of the software's ability to account for dust screens. **Aim.** The aim of the work is to identify the nature of the distribution of suspended solids in the air of the quarry of the enterprise under consideration, to build models for the dispersion of pollutants in the air in various ways within the framework of regulatory methods and their analysis. **Methods.** Research methods include analysis of design data on emissions of pollutants at the enterprise in question, consideration of articles devoted to research in this area of application of dust screens. The work was carried out using the UPRZA "Ecolog" software package, which is used for calculating the dispersion of pollutants, which implements the approved regulatory methods with the ability to take into account the parameters of emission sources, elements of the terrain and building elements, as well as with the ability to graphically represent the results. **Results.** It is noted that dust screens located at the boundaries of a quarry field can be effective only in a semi-permeable design and only with the inversion nature of air movement in the excavation. Based on the results of the studies carried out, it was concluded that, in fact, the recommendations for taking into account protective structures in the normative design methodology do not allow correctly taking into account the use of screens. In this case, the decrease in concentration can only be assessed by the percentage decrease in the mass of the transferred dust.

Keywords: dust shield, dust transfer, inversion, dust, modeling.

For citation: Ivanov A. V., Strizhenok A. V., Suprun I. K. Issues of evaluating the effectiveness of the introduced dust screens at the design stage. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2020.10 (3): 138 – 150. DOI: [xx. xxxxx / xxx-xxxx-xxxx-x-x](https://doi.org/10.26907/2541-7746.2020.10.3.138-150).

Введение

Рассматриваемое предприятие располагается в Ленинградской области. Основной деятельностью предприятия является добыча горной массы при разработке месторождений полезных ископаемых гранитов открытым способом (карьер «Кузнечное-1») и последующая переработка ее для получения гранитного фракционированного щебня и прочих нерудных строительных материалов (дробильно-сортировочный завод «ДСЗ-2»).

Разработка карьера ведется буровзрывным образом. Взорванная горная масса отгружается экскаваторами и автотранспортом и вывозится для переработки на дробильно-сортировочный завод. Производство щебня предусмотрено по техно-

логической схеме, включающей три стадии дробления в замкнутом цикле с предварительным грохочением, выводом карьерных отсеков и сортировкой продуктана инерциальные грохоты. Первичное дробление исходной горной массы выполняется на щековой дробилке, вторичное и третичное – в конусных дробилках. Межоперационное перемещение материала осуществляется ленточными конвейерами. Готовая продукция конвейерами-штабелеукладчиками отсыпается в штабельные склады. Со складов продукция отгружается потребителям.

Объем поступающей горной массы на переработку составит 1250,0 тыс. м³ в год. Максимальная годовая производительность карьера по вскрышным работам составляет 100,0 тыс. м³.

В период проведения добычных работ, в процессе эксплуатации оборудования на карьере «Кузнечное-1» будет осуществляться определенная нагрузка на атмосферный воздух. Основными источниками выбросов вредных веществ в атмосферу в период разработки рассматриваемого месторождения являются: экскаваторы, бульдозеры, буровые станки, взрывные работы, погрузчики, автотранспорт, отвал, временный склад отсеков дробления (ветровая эрозия).

Источники загрязнения атмосферного воздуха на дробильно-сортировочном заводе в данной работе не рассматривались в связи с тем, что проблема их негативно-го воздействия широко обсуждалась с предложением средозащитных мероприятий в работах, опубликованных ранее [Смирнов и др., 2012].

Актуальность

Борьба с пылью на подобных объектах обычно ведется точно: мероприятия по пылеподавлению подбираются индивидуально для каждого типа источников. Как правило, подобная всеобъемлющая работа экономически непривлекательна для предприятия [Shanglun, 2013; Zhao, Zhang, 2018].

В ходе исследовательской работы рассматривались разные технические и организационные средства снижения объектом выброса пыли, однако, наиболее комплексным и универсальным способом является применение пылезащитных экранов. Пылезащитный экран – сооружение, представленное опорами, выполненными из металлического профиля с объемной структурой, между которыми натягивается полупроницаемый полимерный защитный материал.

Цель

В работе в качестве исходных данных использованы проектные данные предприятия, по результатам анализа которых, выделяется перечень основных выбрасываемых в атмосферный воздух при работе карьера загрязняющих веществ, но ключевой проблемой деятельности предприятия является выброс пыли неорганической с содержанием SiO₂ 70-20%. В ходе проделанной работы необходимо выполнить расчеты рассеивания произведены для всех источников выбросов, находящихся на площадке карьера.

