ISSN 2221-3198 e-ISSN 2686-7486

No 3 / 2019

БОЛОГИЯ Неофизика Нога России Том 9

GEOLOGY AND GEOPHYSICS OF RUSSIAN SOUTH



ISSN 2221-3198 e-ISSN 2686-7486

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Геология и Геофизика Нога россии Geology and geophysics of russian south

Tom 9 № 3 / 2019

Владикавказ 2019

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ»

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии академик РАН В.А. Бабешко, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону академик РАН А. Д. Гвишиани, Геофизический центр РАН, г. Москва академик РАН М.Ч. Залиханов, Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик академик РАН С.А. Федотов, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва 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. РАН А.В. Николаев, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта 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 Рh. D., проф. И.А. Береснев, Университет штата Айова, США

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:

362027, РСО-Алания, г. Владикавказ,

ул. Маркуса 22 Тел.: 8 (8672) 501841

e-mail: vncran@yandex.ru http://www.vncran.ru д. г.-м. н., проф. **М. Г. Бергер**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

д. т. н. П.Е. Марченко, Кабардино-Балкарский научный центр РАН, г. Нальчик д. т. н., проф. И. Д. Музаев, Геофизический

д. н.н., проф. **п.д. музаев**, геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

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

> > Излатель:

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, 2019

Фото на обложке – Осенний ручеек (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 Sergey A. Fedotov, Academician of RAS, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow

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

Geophysics, Georgia Gurban D. Yetirmishli, Academician of Azerbaijan

National Academy of Sciences (ANAS), Republican Seismic Survey Center of ANAS, Azerbaijan

David R. Kaplunov, Corresponding Member of RAS, Institute of Comprehensive Exploitatation of Mineral

Resources Russian Academy of Sciences, Moscow

Alexey V. Nikolaev, Corresponding Member of RAS, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow

Sevada M. Hovhannisyan, Academician of National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (NAS RA) A. Nazarov Institute of Geophysics and Engineering Seismology of NAS RA, Armenia Valerian A. Snyitko, Corresponding Member of RAS, S.I.Vavilov Institute for the History of Science and Technology of RAS, Moscow

Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA Mickhail G. Berger Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,

Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz Ganapathy Pattukandan Ganapathy, Ph.D, Prof.

Centre for Disaster Mitigation and Management Vellore Institute of Technology, India

Pavel E. Marchenko Dr. Sci. (Tech.), Kabardin-Balkar Scientific Center of RAS, Nalchik

Illarion D. Muzaev Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical

Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz

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

Southern Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don **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

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

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

Executive Secretary

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

Managing Editor

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

D 1	1 1	
Pub	licher	
1 40	nsnor	

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

Founder:

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, 2019

Cover photo – Autumn brook (K.S. Kharebov)

9 (3) 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Богуш И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И., Исаева Н.А. Геохимические особенности рудоносносных черных сланцев Северного Кавказа	6
Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Вулканогены окраинных орогенных поясов Северо-Западного сектора Северо-Восточной Азии	
Гавришин А.И. Изменение гидрогеохимических условий в Восточном Донбассе за 25 лет	36
Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Мезозойские субщелочные породы центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минерагения	47
ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Альпийская структура складчатой системы Северо-Западного Кавказа и условия ее образования	63
Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики	77
Казымов И.Э. Динамика Саатлинской сверхглубокой GPS (SATG)-станции	94
ГЕОФИЗИКА	
Аптикаева О.И. Особенности Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг., роевая сейсмичность и поле поглощения S-волн	105
Аракелян Ф.О., Башилов И.П., Зубко Ю.Н., Николаев А.В., Левченко Д.Г. Сейсмическая защита АЭС, проблемы и перспективы	119
Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Об оценке результатов метода микросейсмического зондирования при их геологической интерпретации	139
Дмитриева И. Ю., Саяпина А. А., Горожанцев С. В., Багаева С. С. О макросейсмических проявлениях Яндарского землетрясения 17 октября 2018 года.	
Чернов Ю.К., Чернов А.Ю., Читишвили М.И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть 2	161
ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА	
Голик В.И., Кожиев Х.Х., Бурдзиева О.Г., Масленников С.А. Геомеханические факторы взаимодействия природных и технических систем в районах освоения недр	179
Заалишвили Владиславу Борисовичу – 70 лет!	189
———— ПАМЯТЬ ————	
Федотов Сергей Александрович	197
Информация для авторов	199

5

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY
Bogush I. A., Ryabov G. V., Cherkashin V. I., Isaeva N. A. Geochemical features of metalliferous black shale of North Caucasus6
Yarotskii G.P., Chotchaev Kh.O. Volcanogens of marginal orogenic belts of the northwestern sector of Northeast Asia18
Gavrishin A.I. Changing the hydrogeochemical condition in the Eastern Donbass for 25 years
Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Kondrashov I. A. Mesozoic subalkaline rocks of central part of the Northern Caucasus: geodynamical typification, geochemistry and minerageny
Giorgobiani T.V., Zakaraia D.P. Alpine structure of the folding system of North-West Caucasus and conditions of its forming63
Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics77
Kazimov I.E. Dynamics of the Saatli superdeep GPS (SATG)-station94
GEOPHYSICS
Aptikaeva O.I. Features of the 1976 and 2011 Van earthquakes, swarm seismicity and S-wave attenuation field105
Arakelyan F. O., Bashilov I. P., Zubko Yu. N., Nikolaev A. V., Levchenko D. G. Seismic protection of nuclear power plants, problems and prospects
Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A. About the evaluation of the results of the microseismic sounding method in their geological interpretation
Dmitrieva I. Yu., Sayapina A. A., Gorozhantsev S. V., Bagaeva S. S. About macroseismic displays of Yandary earthquake, October 17, 2018
Chernov Y.K., Chernov A.Y., Chitishvili M.I. Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Part 2
GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS
Golik V.I., Kozhiev Kh.Kh., Burdzieva O.G., Maslennikov S.A. Interaction of natural and technical systems in the subsoil development areas
JUBILEES
Vladislav Borisovich Zaalishvili is 70 year old!189
Sergey Aleksandrovich Fedotov197
Information for authors

6

— ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ 🗕

VДК 552.441:550.4:550.85 (470.6) DOI: <u>10.23671/VNC.2019.3.36477</u>

Оригинальная статья

Геохимические особенности рудоносных черных сланцев Северного Кавказа

И.А. Богуш¹, д.г.-м.н., проф., Г.В. Рябов¹, к.-г.-м.н., В.И. Черкашин², д.г.-м.н., проф., Н.А. Исаева²

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, e-mail: i_bogush@mail.ru;

² Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: dangeo@mail.ru

Статья поступила: 9 сентября 2019, доработана: 18 сентября 2019, одобрена в печать: 19 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. В процессе рудно-поисковых и региональных съемочных работ рудоносность черных сланцев априорно не рассматривалась. Открытие гигантских золоторудных месторождений (Мурунтау, Бакырчик, Сухой Лог, Олимпиадненское, месторождения Южного Китая, США и Канады) дало толчок для рассмотрения черных сланцев Северного Кавказа. Объектами исследования являются терригенные породы, входящие в состав Тоханского комплекса (Тоханский покров), расположенные в пределах Передового хребта Северного Кавказа и прослеженные на протяжении более 200 километров. Тоханский комплекс, сложенный пелитоморфными углеродсодержащими отложениями (черными сланцами) с подчиненными проявлениями вулканогенных, глинисто-кремнистых, глинисто-карбонатных и псаммитовых пород, испытал зеленокаменный метаморфизм. Специфическим для черных сланцев является комплекс элементов, типоморфных для ультрамафитовых пород: хром, кобальт, никель, титан, марганец, ванадий, фосфор. Халькофильные элементы гидротермалитов в черных сланцах, такие как медь, цинк, свинец, содержатся обычно в небольших количествах, но локально, в флюидоактивных зонах тектонических нарушений, их содержание резко возрастает. Группа элементов, типоморфных спутников золота – мышьяк, висмут, сурьма, в неизмененных сланцах проявлена слабо, концентрируясь в участках наложенной гидротермальной проработки. Целью работы был анализ геохимических особенностей углеродсодержащей черносланцевой герцинской толщи Северного Кавказа. Методы исследования. Черные сланцы изучались геохимическими, литологическими, минераграфическими, петрографическими и рентгенографическими методами. Результаты. Установлена значительная возмущающая роль магния в сланцах. Все это говорит о своеобразии черносланцевых отложений и значительном влиянии ультраосновного материала на их петрохимические особенности. Петрохимические модули указывают на установленную невысокую проявленность процессов механической дифференциации, низкую степень вклада процессов химического выветривания и низкий уровень показателя зрелости материала пород области сноса при формировании основной массы отложений. Площадное и точечное опробование черных сланцев на благородные металлы показало повсеместное присутствие золота, платины и палладия в аномальном количестве в сумме трех металлов – не менее 1 г/т. Изложенный материал впервые однозначно указывает на ультрабазиты в качестве единого первичного источника благородных металлов в черносланцевом комплексе. Показано, что благородные металлы (Au, Pt, Pd) сингенетичны вмещающим осадочным терригенным толщам и отлагаются в процессе седиментогенеза. Практическая значимость. Результаты работы позволяют уточнить первичный источник благородных металлов и способствуют разработке металлогенической модели благородных металлов Северного Кавказа.