Методы исследования

Основные методы исследования включали:

– системно-структурный анализ производственных объектов, способствующих ухудшению запыленности окружающей среды, в том числе, на основе проектной документации [Tverdaetal., 2016];

Таблица 1. / Table 1.

**Источники загрязнения и удаленность их от поселка. /
Sources of pollution and their remoteness from the village.**

Но- мер / Num- ber	Источник загрязнения / Source of pollution	Выброс пыли неорганической / In organic duste mission 70-20% SiO₂, г/с
6035	Отвал отсева / Dumpdropout	3,27
6005	Отвал вскрышных пород / Dump of over burden	4,402
6002	Буровойстанок / Drilling Rig (Commando 300)	1,5752
6004	Буровойстанок/ Drilling rig (ROC L8, Atlas Copco)	1,4684
6001	Разделка негабарита / Oversize dcutting	1,628
6007	Горнаямассапослевзрыва / Rock mass after explosion	2,857
6033	Вывозотсева / Removal of dropouts	3,869
6003	Вывозвскрышнойпороды / Removal of overburden	3,332
6006	Погрузкагорноймассывавтосамосвалы / Loading of rock mass into dump trucks	2,946

- анализ научных публикаций по теме исследования [Terekhin, Bulgakov, 2019];
- методы математического моделирования переноса пыли [Letuev et al., 2020].

Для выбора места расположения экрана были учтены метеорологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. В таблице 1 представлены источники загрязнения и их удаленность от населенного пункта.

В качестве расчетного инструмента использовалась унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА) «Эколог» (версия 4), которая реализует положения расчётной методики [Кожевникова, 2017]. В используемой модификации программы реализуются также приложение учета застройки [Zhen-yaа et al., 2013]. Программа позволяет по данным об источниках выброса веществ и условиях местности рассчитывать разовые (осредненные за 20-30 минутный интервал) концентрации веществ в приземном слое при неблагоприятных метеорологических условиях [Streltsova, Zyryanova, 2019]. Встроенный в программу графический модуль «ГИС-Эколог» позволяет визуализировать в графическом файле топосновырезультаты расчета в виде изолиний коэффициентов контрастности относительно ПДК с учетом фоновых значений. В программных моделях использовались климатические данные согласно.

Начальными данными для полученной картографической модели послужили экспериментальные исследования, проведенные авторами на рассматриваемом объекте.

Полученные результаты и их обсуждение

В качестве параметра для построения изолиний на карте принят коэффициент контрастности, который рассчитывается как отношение текущей концентрации загрязняющего вещества в атмосферном воздухе к установленному нормативу. То есть все значения больше 1 показывают, во сколько раз текущая концентрация пыли превышает установленный норматив.

На рисунке 1 представлена схема расположения источников загрязнения на производственном объекте с нанесением изолиний коэффициентов контрастности. Предприятие работает в 2 смены по 12 часов и горное оборудование работает постоянно, из этого можно сделать вывод, что все источники загрязнения работают так же одновременно и непрерывно. В связи с этим, в жилой зоне могут наблюдаться превышения ПДК_{сс} до 4 раз по выбросам пыли неорганической 70-20% SiO₂.

В ходе работы по оценке существующих средств предотвращения пылевого загрязнения атмосферного воздуха был выделен ряд наиболее широкоиспользуемых методов (таблица 2)

Стоит отметить, что применение первых трех рассмотренных методов носит точечный характер, это существенно снижает эффективность их применения для передвижных источников загрязнения [Горлов и др., 2014]. Применение же пылезащитных экранов носит комплексный характер, и обеспечение защиты воздуха производится постоянно независимо от режимов работы источников загрязнения.

Существует две разновидности пылезащитных экранов: непроницаемый и проницаемый [Krivosheeva, 2017]. Непроницаемый экран дорог и обладает крайне высокой парусностью, что существенно ограничивает его высоты. На открытых производствах, как правило, применяются проницаемые экраны. Такие экраны

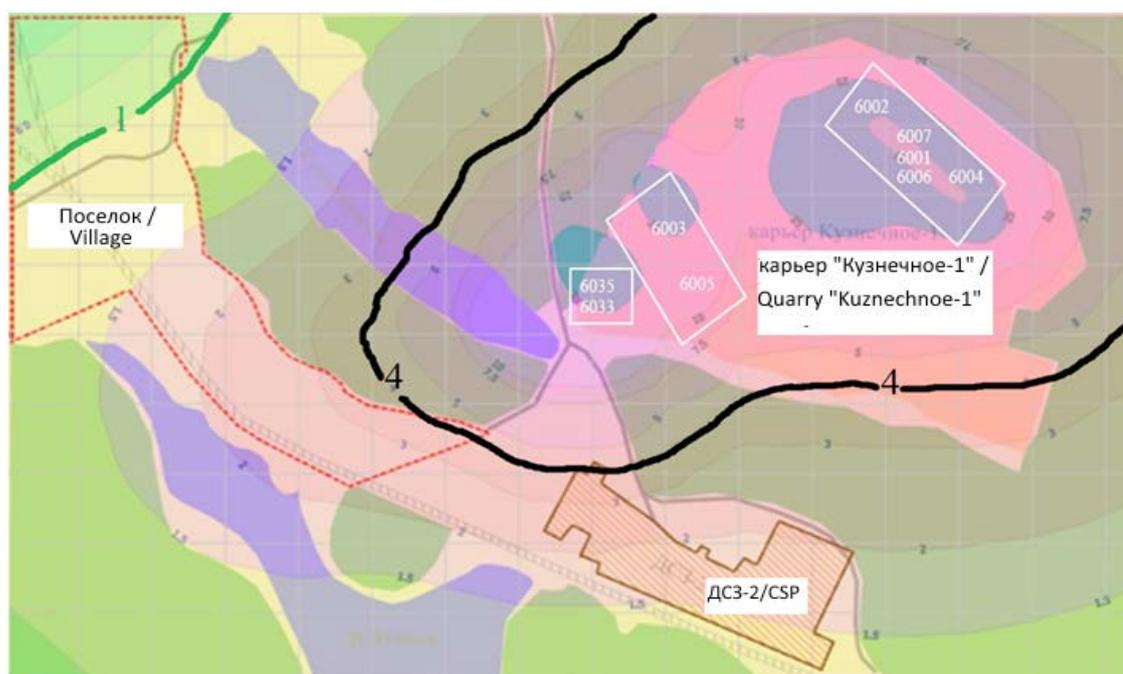


Рис. 1. Ореолы рассеивания с нанесенными источниками загрязнения. /
Fig. 1. Dispersed halos with deposited pollution sources.

Таблица 2. / Table 2.

Основные методы борьбы с пылью на предприятиях открытой разработки полезных ископаемых. / Basic methods of dustcontrol in open cast mining enterprises.

Метод защиты атмосферного воздуха / Method of protection of atmospheric air	Преимущества метода / Advantages of the method	Недостатки метода / Disadvantages of the method
Гидрообеспыливание водой / Waterdedusting	<ul style="list-style-type: none"> – Широкая распространенность и разнообразие технических средств осуществления; – Возможность устройства передвижной установки; – Невысокие эксплуатационные затраты – Widespread use and variety of technical means of implementation; – Possibility of the device of a mobile installation; – Lowoperatingcosts 	<ul style="list-style-type: none"> – Высокий расход воды; – Высокие требования к качеству воды; – Ограничения к использованию при низких температурах; – Малая продолжительность эффекта – High water consumption; – High requirements for water quality; – Restrictions on use at low temperatures; – Short duration of the effect
Применение аэропены / Aeropenapplication	<ul style="list-style-type: none"> – Пролонгированное действие после применения; – Низкий расход воды для производства пены – Prolonged action after application; – Low water consumption for foam production 	<ul style="list-style-type: none"> – Подверженностьсдуванию – Susceptibilitytodeflation
Орошения реагентами / Irrigationwithreagents	<ul style="list-style-type: none"> – Сниженный расход воды для орошения; – Широкий диапазон температур эксплуатации – Reduced water consumption for irrigation; – Wide operating temperature range 	<ul style="list-style-type: none"> – Вероятность вторичного загрязнения окружающей среды – The likelihood of secondary pollution of the environment
Применение пылезащитных экранов / Application of dust screens	<ul style="list-style-type: none"> – Неограниченный диапазон эксплуатационных температур – Значительный срок службы при однократном капиталовложении – Unlimited operating temperature range – Long service life with a one-time investment 	<ul style="list-style-type: none"> – Возможность прохождения запыленного воздуха над экраном – Ability to pass dusty air above the screen

существенно снижают ветровые нагрузки на опоры экрана и уменьшают вихреобразование потока воздуха при прохождении экрана [Volkodaeva, Kiselev, 2017]. Устройство выполняется в виде опор, сваренных из металлического профиля, и металлическими поперечинами между ними, на которых закрепляется полимерная сетка [Манжилевская и др., 2019]. Ключевыми механизмами снижения пыления являются снижение ветрового потока, максимально возможное падение кинетической энергии входящего ветрового потока, устранение образования ветровых потоков и общее снижение турбулентности, что в конечном итоге приводит к осаждению пыли в прошедшем потоке на некотором удалении от экрана. Высота подобных сооружений, как правило, составляет 5 м, но в отдельных случаях может достигать 8 метров.