Ключевые слова: Северный Кавказ, черные сланцы, благородные металлы, золото, платина, палладий, площадные аномалии, новая рудная провинция.

Благодарности: Результаты исследований получены в рамках реализации проекта Erasmus + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP «Модернизация геологического образования в российских и вьетнамских университетах» МИНЕРАЛ.

Для цитирования: Богуш И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И., Исаева Н.А. Геохимические особенности рудоносносных черных сланцев Северного Кавказа. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9(3): 6-17. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36477.

=GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =

DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36477

Original paper

Geochemical features of metalliferous black shale of North Caucasus

I. A. Bogush¹, G. V. Ryabov¹, V. I. Cherkashin², N. A. Isaeva²

¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk 346428, Russian Federation, ^{e-mail: i_bogush@mail.ru;}

²Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 75 Yaragskiy Str., Makhachkala 367010, Russian Federation, e-mail: dangeo@mail.ru

Received: 9 september 2019, revised: 18 september 2019, accepted: 19 september 2019.

Abstract: Relevance. In the course of ore prospecting and regional exploration, the ore content of black shales was not considered a priori. The discovery of giant gold deposits (Muruntau, Bakyrchik, Sukhoi Log, Olimpiadnenskove, deposits in Southern China, the United States and Canada) gave an impulse to the investigation of black shales in the North Caucasus. The objects of study are terrigenous rocks that are part of the Tokhansky complex (Tokhansky cover), located within the limits of the Peredovoi Range of the North Caucasus and traced over 200 kilometers. The Tokhansky complex, composed of pelitomorphic carbon-bearing deposits (black shales) with affluent manifestations of volcanic, clay-siliceous, clay-carbonate and psammit rocks, experienced greenstone metamorphism. A complex of elements typomorphic for ultramafic rocks (chromium, cobalt, nickel, titanium, manganese, vanadium, phosphorus) is specific for black shales. The chalcophilic elements of hydrothermalites in black shales, such as copper, zinc, and lead, are usually found in small quantities, but locally, in the fluid-active zones of tectonic disturbances, their content increases sharply. A group of elements, which are typomorphic gold companions (arsenic, bismuth, antimony) is weakly manifested in unchanged shales and is concentrating in areas of superimposed hydrothermal exploration. Aim. To analyze the geochemical features of the carbonaceous black shale Hercynian stratum of the North Caucasus. Methods. Black shales were studied by geochemical, lithological, mineralographic, petrographic and radiographic methods. Results. A significant disturbing role of magnesium in shale has been defined. All this points to the peculiarity of black shale deposits and the significant influence of ultrabasic material on their petrochemical features. Petrochemical modules indicate the determined low manifestation of the processes of mechanical differentiation, the low degree of contribution of chemical weathering processes and the low level of maturity index of the material of rocks of the drift region during the formation of the bulk of the deposits. Areal and pit sampling of black shales for noble metals showed the ubiquitous presence of gold, platinum and palladium in an abnormal amount in the sum of three metals (at least 1 g/t). The stated material for the first time points unambiguously to ultrabasites as a single primary source of noble metals in the black shale complex. It was shown that noble metals (Au, Pt, Pd) are syngenetic to the host sedimentary terrigenous sequences and are deposited during sedimentogenesis. Practical significance. The results of the study allow specifying the primary source of noble metals and contribute to the development of a metallogenic model of noble metals in the North Caucasus.

Keywords: North Caucasus, black shale, noble metals, gold, platinum, palladium, areal anomalies, news ore occurrence.

Acknowledgments: The research results were obtained within the framework of the Erasmus + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP project «Modernization of geological education in Russian and Vietnamese universities» MINERAL.

For citation: Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I., Isaeva N.A. Geochemical features of metalliferous black shale of North Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 6-17. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36477.

9 (3) 2019

Введение

Углеродсодержащие черносланцевые девонские толщи Северного Кавказа широко развиты в пределах Передового хребта в виде 200-километровой региональной полосы. До 2000 года сланцы не привлекали внимания в металлогеническом отношении и не исследовались. В процессе рудно-поисковых и региональных съемочных работ рудоносность черных сланцев априорно не рассматривалась. Открытие гигантских золоторудных месторождений (Мурунтау, Бакырчик, Сухой Лог, Олимпиадненское, месторождения Южного Китая, США и Канады) дало толчок для рассмотрения черных сланцев Северного Кавказа. Проведенные исследования показали аналогию черных сланцев Северного Кавказа сланцевым толщам крупнейших сланцевых золоторудных регионов [Богуш, Курбанов, 1995; Богуш и др., 2016; Гончаров и др., 2005, 2006]. На Кавказе черносланцевые породы трактовались и назывались по-разному – филлитовидными породами, филлитами, глинистыми метаморфизованными породами, просто глинистыми метаморфитами. Региональные рентгеновские исследования В.В. Якушева черных сланцев по материалам И.А. Богуша, В.С. Исаева, Н.В. Глазыриной показали высокий (зеленокаменный) метаморфизм сланцев и полное отсутствие в них глинистого вещества [Богуш и др., 2004; Гончаров и др., 2005]. Глинистая компонента сланцев замещена гидрослюдами, в силу чего все сланцы девона относятся к филлитам.

В свое время Лазаренковым В.Г., Смысловым А.А. и Тихомировым Л.И. выделен Девонский черносланцевый терригенный комплекс в качестве одной из платинометальных территорий России, относящейся к углеродистой формации [Лазаренков и др., 1998].

Черносланцевые комплексы среднего девона метаморфического тоханского типа содержат проявления благородных металлов, относящиеся к семейству месторождений углеродисто-терригенных формаций. Как установлено авторами, аномальные содержания благородных металлов (Au, Pt, Pd в сумме не менее 1 г/т) распространены по всей полосе черных сланцев Северного Кавказа [Богуш и др., 2018]. Местами черные сланцы продуцируют промышленные скопления благородных металлов (Чучкурское местороджение) [Богуш и др., 2018].

Исследования геохимических особенностей в рамках рудоносности черных сланцев Северного Кавказа позволяют уточнить первичный источник благородных металлов и способствуют разработке металлогенической модели благородных металлов этого региона [Богуш и др., 2018]. Черные сланцы Кавказа полностью соответствуют общей тенденции освоения благородных металлов черносланцевых толщ, что проявляется в освоении крупных и уникальных по размерам месторождений с относительно невысокими содержаниями этих металлов.

1. Методика исследований

Палеозойский черносланцевый комплекс, входящий в состав офиолитовой формации Северного Кавказа, исследовался авторами с 70-х годов прошлого столетия путем составления геологических карт и карт рудной нагрузки масштабов от 1:2000 до 1:100; изучения рудных полей Урупского, Худесского и Бескесского колчеданных месторождений, с участием черных сланцев; минералогическими и геохимическими исследованиями отдельных участков и профилей по всей 200 км-й полосе черносланцевой формации. Описан, геохимически опробован и минералогически откартирован опорный разрез сланцев артыкчатской свиты по балке Бахмутке в Урупском рудном районе. По разрезу проведены специальные геохимические исследования благородных металлов (Au, Ag, Pt, Pd). Черные сланцы изучались геохимическими, литологическими, минераграфическими, петрографическими и рентгенографическими методами [Богуш и др., 2018; Гончаров и др., 2005, 2006].