Примеры применения пылезащитных экранов представлены на рисунках 2, 3 и 4.



*Рис. 2. Торговый порт, терминал по перегрузке сыпучих материалов (г. Мурманск). /
Fig. 2. Trade port, terminal for transshipment of bulk materials (Murmansk).*



*Рис. 3. Месторождение Rocky Hill (Австралия). /
Fig. 3. Rocky Hill field (Australia).*



*Рис. 4. Открытый склад строительных материалов (Китай, провинция Фуцзянь). /
Fig. 4. Open warehouse of building materials (China, Fujian province).*

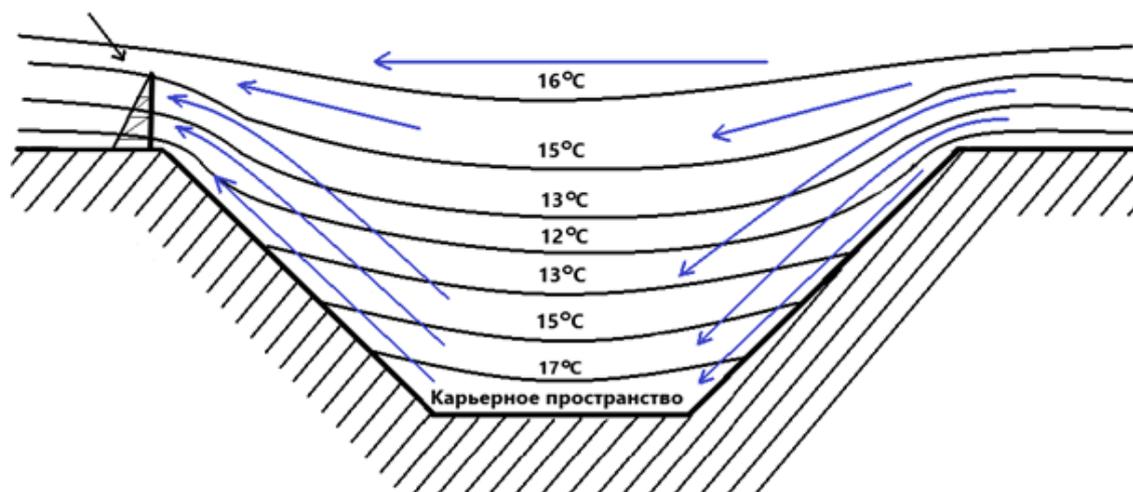


Рис. 5. Немасштабный профиль распределения температур в карьере «Кузнечное-1» для средних максимумов температур воздуха в летний период времени в районе размещения объекта и направления движения воздушных масс. /

Fig. 5. Non-scale profile of temperature distribution in the «Kuznechnoye-1» open pit for average maximum air temperatures in summer in the area of the object and the direction of movement of air masses.

Как было отмечено ранее, основной недостаток применения подобных защитных сооружений – возможность прохождения загрязненного воздуха над экраном [Московская, Лазарева, 2015]. При оценке возможности применения экрана на рассматриваемом объекте в ходе проведения по данной научной работе, поддержанной грантом президента РФ МК-130.2020.5, оценивался характер распространения загрязняющих веществ. Было установлено, что в связи с формированием антропогенной выемки, движение воздушных масс в карьере носит инверсионный характер. В результате неравномерности распределения температур по слоям, рассеивание загрязняющих веществ производится приповерхностно, что позволяет говорить о прохождении основной массы загрязняющих веществ в приземной зоне до 5 метров. На рисунке 5 представлен немасштабный профиль распределения температур в карьере «Кузнечное-1» для средних максимумов температур воздуха в летний период времени в районе размещения объекта.

Ключевым аспектом проектирования пылезащитных экранов является возможность учета сооружения в программах моделях рассеивания загрязняющих веществ в рамках действующей нормативной базы.

Согласно гостированной методике МРР-2017 любые защитные сооружения должны рассматриваться как элементы застройки [Yamashkin, Zhulina, 2019]. Расчет рассеивания был выполнен на основе программы УПРЗА Эколог 4.0 с модулем расчета с учетом застройки.

На карте (рис. 6) представлено рассеивание после расчета по МРР-2017 с учетом застройки.