2. Герцинские черные сланцы Северного Кавказа

Объектами исследования являются терригенные породы, входящие в состав Тоханского комплекса (Тоханский покров), расположенные в пределах Передового хребта Северного Кавказа, прослеженные на протяжении более 200 километров. В свое время комплекс углеродсодержащих черносланцевых толщ тоханского типа был выделен в Передовом хребте авторами А.Н. Долей, В.Н. Доброродным и Г.И. Барановым (1984). Тоханский комплекс объединяет андрюкскую, артыкчатскую (бахмуткинскую) и полянскую свиты среднего девона. Тоханский комплекс, сложенный пелитоморфными углеродсодержащими отложениями с подчиненными проявлениями вулканогенных, глинисто-кремнистых, глинисто-карбонатных и псаммитовых пород, испытал зеленокаменный метаморфизм. Сланцевая толща прорвана жильными магматическими породами и малыми интрузиями (гранодиориты, граниты, андезиты, лампрофиры) и содержит редкие пластовые тела риолитов, риодацитов. В разрезе черносланцевого тоханского комплекса артыкчатской свиты D₂₋₃ar (или бахмуткинской, D₂₋₃bh) участвуют пелитоморфные разности (филлиты), алевролиты, песчаники и конгломераты. Мощность толщи составляет до 1500 м, полную мощность определить сложно по причине шарьяжного перекрытия ее колчеданоносными девонскими (D₂) вулканитами базальтоидной формации.

Черносланцевые девонские толщи территориально совпадают с глубинной Тырныауз-Пшекишской шовной зоной, главной золотоносной структурой Северного Кавказа [Потапенко, Пруцкий, 1976]. Четырехсоткилометровый Северный разлом этой зоны сопровождает пояс ультрабазитовых массивов и является тектоническим контактом палеозойского блока Кавказа, надвинутого на альпийское основание [Богуш и др., 2016; Потапенко, Пруцкий, 1976]. Полоса герцинских черных сланцев вытянута по границе глубинного Северного разлома и входит в состав офиолитового пояса Северного Кавказа [Новожилов, Гаврилов, 1999].

Черные сланцы среднего девона герцинской металлогенической зоны Передового хребта Северного Кавказа слагают половину разреза герцинского офиолитового пояса Северного Кавказа (D₂₋₃). Вторая половина полосы сложена одновозрастными колчеданоносными базальтоидными вулканитами риолит-базальтовой формации [Геология СССР, 1968].

Таблица 1. / Table 1.

Литологический состав разреза отложений андрюкской свиты по реке. Б. Лаба [Черницин В.Б., Прокуронов, 1977]. / The lithological section composition of the Andryuk suite sediments along the river.

Порода / Rock	СреднийВариацииобъем, %объема, %/ Average/ Volumevolume, %variations, %		Средняя мощность, м / Average power, m	Вариации мощностей, м / Power Variations, m	
Известняки / Limestone	0,5	0-0,7	6,2	1-20	
Филлиты / Phyllites	74,5	62-83	8,1	0,2-115	
Метаалевролиты / Metaaleurolites	8	2-20	1	0,1-5	
Mетапесчаники / Metasandstones	2	1-3	4,3	1,5-10	
Метагравелиты / Metagravelites	12,5	2-28	14,3	1-120	
Mетаконгломераты / Metaconglomerates	2,5	0-7	42,5	20-65	

he lithological section composition of the Andryuk suite sediments along the river B. Laba [Chernitsin V.B., Prokuronov, 1977]. /

9 (3) 2019

Таблица 2. / Table 2.

Силикатные анализы сланцев и песчаника (проба У-49/00) Урупского района (опорный разрез по балке Бахмутке) * /

Silicate analyses of shales and sandstone (sample U-49/00) of the Urup region (reference section along the Bakhmutka beam) *

№№ проб / Sample Numbers	У-30/00	У-27/00	У-40/00	V-49/00	V-69/00	У-61/00	У-70/00
SiO ₂	60,8	62,6	60,8	82,6	63,6	63,8	61,4
Al ₂ O ₃	15,8	15,9	14,7	4,5	16,0	16,4	15,0
TiO ₂	0,81	0,82	0,78	0,24	0,82	0,56	0,82
FeO	5,96	5,54	5,70	1,41	3,82	5,12	5,17
Fe ₂ O ₃	1,49	1,85	2,77	1,19	2,66	1,52	1,77
P ₂ O ₅	0,19	0,10	0,13	0,10	0,19	0,14	0,22
MnO	0,15	0,14	0,21	0,13	0,16	0,22,	0,23
CaO	0,71	0,47	0,60	2,40	0,45	0,20	0,44
MgO	4,61	3,55	5,45	1,08	4,39	3,39	6,15
K ₂ O	1,86	2,91	1,63	0,80	2,36	2,65	2,16
Na ₂ O	2,68	1,23	1,50	0,39	1,40	2,50	1,64
SO ₃	0,1	0,21	0,1	1,61	2,77	0,1	0,1
ПП	-	-	-	3,08	4,62	3,40	4,68
Сумма / Sum	94,96	95,38	94,37	99,53	100,24	99,90	99,68

*Анализы выполнены ЦИЛ ФГУП «Кавказгеолсъемка». /

* The analyses were performed by Central Measurement Laboratory of the Federal State Unitary Enterprise «Kavkazgeolsemka».

Состав черных сланцев достаточно однороден и укладывается в классическое определение этих пород (табл. 1).

Основываясь на реконструируемых минимальных содержаниях C_{opr} , черносланцевые отложения Тоханской формации следует относить к низкоуглеродистым ($C_{opr} = 1-3\%$). При микроскопическом изучении филлитов видно, что углеродистое вещество (УВ) располагается по слоистости, но часто оно распределено в пределах шлифов относительно равномерно, без микрослоистости.

Химический состав филлитов довольно однороден и не обнаруживает большого разброса показателей (табл. 2).

Отличительной особенностью филлитов (метапелиты) является их высокая магнезиальность, содержание MgO колеблется от 3,39% до 6,15%. Магнезиальность филлитов типоморфна для всей черносланцевой полосы Северного Кавказа [Геология СССР, 1968]. В высокомагнезиальных филлитах встречается до 10% серпентина. В сланцах отчетливо проявляется калиевый тип химического состава, в то время как для вулканитов девонской офиолитовой полосы Северного Кавказа постоянно проявляется натровая направленность [Геология СССР, 1968; Гончаров и др., 2005].

3. Геохимические особенности черных сланцев

Специфическим для черных сланцев артыкчатской и андрюкской (бахмуткинской) свит является комплекс элементов, типоморфных для ультрамафитовых пород: хром, кобальт, никель, титан, марганец, ванадий, фосфор. Наиболее показателен хром с концентрациями от 0,006% до 0,5%, в среднем 0,089% (кларк концентрации КК=10,72). Никель преобладает над кобальтом и содержится постоянно в количествах от 0,003% до 0,15%, в среднем 0,0243% (КК=4,19). Кобальт стабильно обнаруживается во всех пробах в количествах от 0,0015% до 0,010%, среднее 0,0065% (КК=3,6). Разброс показателя марганца – от 0,06 до более 1%, среднее 0,278% (КК=2,78). Фосфор и ванадий содержатся в сланцах примерно в равных количествах: ванадий – от 0,06% до 0,015%, среднее 0,133% (КК=1,48), фосфор – от 0,05% до 0,3%, среднее 0,127% (КК=1,37). Титан стабильно проявляется в интервале содержаний 0,05-0,3%, среднее 0,447% (КК=0,99).

Халькофильные элементы гидротермалитов в черных сланцах, такие как медь, цинк, свинец, содержатся обычно в небольших количествах, но локально, в флюидоактивных зонах тектонических нарушений, их содержание резко возрастает. Медь в среднем содержится в количестве 0,004%, но локально, а в зонах секущих тектонических нарушений, возрастает до 0,3%. Цинк в черных сланцах распространен равномерно, среднее содержание -0,0127%, местами повышаясь до 0,02%. Также равномерно распространен и свинец, среднее -0,0045%, локально до 0,008%.

Группа элементов, типоморфных спутников золота – мышьяк, висмут, сурьма, в неизмененных сланцах проявлена слабо, концентрируясь в участках наложенной гидротермальной проработки. Мышьяк обнаружен только в 24% проб, в среднем с разбросом 0,003-0,005% (КК=17,6-24,4), локально повышаясь до 0,015-0,03% в тектонических зонах. Висмут содержится во всех пробах в количествах 0,00008-0,00015%, в среднем 0,000104%, локально повышаясь до 0,0002%. Сурьма обнаружена в 23% проб в количествах 0,001-0,002%, в среднем 0,0015 (КК=30). Все эти элементы аномально проявляются в березитизированных гранодиоритах, секущих черносланцевые породы.

Необычайность состава черных сланцев нашла выражение и в их петрохимических характеристиках. В фундаментальной работе по геохимии черных сланцев Я.Э. Юдовича и М.П. Кертиса [Юдович, Кертис, 1988] нет классификационного показателя, аналогичного рудоносным сланцам Северного Кавказа. Используется главный петрохимический параметр ГМ, рассчитанный по формуле:

$$TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO$$
 (MnO) SiO_2

Для сланцев андрюкской свиты ГМ равен 0,36-0,41 и не имеет своего литологического описания по причине необычности своего литологического состава [Юдович, Кертис, 1988].

На значения петрохимических модулей применительно к отложениям Тоханского покрова оказывает влияние не только содержание окислов, участвующих в расчете модулей (A1₂O3, FeO+Fe₂O₃, щелочей), но и содержание MgO. В большинстве модулей [Юдович, Кертис, 1988] магний не учитывается, так как эти модули применяются для рассмотрения осадочных пород, как продуктов выветривания и денудации наиболее распространенных пород, от основного до кислого состава, то есть Fe-Al-Si ряда.

Анализ же поведения петрохимических модулей в отложениях Тоханского покрова, их корреляция друг с другом указывают на значительную возмущающую роль магния при интерпретации значений петрохимических модулей. Все это говорит о своеобразии этих отложений и значительном влиянии ультраосновного материала на их петрохимические особенности.

В целом отложения Тоханского покрова характеризуются специфически высоким вкладом в их состав продуктов размыва ультраосновных пород с выделением высокомагнезиальных отложений. Менее магнезиальные разности характеризуются преимущественным вкладом кремнистого материала – фтанитов. В обоих случаях отложения обладают граувакковым, незрелым характером. Петрохимические модули указывают на установленную нами невысокую проявленность процессов механической дифференциации, низкую степень вклада процессов химического выветривания и низкий уровень показателя зрелости материала пород области сноса при формировании основной массы отложений [Гончаров и др., 2005].

4. Рудная зона Грушовая

Геохимические особенности черных сланцев с учетом наложенной минерализации наглядно проявились в детально изученной нами рудной зоне Грушовая, где на общий геохимический фон локально накладываются золоторудная, колчеданная, полиметаллическая и никель-кобальтовая минерализации (рис. 1).

В пределах этой зоны по левому борту реки Большой Лабы в сланцах впервые обнаружена платина в виде зерен размером до 0,8 мм [Богуш и др., 2018]. Рудная минерализация черных сланцев представлена несколькими парагенетическими ассоциациями рудных и околорудных минералов: 1 – кварц, серицит, хлорит, пирит, халькопирит (колчеданная минерализация); 2 – кварц, пентландит, арсениды и антимониды никеля (сульфидная ассоциация) – никелевая минерализация ассоциирует и локализуется в активно измененных (окварцованных, серицитизированных и карбонатизированных) конгломератах; 3 – гарниерит, ревдинскит (силикатно-никелевая ассоциация) – примазки и плоские гнезда тяготеют к конгломератам, часто развиты по сланцеватости.; 4 – кварц, железистый карбонат, пирит, арсенопирит, золото, леллингит, платиноиды (золотосульфидная ассоциация); 5 – галенит, пирит, сфалерит (полиметаллическая ассоциация), приуроченная к дайкам лей-



Рис. 1. Рудная зона Грушовая.

Условные обозначения: 1 – черные сланцы (D₂bh); 2 – метаконгломераты; 3 – аплитовидные граниты; 4 – золото; 5 – полиметаллы; 6-9 – минерализация (6 – халькопирит, 7 – сфалерит, 8 – пирит 5-15%; 9 – пирит 0,5-3%); 10 – тектонические нарушения; 11 – контакты пород; 12 – дороги. / Fig. 1. Ore zone Grushovaya. Legend: 1 – black shales (D₂bh); 2 – metaconglomerates; 3 – aplite-like granites; 4 – gold; 5 – polymetals; 6-9 – mineralization (6 – chalcopyrite, 7 – sphalerite, 8 – pyrite 5-15%; 9 – pyrite 0.5-3%); 10 – tectonic disturbances; 11 – rock contacts; 12 – roads.

Таблица 3. / Table 3.

Результаты спектрального анализа черных сланцев зоны Грушовая (Большая Лаба) * /

Элементы / Elements	CaO	TiO2	MnO	S	Cr	V	Со	Ni	Cu
	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Филлиты / Phyllites	4,5	0,92	0,52	0,94	317	99	32	160	50
Кластиты / Clastites	5,57%	0,28	0,34	0,53	277	62	34	68	34
Метасоматиты / Metasomatitis	5,67	0,49	1,48	0,71	285	88	23	102	59

Spectral analysis of black shales in the Grushovaya zone (Bolshaya Laba) *

Про	должение	таблиць	ol 3. /	Con	tinuation	of	table 3.	
			1			_		

10

Элементы / Elements	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb	As
	(ppm)						
Филлиты / Phyllites	88	64	340	79	272	14	42
Кластиты / Clastites	54	43	190	58	161	43	109
Метасоматиты / Metasomatitis	76	51	333	89	175	15	60

*Анализы выполнены в ЦХЛ ФГП «Кавказгеолсьемка» /

* The analyses were performed at the Central Chemical Laboratory of the Federal State Unitary Enterprise «Kavkazgeolsemka»

кократовых гранитов (фельзит-порфиры). С аналогичными гранитами в зоне Передового хребта генетически связано Худесское полиметаллическое месторождение, а в Урупском и Большелабинском районе многочисленные проявления радиоактивных металлов.

Никелевая минерализация широко представлена вдоль южного контакта Беденского ультрабазитового массива на продолжении зоны Грушовой. Она присутствует как в сульфидной, так и силикатной формах. По данным В.Ф. Сидоренко отдельные пробы черных сланцев участка содержат местами до 0,3% никеля и до 1% хрома. В тектонической зоне контакта с серпентинитами в сланцах обнаружены пентландит, гарниерит, никелин, пирротин, миллерит, гарниерит, ревдинскит. Никель максимально содержится в филлитах – 0,160% (табл. 3).

Высокое значение CaO (4,5-5,67% и до 15-17%) (см. табл. 3) положительно коррелируется с высокой степенью карбонатизации черносланцевой толщи, установленной при петрографическом исследовании пород (присутствуют кальцит, анкерит, доломит, сидерит). По этому показателю черные сланцы, по нашему мнению, следует отнести к кремнистокарбонатно-углеродистым сланцам. Кальцит развит повсеместно во всех литологических типах пород, активно участвуя в гидротермальных метасоматических процессах.

Колчеданная пиритная минерализация имеет проходящий характер по всей толще черных сланцев и присутствует в заметных количествах – от 0,5-3% и местами до 5-8% во всех типах пород. Постоянное присутствие сульфидов нашло отражение и в высоком количестве серы – 0,53-0,91% (табл. 3).

Рудная минерализация черных сланцев представлена несколькими парагенетическими ассоциациями рудных и околорудных минералов разного возраста и широкого генетического спектра (диагенетических, гидротермальных, метаморфогенных, магматогенных), испытавших большей частью зеленокаменный метаморфизм.