По полученным данным можно заметить, что ореолы загрязнения видоизменились, но характер загрязнения на границе зоны жилой застройки не поменялся. Тем не менее, натурные исследования влияния подобных сооружений, проводимые предприятиями-изготовителями и предприятиями минерально-сырьевого комплекса, говорят об обратном эффекте. Так же можно видеть что на территории расположения источников 6001, 6002, 6004, 6006, 6007 ситуация только ухудшилась. В

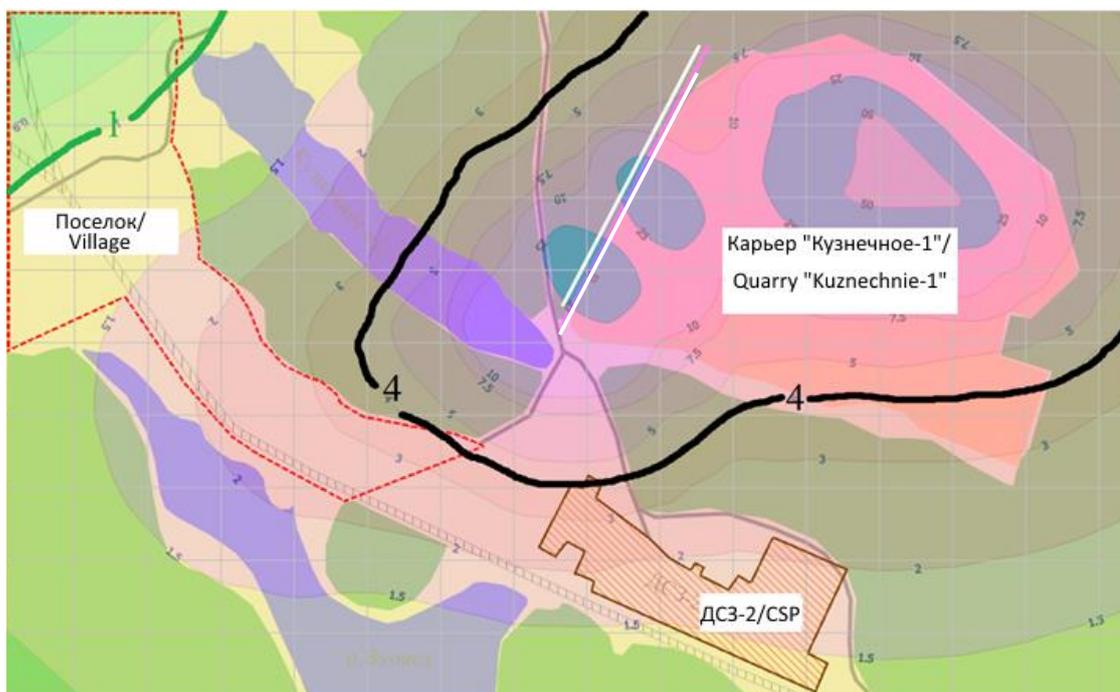


Рис. 6. Результат расчета рассеивания пыли неорганической 70-20% SiO₂ при учете пылезащитного экрана, как элемента застройки. /

Fig. 6. The result of calculating the dispersion of inorganic dust 70-20% SiO₂, taking into account the dust shield as a building element.



Рис. 7. Результат расчета рассеивания пыли неорганической 70-20% SiO₂ при учете пылезащитного экрана, как дополнительного элемента рельефа местности. /

Fig. 7. The result of calculating the dispersion of inorganic dust 70-20% SiO₂, taking into account the dust shield as an additional element of the terrain.

ходе работы была установлена невозможность корректного использования этого методического инструмента.

Далее было предложено рассмотреть экран, как элемент рельефа [Tingguo, Gaofeng, 2012]. Для этого с помощью нормативной методики МРР-2017 были вручную рассчитаны коэффициенты рельефа местности с учетом установленного экрана.

На рисунке 7 представлены результаты расчета.

Рассеивание пыли на карьере при данном расчете вблизи экрана не снижается, коэффициент контрастности на границе жилой застройки остается в превышениях. На источниках рассеивание, как можно заметить, так же видоизменяется, но не уменьшается, как и в прошлом расчете.

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что применение экрана в качестве рельефа местности (препятствия) не обеспечило достаточной корреляции с результатами известных натуральных исследований подобных защитных сооружений.

Как один из возможных вариантов решения проблемы был рассмотрен так же расчет при фактическом снижении объемов выноса пыли по паспортной эффективности работы экрана, указанной фирмой-производителем. Эффективность выбранных пылезащитных экранов составляет 70%.