Пирит представлен практически всеми генетическими типами: диагенетический, метаморфический и гидротермальный. С гидротермальным пиритом местами ассоциируют

9 (3) 2019

Таблица 4. / Table 4.

Содержания металлов в черных сланцах зоны Грушовой*, г/т. / The metal content in the black shales of the Grushovaya zone*, g/t.

№№/пп / Sample Numbers	Au	Pt	Pd	Со	Ni	Cu	Рb
1	0,18	0,24	0,26	6,0	3,0	89,0	15,0
2	0,30	0,41	0,38	6,0	3,5	90,1	14,4
3	0,22	0,25	0,31	7,0	38,0	11,0	29,0
4	0,16	0,11	0,09	6,5	35,5	11,5	25,4
5	0,31	0,24	0,30	5,0	24,0	39,0	26,0
6	0,64	055	0,41	7,0	19,0	12,0	20,0
7	0,52	0,32	0,28	7,3	22,5	14,4	20,6
8	0,56	0,41	0,38	7,0	40,0	19,0	22,0
9	0,11	0,018	0,017	8,0	35,0	50,0	24,0
10	0,34	0,41	0,38	7,3	34,4	42,5	22,2
11	0,51	0,55	0,57	5,9	51,0	8,0	13,0
12	0,34	0,34	0,28	5,0	36,0	3,0	42,0
13	0,30	0,29	0,41	6,1	20,3	2,2	12,8
14	0,32	0,33	0,36	4,8	18,0	6,5	26,6
15	0,29	0,33	0,33	0,37	17,7	12,9	32,2
16	0,31	0,29	0,34	3,0	16,0	16,0	42,0
17	0,23	0,25	0,25	5,0	38,0	12,0	26,0
18	0,22	0,32	0,19	6,0	35,5	13,3	20,7
19	0,25	0,18	0,20	12,3	40,3	12,7	18,8
20	0,40	0,36	0,41	12,0	46,0	6,0	22,0
21	0,42	0,44	0,29	10, 7	30,3	7,2	18,6
22	0,45	0,30	0,32	12,4	45,5	10,7	18,0
23	0,50	0,45	0,44	12,4	36,6	13,3	19,8
24	0,56	0,40	0,39	12,0	8,1	24,0	20,0
25	0,33	0,05	0,11	9,0	-	21,3	-
26	0,28	0,2	0,14	7,6	-	55,5	-
27	0,38	0,05	0,2	11,1	-	22,9	-
Среднее содержание / Average content	0,335	0,315	0,303	29,5	3,0		
Интервал paзброса / Interval spread	0,11-0,64	0,018-0,55	0,09-0,57	0,37-12,4	3,0-51,0	3,0-90,1	12,8-42,0

*Анализы выполнены в Лаборатории физико-химических исследований

Института геологии Дагестанского научного центра РАН. /

* The analyses were performed at the Laboratory of Physical and Chemical Research of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

халькопирит, сфалерит. Сульфидная полиметаллическая минерализация (галенит, сфалерит, пирит) в сланцах сопровождает жильные тела аплитовидных гранитов.

Особое внимание привлекает значительное содержание хрома (табл. 3), типоморфного элемента ультрабазитов, еще раз подчеркивая генетическое родство сланцев и ультрабазитов, как это утверждается авторами по материалам литологических, петрографических и петрохимических исследований [Гончаров и др., 2005, 2006]. Среднее содержание хрома в филлитах составляют 317 г/т (табл. 3). В отдельных пробах конгломератов зоны содержание хрома достигает 1949 г/т.

5. Благородные металлы (Au, Ag, Pt, Pd) в сланцах

Минералы платиновой группы впервые обнаружены авторами в тесной ассоциации с россыпным золотом в черных шлихах в аллювии рек Большой Лабы, Урупа и Власенчихи [Богуш и др., 2010]. Наряду с редкими находками платины больший интерес представляют платиноиды триады – осмий-иридий-рутений. Микрозондовые исследования (20 проб) обнаруженного нами минерала позволили диагностировать его как рутениридосмин (Os, Ir, Ru) с примерно равными содержаниями этих элементов. Золото и платиноиды в породах черносланцевой полосы повсеместно содержатся в тонко рассеянном дисперсном состоянии и визуально не фиксируются, но повсеместно обнаруживаются химическими методами. К сожалению, благородные металлы начали привлекать внимание на Кавказе только в конце предыдущего столетия [Богуш и др., 2018].

Таким образом, первые находки и наличие платиноидов в черных сланцах Северного Кавказа подтверждены аналитически, визуально и микроскопически. В пробах черных сланцев из зоны Грушовая обнаружены элементы благородных металлов с преобладанием палладия (табл. 4).

На Северном Кавказе повышенное внимание исследователей на площадях развития черносланцевых толщ всегда привлекали россыпи благородных металлов в силу своей высокой концентрации и хорошей визуализации [Новожилов, Гаврилов, 1999]. В подавляющем большинстве случаев минеральные формы группы платиноидов в черных сланцах, да и в магматических породах, визуально и микроскопически не фиксируются, так как находятся в тонкодисперсном состоянии. Благородные металлы проявляют себя лишь при химическом опробовании с использованием прецизионной аналитической аппаратуры. Аналогичная ситуация вообще типична для благородных металлов в черносланцевых толщах. Крупнейшие месторождения золота и платиноидов месторождения Сухой Лог, золоторудные месторождения Восточного Забайкалья практически не имеют визуально фиксированных минеральных форм благородных металлов [Гурская, 2000; Новожилов, Гаврилов, 1999; Парада, 2009; Сазонов и др., 2011; Cfrville et al., 1990; Crauch et al., 1991; Large et al., 2007].

Несмотря на общее дисперсное распространение золота и платиноидов в черных сланцах Северного Кавказа, в отдельных случаях, а именно в флюидоактивных зонах, встречаются проявления их минеральных форм в визуально различимых размерах. Первые минералогические находки платины обнаружены нами в черных сланцах Большой Лабы в рудной зоне Грушовая. В метаморфизованных сланцах в полированных шлифах найдены зерна платины размером до 0,4-0,8 мм. Платина локализуется в анхикварцевых с хлоритом и серицитом метасоматитах по филлитам. В аналогичных зонах зерна золота встречены в метасоматических жилах кварца.

Площадное и точечное опробование черных сланцев на благородные металлы показало повсеместное присутствие золота, платины и палладия в аномальном количестве в сумме трех металлов (не менее 1г/т). В первую очередь наши поисковые работы пока были сосредоточены в черных сланцах зоны Грушовая, где ранее нами найдена коренная платина [Богуш и др., 2004].

Выводы

1. Изложенный материал впервые однозначно указывает на ультрабазиты в качестве первичного источника благородных металлов в черносланцевом комплексе. Показано, что благородные металлы (Au, Pt, Pd) сингенетичны вмещающим осадочным терригенным толщам и отлагаются в процессе седиментогенеза.

2. Сложная (полигенная) теоретическая схема рудогенеза благородных металлов черносланцевой формации в представлении практически всех авторов [Гурская, 2000; Додин и др., 2000; Новожилов, Гаврилов, 1999; Парада, 2009; Сазонов и др., 2011] полагает первичным источником благородных металлов гипотетические глубинные магмы (для золота эти магмы имеют гранитный состав, а для платиноидов – ультрабазитовый). Приведенный авторами фактический материал по черным сланцам Северного Кавказа указывает на единый ультрабазитовый источник двух групп благородных металлов – как для Au, так и для Pt, Pd.

3. Анализ рудоносности черных сланцев Кавказа и установление древнейшего источника благородных металлов стали отправным пунктом для создания автором металлометрической геолого-генетической модели благородных металлов Северного Кавказа, охватывающей весь фанерозойский этап его развития [Богуш и др., 2018].

Литература

1. Богуш И.А., Курбанов М.М. Концепции рудоносности и перспективы благородных металлов черносланцевых толщ Северного Кавказа. // Основные проблемы геологического изучения и использования недр Северного Кавказа. – Ессентуки. – 1995. – С. 308-311.

2. Богуш И.А., Исаев В.С., Глазырина Н.В. Вещественный состав и условия формирования палеозойской черносланцевой формации зоны Передового хребта Северного Кавказа. // Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии юга России и Кавказа. Материалы 4-й науч. междунар. конф. Том 1. Актуальные проблемы геологического изучения Южного Региона. – Новочеркасск. – 2004. – С. 57-72.

3. Богуш И. А., Рябов Г. В., Кафтанатий А. Б. Минералы платиновой группы в аллювии бассейна рек Уруп-Большая Лаба (Северный Кавказ). // ДАН. – 2010. – Т.435. №3. – С. 357-360.

4. Богуш И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И. Металлогения благородных металлов (Au, Pt, Pd) Северного Кавказа. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том VIII. – М.: ИИЕТ РАН, 2018. – С. 176-183.

5. Богуш И.А., Черкашин В.И., Рябов Г.В., Абдуллаев М.Ш. Новый тип оруденения благородных металлов на Северном Кавказе // Доклады Российской академии наук. – 2016. – Том 466. №2. – С. 193-195.

6. Геология СССР. Северный Кавказ. Т. 9, Ч. 1. – 1968. – С. 83-111.

7. Гончаров В.И., Богуш И.А., Глазырина Н.В., Исаев В.С. Литология, геохимия и золотоносность черносланцевых комплексов Северного Кавказа // Вестник ЮНЦ РАН. – 2005. – Т. 1. №4. – С. 58-64.

8. Гончаров В.И., Богуш И.А., Исаев В.С., Глазырина Н.В., Джангиров М.Ю. Дарчиева А.Е., Васьков И.М. Литогеохимия и первичный состав пород золотоносного черносланцевого комплекса Северного Кавказа // Вестник Южного научного центра РАН. – 2006. – Том 2. №2. – С. 46-58.

 Гурская Л. И. Платинометалльное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. – С.-Пб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 208 с.

10. Додин Д.А., Изоитко В.М., Чернышов Н.М. Платинометальные месторождения России. – С.-Пб: Наука, 2000. – 7 \35 с.

11. Лазаренков В. Г., Смыслов А. А., Тихомиров Л. И. // Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов. – С.-Пб. – 1998. – С. 210-230.

 Новожилов Ю. М., Гаврилов А. М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М.: Изд. ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.

 Парада С.Г. Предпосылки и признаки платиноносности Северного Кавказа. // Состояние минерально-сырьевой базы Юга России и перспективы ее развития. Материалы научн.-технич. конф. – Ростов-н/Д. – 2009. – С. 83-87.

14. Потапенко Ю.Я., Пруцкий Н.И. Офиолитовый конгломерат в среднем девоне зоны Передового хребта. // ДАН СССР. – 1976. – Т. 228. №5. – С. 1179-1181.

15. Сазонов В. Н, Коротеев В. А., Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Великанов А. Я. Золото в «черных сланцах» Урала // Литосфера. – 2011. – №4. – С. 70-92.

16. Черницин В. Б., Прокуронов П. В. Металлогеническая специализация Пшекиш-Тырныаузского глубинного разлома (Большой Кавказ). // Геология рудн. месторожд. – 1977. – №2. – С. 115-118.

17. Юдович Я. Э., Кертис М. П. Геохимия черных сланцев. – Л.: Наука, 1988. – 272 с.

18. Carville D. P., Leckie J. F., Moorhead J. G. a.o. Coronation Hill gold-platinum deposit. // In Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. – 1990. – Vol. 1. – Pp. 759-762.

19. Crauch R.I., Coveney R.M., Murawchick J.B. et al. Black shales as hostes for unconventional

platinum-group-element resources. Examplex from Southern China end the Yukon, Canada, and implications for US resources // US Geol. Surv. – 1991. – No. 1062. – Pp. 33-34.

20. Large R., Maslennikov V., Robert F. et al. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoy Log deposits, Lena gold province, Russia. // Econ.Geol. – 2007. – V. 102. – Pp. 1233-1267.

References

1. Bogush I.A., Kurbanov M.M. Ore-bearing concepts and perspectives of noble metals of the black shale strata of the North Caucasus. The main problems of geological survey and use of the subsoil of the North Caucasus. Essentuki. 1995. pp. 308-311. (In Russ.)

2. Bogush I.A., Isaev V.S., Glazyrina N.V. The material composition and conditions of the formation of the Paleozoic black shale formation of the zone of the Advanced Range of the North Caucasus. The problems of geology, minerals and ecology of the Southern Russia and the Caucasus. Materials of the 4th scientific. int. conf. Volume 1. Actual problems of geological survey of the Southern Region. Novocherkassk. 2004. pp. 57–72. (In Russ.)

3. Bogush I.A., Ryabov G.V., Kaftanatii A.B. Minerals of the platinum group in the alluvium of the Urup-Bolshaya Laba river basin (North Caucasus). Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 2010. Vol.435. No.3. pp. 357-360. (In Russ.)

4. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Metallogeny of noble metals (Au, Pt, Pd) of the North Caucasus. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Vol. VIII. M.: IIET RAS, 2018. pp. 176–183. (In Russ.)

5. Bogush I.A., Cherkashin V.I., Ryabov G.V., Abdullaev M.Sh. A new type of mineralization of noble metals in the North Caucasus. Reports of the Russian Academy of Sciences. 2016. Vol. 466. No. 2. pp. 193–195. (In Russ.)

6. Geology of the USSR. North Caucasus. Vol. 9, Part 1. 1968. pp. 83–111. (In Russ.)

7. Goncharov V.I., Bogush I.A., Glazyrina N.V., Isaev V.S. Lithology, geochemistry and gold content of black shale complexes of the North Caucasus. Bulletin of the SSC RAS. 2005. Vol. 1. No. 4. pp. 58–64. (In Russ.)

8. Goncharov V.I., Bogush I.A., Isaev V.S., Glazyrina N.V., Dzhangirov M.Yu. Darchieva A.E., Vas'kov I.M. Litho-geochemistry and primary composition of the gold-bearing rocks of black shale complex of the North Caucasus. Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2006. Vol. 2. No. 2. pp. 46–58. (In Russ.)

9. Gurskaya L.I. Black shale platinum mineralization and criteria for its prognosis. S.-Pb.: VSEGEI Publishing House, 2000. 208 p. (In Russ.)

10. Dodin D.A., Izoitko V.M., Chernyshov N.M. Platinum deposits of Russia. S.-Pb: Nauka, 2000. 7-35 p. (In Russ.)

11. Lazarenkov V.G., Smyslov A.A., Tikhomirov L.I. Large and unique deposits of rare and precious metals. Saint Petersburg. 1998. pp. 210–230. (In Russ.)

12. Novozhilov Yu.M., Gavrilov A.M. Gold-sulfide deposits in carbon-terrigenous strata. M. Publishing house TSNIGRI, 1999. 175 p. (In Russ.)

13. Parada S.G. Background and signs of platinum in the North Caucasus. The state of the mineral resource base of the South of Russia and the prospects for its development. Proceedings of scientific conference. Rostov-on-Don. 2009. pp. 83–87. (In Russ.)

14. Potapenko Yu.Ya., Prutskii N.I. Ophiolite conglomerate in the Middle Devonian of the Forward Range zone. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1976. Vol. 228. No. 5. pp. 1179–1181. (In Russ.)

15. Sazonov V.N, Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Velikanov A.Ya. Gold in the "black shales" of the Urals, Lithosphere. 2011. No. 4. pp. 70–92. (In Russ.)

16. Chernitsin V.B., Prokuronov P.V. Metallogenic specialization of the Pshekish-Tyrnyauz deep fault (Greater Caucasus). Geology of the ore fields. 1977. No. 2. pp. 115–118. (In Russ.)

17. Yudovich Ya.E., Kertis M.P. The geochemistry of black shales. Leningrad. Nauka, 1988. 272 p. (In Russ.)

18. Carville D.P., Leckie J.F., Moorhead J.G. a.o. Coronation Hill gold-platinum deposit. In Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. 1990. Vol. 1. pp. 759–762.

19. Crauch R.I., Coveney R.M., Murawchick J.B. et al. Black shales as hostes for unconventional platinumgroup-element resources. Examplex from Southern China end the Yukon, Canada, and implications for US resources. US Geol. Surv. 1991. No. 1062. pp. 33-34.