На рисунке 8 представлена карта рассеивания уже после учета эффективности экранов. По полученным результатам можно сделать вывод, что только данный вариант расчета дает корректную динамику снижения распространения пыли и может быть использован в качестве основополагающей при проектировании экранов на подобных производственных объектах.

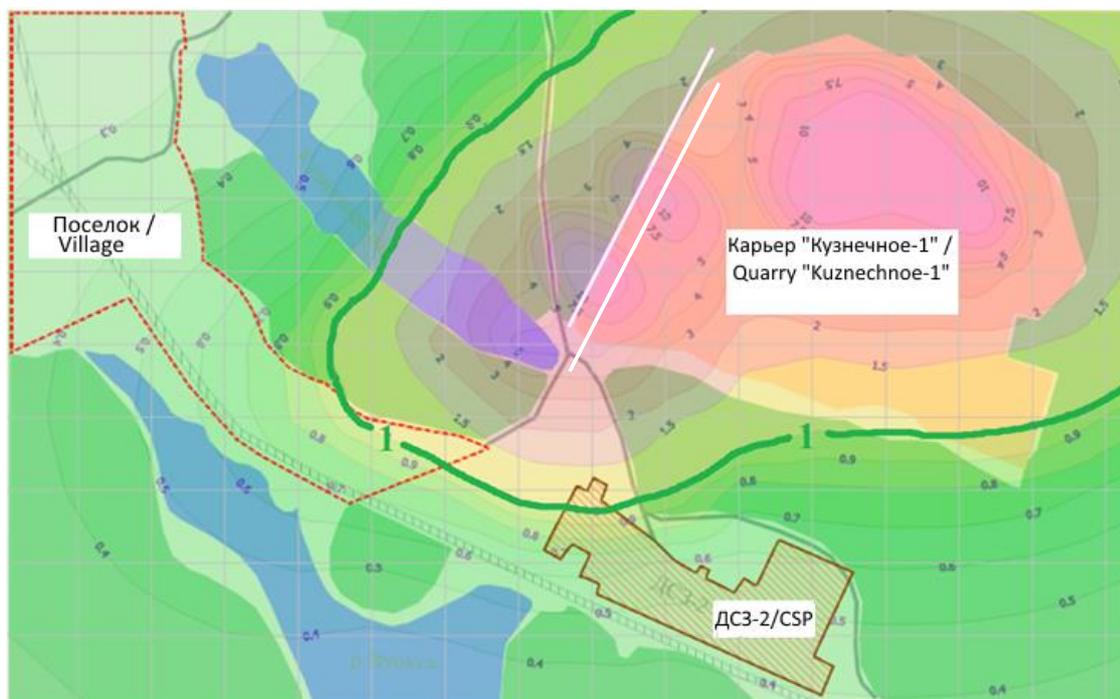


Рис. 8. Результат расчета рассеивания пыли неорганической 70-20% SiO₂ при учете паспортной эффективности пылезащитного экрана. /

Fig. 8. The result of calculating the dispersion of inorganic dust 70-20% SiO₂, taking into account the passport efficiency of the dust shield.

Выводы

Таким образом, можно говорить о том, что полупроницаемые пылезащитные экраны являются эффективным средством борьбы с распространением твердых взвешенных веществ в условиях карьеров при инверсионном характере движения загрязненного воздуха из пространства выемки. На предприятиях, занимающих небольшие площади с высокой степенью сосредоточенности источников загрязнения такое средство будет являться универсальным и комплексным в отличие от более распространенных методов с применением воды, пены или реагентом, которые имеют точечное действие. В работе был поставлен вопрос учета пылезащитных экранов действующими нормативными методиками и программным обеспечением. Сравнивая все выше перечисленные варианты расчета рассеивания при монтаже экрана как пылезащитное сооружение, можно говорить о том, что действующие методики не могут быть использованы в расчетах для таких конструкций, так как их обновление ведётся медленнее, чем происходит выпуск новинок в сфере оборудования для защиты атмосферного воздуха. Фактически, корректный учет экранов в программных моделях может быть произведен лишь поправками на основе паспортной эффективности этих сооружений.