20. Large R., Maslennikov V., Robert F. et al. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoy Log deposits, Lena gold province, Russia. Econ.Geol. 2007. Vol. 102. pp. 1233–1267.

= ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ 😑

VДК 553.66:553.61.13 (571.66.+571.661) DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36486</u>

Оригинальная статья

Вулканогены окраинных орогенных поясов северо-западного сектора Северо-Восточной Азии

Г.П. Яроцкий¹, к.г.-м.н., Х.О. Чотчаев 🕩²

¹Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 683006, Камчатский кр., г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, e-mail: ecology@kscnet.ru;

²Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

Статья поступила: 3 июня 2019, доработана: 28 июля 2019, одобрена в печать: 29 июля 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Территория развития орогенных вулканических поясов по многим проблемам орогенеза всё ещё не освящена. Особым аспектом тектоники юго восточной части территории является Северо Западно Корякский вулканический пояс. Его трассирование на юго запад на п ов Камчатку приводит к неизбежному вопросу единства во времени всего вулканического пояса, возникновение обособленных олигоценовых частей Северо Западно Корякского пояса, тектонической природы Уннэйваямского вулканического поля. Объектом исследования является вулканизм окраинных орогенных поясов северо-западного сектора Северо-Восточной Азии. Цель работы: установление геотектонических особенностей орогенных вулканических поясов. Методы исследования. Исследование орогенных поясов территории методологически обосновано глыбово-клавишной структурой литосферы и её земной коры на активных окраинах континента. Методология основана на изучении геолого-геофизической системы «тектоника-вулканогены окраин» континента. Основой системы является Концепция глыбово-клавишной структуры земной коры. Результаты работы. Показана тектоническая позиция окраинных орогенных вулканических поясов северо-западного сектора СВ Азии. Пояса образованы цепочками вулканических полей – вулканогенов. Вулканогены являются площадями вдоль активных окраин континента и образованы в эпоху завершения развития окраины. Показаны два тектонических механизма образования вулканогенов: гнездовых и линейных. Они отражают их положение в глыбово-клавишной структуре земной коры окраин, связаны с гранитоидной тектоно-магматической активизацией. Вулканогены территории обладают тектоническими признаками орогенной стадии развития окраины континента, имеют тектонические элементы системы «окраинный вулканический пояс – локальные впадины и поднятия блоковой окраины складчатого фундамента». Орогенный вулканизм развит двумя поясами на территории северо-западного сектора СВ Азии по северному и южному обрамлению позднемелового Корякского микроконтинента Центрально-Корякской структурно-формационной зоны (СФЗ). На южном обрамлении основания Охотско-Чукотского вулканического пояса северо-западного сектора СВ Азии лежат орогенные вулканические и осадочные молассы. Практическая значимость работы. Орогенный вулканизм сопряжён с важными аспектами тектоники и магматизма, создавшими условия формирования минерагенических таксонов золота, серебра, олова. Магматизм тектоно-магматической активизации обусловил образование металлогенических площадей вулканогенов с их адекватными рудными районами. На примерах орогенных вулканических поясов эоцена и олигоцена видна роль геотектонических и металлогенических аспектов глыбово-клавишной структуры земной коры активных окраин континента.

Ключевые слова: земная кора, вулканоген, сейсмичность, тектоника, закономерности, разломы, глыбово-клавишная структура литосферы.

Для цитирования: Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Вулканогены окраинных орогенных поясов северозападного сектора Северо-Восточной Азии. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 18-35. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36486.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =

DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36486</u>

Original paper

Volcanogens of marginal orogenic belts of the northwestern sector of Northeast Asia

G. P. Yarotskii¹, Kh. O. Chotchaev^{D²}

¹Institute of Volcanology and Seismology, 9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russian Federation, e-mail: ecology@kscnet.ru;

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

Received 3 June 2019; revised 28 July 2019; accepted 29 July 2019.

Abstract: Relevance. The area of orogenic volcanic belts` development is still not highlighted in many apects of orogenesis. A special aspect of the tectonics of the southeastern part of the territory is the North-West Koryak volcanic belt. Its tracing to the south-west on the Kamchatka Peninsula leads to the inevitable issue of the entire volcanic belt unity in time, the origin of isolated Oligocene parts of the North-West Koryak belt, the tectonic nature of the Unneivayamsky volcanic field. The research object is the volcanism of the marginal orogenic zones of the northwestern sector of Northeast Asia. Aim. To determine the geotectonic features of orogenic volcanic belts. Methods. The study of the orogenic zones of the territory is methodologically proved by the block-key structure of the lithosphere and its Earth's crust on the active margins of the continent. The methodology is based on the study of the geological and geophysical system of the "tectonics-volcanogenic margins" of the continent. The basis of the system is the concept of the block-keyboard structure of the earth's crust. Results. The tectonic position of the marginal orogenic volcanic belts of the northwestern sector of Northeast Asia is shown. Belts are formed by chains of volcanic fields - volcanogens. Volcanogens are the areas along the active margins of the continent and are formed during the era of the completion of the outskirts. Two tectonic mechanisms of the formation of volcanogens are shown: nested and linear. They reflect their position in the block-keyboard structure of the marginal crust of the outskirts; they are associated with granitoid tectonic-magmatic activation. The volcanic genes of the territory possess tectonic features of the orogenic stage of development of the continental margin; they have tectonic elements of the system "marginal volcanic belt - local depressions and elevations of the block margin of the folded basement". Orogenic volcanism is developed by two belts in the northwestern sector of Northeast Asia along the northern and southern margins of the Late Cretaceous Koryak microcontinent of the Central Koryak structural-formational zone (SFZ). Orogenic volcanic and sedimentary molasses are laid on the southern frame of the base of the Okhotsk- Chukotka volcanic belt of the northwestern sector of Northeast Asia. Practical significance. Orogenic volcanism is associated with important aspects of tectonics and magmatism, which have created the conditions for the formation of mineralogenic taxa of gold, silver, and tin. The magmatism of tectonic-magmatic activation led to the formation of metallogenic areas of volcanogens with their adequate ore regions. The examples of the orogenic volcanic belts of the Eocene and Oligocene show the role of geotectonic and metallogenic aspects of the block-key structure of the earth's crust of the active margins of the continent.

Keywords: crust, volcanogen, seismicity, tectonics, patterns, faults, block-key structure of the lithosphere.

For citation: Yarotskii G. P., Chotchaev Kh. O. Volcanogens of marginal orogenic belts of the northwestern sector of Northeast Asia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 18-35. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36486.

9 (3) 2019

Введение

Северо-Восток Азии являет собой территории геологических процессов, которые показывают классическую направленность организации континентальной коры за счёт преобразований морской. Этот механизм показывает последовательный прирост суши на границе с океаном. Прирост характерен двумя процессами: вулканизмом и субдукцией, и обдукцией океанических террейнов на сушу. Именно вулканизм является объектом авторского исследования.

Авторы много лет изучали различные аспекты геологии и металлогении площадей территории активных окраин континента. Окраина континента всегда маркируется вулканизмом. В свою очередь, вулканизм происходит в геотектонических процессах вертикальных движений, формирующих геоструктуры блоковые, складчатые и блоково-складчатые. И если это происходит на границе с океаном, то вертикальные движения способствуют образованию условий процессов – погружений и надвигов. Эти процессы очень уверенно картируются геологическими съёмками локальных впадин и прогибов и в виде надвигов разного времени развития морских террейнов. Движения геоструктур хорошо устанавливаются региональными геофизическими исследованиями методами МТЗ и МОВЗ, гравиметрическими, аэромагнитными съёмками.

В статье рассматривается территория северо-западного сектора CB Азии в сочленении разновозрастных структур формирования структурно-формационных зон (рис. 1). Территория лежит на южных окраинах Охотско-Чукотского – Катазиатского окраинного вулканического пояса. Её характерным, обязательным и безусловным тектоническим элементом являются окраинные орогенные вулканические пояса и вулканогенно-осадочная и осадочная моласса. Орогенная стадия на окраине континента – знак завершения её тектонического развития.