Литература

1. Горлов Ю. В., Игнатов В. Н., Горлов Д. Ю., Шум И. Ю. Оценка эффективности гидрообеспыливания по снижению выбросов пыли от неорганизованных источников. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 10. – С. 11-14.
2. Климат и природа Ленинградской области. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://mirtc.ru/articles/629744/> (дата обращения 24.01.2020)
3. Кожевникова Е. О. Проблема пылевого загрязнения городских территорий при производстве земляных работ и пути ее решения. // Аллея науки. – 2017. – № 1 (14). – С. 676-688.
4. Манжилевская С. Е., Гладков В. С., Нальгиев Д. А., Штарев Р. М. Дополнительные экологические мероприятия в процессе строительства. // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2 (53).
5. Московская И. В., Лазарева Л. П. Анализ эффективности применения ветро-пылезащитных экранов на открытых складах угольных терминалов. // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 6 (32). – С. 140-144.
6. Приказ Минприроды России (Министерство природных ресурсов и экологии РФ) от 06 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе».
7. Пылезащитные экраны. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eim-engineering.ru/> (дата обращения 24.01.2020).
8. Пылеветрозащитные ограждения на территории АО «Мурманский морской торговый порт». – [Электронный ресурс]. – URL: <https://morproekt.ru/projects/1057-pylevetrozashchitnye-ograzhdeniya-na-territorii-ao-murmanskij-morskoj-torgovyj-port> (дата обращения 24.01.2020)
9. Смирнов Ю. Д., Ковшов С. В., Иванов А. В. Разработка инновационного пылеподавляющего устройства для условий северных регионов. // Записки Горного института. Т. 9. – СПб.: Горный университет, 2012. – Т. 195. – С. 133-137.
10. Feng-lian S. Research on dust control of coal handling system in power plant // Electric Power. – 2010. – Т. 3.
11. Krivosheeva S. I. Analysis of methods and means of reducing dust formation on granite careers of central Kazakhstan. // Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2017. – pp. 42-48.

12. Letuev K. V., Kovshov S. V., Gridina E. B. The technology of hydro-dusting of roads of coal mines using purified wastewater and drainage water. // Ecology and Industry of Russia – 2020. – No. 24 (1). – pp. 30-33.
13. Streltsova A. D., Zyryanova O. V. Development of dust-supply compositions based on oil products for mining and transport industry. // In contemporary technologies: topical issues, achievements and innovations. – 2019. – pp. 9-11.
14. Shanglun C. Type and application of wind-proof and dust-control mesh. // Hoisting and Conveying Machinery. – 2013. – No. 2. – p. 37.
15. Tverda O. Ya., Tkachuk K. K., Davidenko Yu. A. Comparative analysis of minimization methods for dilution from granite care dumps. // East European Journal of Advanced Technology. – 2016. – No. 2/10 (80). – pp. 40-46.
16. Terekhin E. P., Bulgakov I. S. Intensive dust and gas suppression system for mass explosions in career. // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2019. – No. 1. – pp. 77-83.
17. Tingguo C., Gaofeng M. Comparison, Selection and Optimization of Structure Supporting Wind-dust-screen. // Port Engineering Technology. – 2012. – No. 4. – pp. 10.
18. Volkodaeva M. V., Kiselev A. V. On the development of the system for environmental monitoring of atmospheric air quality. // Journal of Mining Institute. – 2017. – No. 227. – pp. 589-596.
19. Yamashkin A. A., Zhulina M. A. Assessment of the Processes of Formation and Transfer of Dust from Overburden Dumps in the Alekseevsky Quarry of Building Materials. // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). – 2019. – T. 10. No. 1.
20. World's longest dust screen built to tackle pollution in China – [Электронный ресурс]
21. Zhao S., Zhang Q. Numerical Analysis of dustproof effect of windbreak net for Coal Yard. // Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation. – 2018. – pp. 299-303.
22. Zhen-yaa D., Wen-boa H., Jinb F. U. Structure Design and Mechanical Characteristics Analysis of Steel Bracing Structure of Porous Fences. // Petro-Chemical Equipment. – 2013. – No. 4. – p. 8.

References

1. Gorlov Yu. V., Ignatov V. N, Gorlov D. Yu., Shum I. Yu. Evaluation of the effectiveness of hydro-dusting to reduce dust emissions from unorganized sources. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2014. No. 10. pp. 11-14. (In Russ.)
2. Climate and nature of the Leningrad region. [Electronic resource]. URL: <https://mirtc.ru/articles/629744/> (date of treatment 01/24/2020). (In Russ.)
3. Kozhevnikova E. O. The problem of dust pollution of urban areas during earthworks and ways to solve it. Alley of Science. No. 1 (14). 2017. pp. 676-688. (In Russ.)
4. Manzhilevskaya S. E., Gladkov V. S., Nalgiev D. A., Shtarev R. M. Additional environmental measures in the construction process. Don's Engineering Bulletin. 2019. No. 2 (53). (In Russ.)
5. Moskovaya I. V., Lazareva L. P. Analysis of the effectiveness of the use of wind-dust screens in open warehouses of coal terminals. Eurasian Union of Scientists. 2015. No. 6-2. pp. 140-144. (In Russ.)
6. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia (Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation) of June 06, 2017 No. 273 "On approval of methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the air". (In Russ.)
7. Dust screens. [Electronic resource]. URL: <http://www.eim-engineering.ru/> (date of treatment 01/24/2020). (In Russ.)
8. Dust and wind protection fences on the territory of Murmansk Commercial Sea Port JSC. [Electronic resource]. URL: <https://morproekt.ru/projects/1057-pylevetrozashchitnyy-ograzhdeniya-na-territorii-ao-murmanskij-morskoy-torgovyj-port> (date of treatment 01/24/2020). (In Russ.)

9. Smirnov Yu. D., Kovshov S. V., Ivanov A. V. Development of an innovative dust suppression device for the conditions of the northern regions. Notes of the Mining Institute. T. 9 St. Petersburg. Mining University. 2012, Vol. 195. pp. 133-137. (In Russ.)
10. Feng-lian S. Research on dust control of coal handling system in power plant. Electric Power. 2010. T. 3.
11. Krivosheeva S. I. Analysis of methods and means of reducing dust formation on granite careers of Central Kazakhstan Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2017. pp. 442-48.
12. Letuev K. V., Kovshov S. V., Gridina E. B. The technology of hydro-dusting of roads of coal mines using purified wastewater and drainage water Ecology and Industry of Russia. 2020. No. 24 (1). pp. 30-33.
13. Streltsova A. D., Zyryanova O. V. Development of dust-supply compositions based on oil products for mining and transport industry. In contemporary technologies: topical issues, achievements and innovations. 2019. pp. 9-11
14. Shanglun C. Type and application of wind-proof and dust-control mesh //Hoisting and Conveying Machinery. 2013. No. 2. p. 37.
15. Tverda O. Ya., Tkachuk K. K., Davidenko Yu. A. Comparative analysis of minimization methods for dilution from granite care dumps East European Journal of Advanced Technology. 2016. No. 2/10 (80). pp. 40-46.
16. Terekhin E. P., Bulgakov I. S. Intensive dust and gas suppression system for mass explosions in career Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2019. No. 1. pp. 77-83.
17. Tingguo C., Gaofeng M. Comparison, Selection and Optimization of Structure Supporting Wind-dust-screen. Port Engineering Technology. 2012. No. 4. p. 10.
18. Volkodaeva M. V., Kiselev A. V. On the development of the system for environmental monitoring of atmospheric air quality. Journal of Mining Institute. 2017. No. 227. pp. 589-596.
19. Yamashkin A. A., Zhulina M. A. Assessment of the Processes of Formation and Transfer of Dust from Overburden Dumps in the Alekseevsky Quarry of Building Materials. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2019. T. 10. No. 1.
20. World's longest dust screen built to tackle pollution in China. [Electronic resource]
21. Zhao S., Zhang Q. Numerical Analysis of dustproof effect of windbreak net for Coal Yard. Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation. 2018. pp. 299-303.
22. Zhen-yaa D., Wen-boa H., Jinb F. U. Structure Design and Mechanical Characteristics Analysis of Steel Bracing Structure of Porous Fences. Petro-Chemical Equipment. 2013. No. 4. pp. 8.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика; 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых; 25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 25.00.35 – Геоинформатика; 25.00.36 – Геоэкология, а также смежным научным направлениям..

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3-5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20-25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, аннотации на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи. Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <http://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Аннотация с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (кегль 14 полужирный курсив, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки ответственного автора.

Аннотация должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то аннотация должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если рукопись подается на английском языке, необходимо привести также аннотацию на русском. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце аннотации обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \lg , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (МВт/см^2) – прямым

(обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюсти размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье (не по разделам!) и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате виде, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем – на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

INFORMATION FOR AUTHORS

The journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth’s crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 25.00.03 – Geotectonics and geodynamics; 25.00.10 – Geophysics, geophysical methods of mineral exploration; 25.00.11 – Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 25.00.23 – Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 25.00.35 – Geoinformatics; 25.00.36 – Geoecology and related scientific directions..

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” 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 the South of Russia».

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <http://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),

- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames, academic degrees and titles (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site www.naukagor.ru (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols \lim , \lg , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and ν , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 3. 2020 г. Том 10)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 09.09.2020 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода 15.09.2020 г.

Усл. печ. лист 18,1. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. 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.

362000, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3