Территория изучена геологической, аэромагнитной и гравиметрической съёмками масштаба 1:200000. На сопредельной к западу площади, на слиянии левобережий Уннэйваяма и Имлан, выполнена съёмка МТЗ м-ба 1:500000, а на самой площади выполнен комплекс геолого-геофизических работ м-ба 1:50000. Через западную часть территории проходит региональный профиль МТЗ-МОВЗ. Вся территория входит в описание классической схемы м-ба 1:4000000 выдающегося исследователя Камчатки и Корякии С. Е. Апрелкова с соавторами [Апрелков и др., 1997]. Металлогеническим аспектам отдельных площадей юго-востока территории посвящены авторские работы [Яроцкий, 2017].

Орогенез материковой части Камчатского края не является объектом специальных исследований. Между тем, на всём пространстве северо-западного сектора СВ Азии выбранная территория развития орогенных вулканических поясов по многим проблемам орогенеза не освящена. Особым аспектом тектоники юго-восточной части территории является Северо-Западно-Корякский вулканический пояс. Его трассирование на юго-запад на п-ов Камчатку приводит к неизбежному вопросу: действительно ли этот вулканический пояс един во времени? Как возникли обособленные олигоценовые части Северо-Западно-Корякского пояса и почему его крупная, изолированная по простиранию, часть является Уннэйваямским вулканическим полем неясной тектонической природы? Этот аспект проблемы вулканического орогенеза рассмотрим и на примере Оклано-Пенжинского эоценового пояса на C3 территории.

Методология и методика исследования

Исследование орогенных поясов территории методологически обосновано глыбовоклавишной структурой литосферы и её земной коры на активных окраинах континента. Методология описывает геолого-геофизическую систему «тектоника-вулканогены окраин» континента. Основой системы является Концепция глыбово-клавишной структуры земной коры. Её исходной идеей является продольная зональность окраинных вулканических и складчатых геоструктур Корякско-Камчатского региона. Они последовательно во времени в сторону моря наращивают континент складчато-блоковыми геоструктурами [Лобковский, Баранов, 1984; Масуренков, 1991] вместе с серией вулканических поясов СВ простирания. В регионе это (с запада на восток) пояса: Охотско-Чукотский, как ветвь Катазиатского пояса (поздний мезозой-кайнозой), Западно-Камчатский (поздний мел-неоген), Центрально-Камчатский (неоген-квартер), Восточно-Камчатский и Чукотско-Корякский (поздний кайнозой). Эти региональные геоструктуры образовали на материке региона структурноформационные зоны (СФЗ): Гижигинскую, Пенжинскую, Центрально-Корякскую, Олюторскую и Хатырскую. Они же рассматриваются как тектонические зоны региона, главным элементом которого является консолидированная кора со складчатыми зонами [Апрелков и др., 1997].

Каждая система составлена элементами, которые находятся в структурной связи. Установление элементов и их связей приводит к получению цельного объекта системы. В методике такой методологии авторы руководствуются крылатым тезисом Чарльза Дарвина: «Наука заключена в такой группировке фактов, которая позволяет выводить на основании их общие законы и заключения». Этот тезис является алгоритмом научного системного анализа, описанного ниже.

Краткое содержание методологии, аспектов её применения

На границах СФЗ по линии прироста суши окраин континента образовались субрегиональные орогенные вулканические пояса. Между Гижигинской и Пенжинской структурноформационными зонами – Пенжинский – эоценовый, Пенжинской и Центрально-Корякской – Северо-Западно-Корякский олигоценовый, Центрально-Корякской и Олюторской – Чукотско-Корякский миоценовый пояса.

В названных поясах в тектонике вулканических поясов известны изолированные отдельные площади, именуемые вулканическими полями [Апрелков и др., 1997]. Однако это понятие «бесхребетное» и очень ограниченное в понимании тектоники их образования. Вместе с тем, для таких площадей известно определение вулканогена классика дальневосточной геологии Л.И. Красного: «Самостоятельное звено вулканических поясов, относящееся к особому генетическому типу тектонических структур, которые почти везде «срезают» уже сформированные складчатые образования; связанные с гранитоидными процессами активизации» [Красный, 1966; Тектоника..., 1976].

Локализация вулканогенов по простиранию как самостоятельных звеньев поясов обусловлена глыбово-клавишной структурой литосферы [Яроцкий, 2017]. Краткое содержание строения земной коры активных окраин континента лежит в следующем изложении Концепции: основное её положение – создание в продольных СВ региональных вулканических геоструктурах прироста окраины континента структур-звеньев, обособленных поперечными СЗ разломами [Буш, 1983], - т.е. вулканогенами. По Тихоокеанскому подвижному поясу прирост континента создают СВ геоструктуры, наследующие СВ составляющую диагональной планетарной регматической сетки в Корякии, на Чукотке, островах Курильской гряды, Сахалине, Японии, Новой Зеландии, Южной Америке. Эти региональные вулканические пояса и складчатые геоструктуры прироста суши разделены поперечными СЗ окраинными литосферными разломами [Леонов, 2003], которые простираются через океан и моря (в т.ч. внутренние) на суше континента и следятся через 65-160 км. Поперечные разломы образуют СЗ глыбы коры, включающие последовательный, от океана вглубь континента, набор разновозрастных – «разноцветных», частей ряда последовательных сопряжённых продольных региональных геоструктур прироста – главным образом вулканических поясов активных окраин континента. Эти части и являются вулканогенами поясов как их обособленные звенья. По простиранию поясов вулканогены перемежаются локальными тектоническими геоструктурами типа впадин, блоков, выступов фундамента, разломов, др., а также складчатыми структурами чехла и фундамента.

На основании Концепции глыбово-клавишного строения земной коры определена для дальнейшего системного анализа цель настоящего исследования: как тектоническое строение коры обусловило возникновение Оклано-Пенжинского и Северо-Западно-Корякского орогенных окраинных эоценового и олигоценового вулканических поясов и их вулканогенов? Чем отличаются вулканогены этих поясов? Это первая цель всего системного исследования проблемы тектонического механизма орогенных поясов территории (рис. 1).



Рис. 1. Тектоническое положение вулканогенов краевых орогенных поясов северо-западного сектора СВ Азии [по Гос. геологическая карта..., 1998; Карта полезных ископаемых..., 1999; с дополнениями авторов]

1-2 – комплекс основания: 1 – палеозойская алевролито-песчаниковая формация; 2 – среднеюрская песчаниково-алевролитовая формация; 3-9 – геосинклинальные комплексы: 3 – готерив-барремский, андезитовая формация; 4 – волжско-альбский 4 – туфогенно-песчаниково-алевролитовая формация; 5 – гравелит-алевролито-песчаниковая формация;
6-7 – позднемеловой: 6 – флишоидная формация (корякская серия); 7 – вулканогенно-кремнистая формация (маметчинская свита); 8-13 – орогенный комплекс: 8 – альб-маастрихтская морская моласса; 9 – палеоцен-эоценовая вулканогенно-осадочная формация; 10 – эоценовая прибрежно-морская моласса; 11 – эоценовая андезитовая формация (велолныкская серия); 13 – неогеновая свиты); 12 – олигоценовая андезидацитовая формация (велолныкская серия); 13 – неогеновая лагунно-континентальная моласса; 14-15 – разломы: 14 – глубинные, междуформационные; 15 – локальные; 16 – границы формаций, комплексов. Цифры и буквы на схеме. Структурно-

формационные зоны: I-III. Глубинные разломы: 1 – Орловско-Каменский, 2 – Пенжинский, 3 – Понтонейский, 4 – Парапольский, 5 – Куюльско-Парапольский, 6 – Ванэтатский. Поднятия: М – Мургальское, ТМ – Таловско-Майнское, У – Учхичхильское. Прогибы: Пж – Пенжинский, Пр – Парапольский (Пусторецко-Парапольский). Вулканические орогенные пояса: ОП – Оклано-Пенжинский, С-3К – Северо-Западно-Корякский. Вулканические поля и вулканогены поясов: Окланское, Ваэтатское (Ушканьинское), Гайчавеемский вулканоген. Дополнения: 17 – разломы поперечные межглыбовые, литосферные; 18 – части глыб литосферы: воздымающиеся (а), погружающиеся (б); 19 – контур Гайчавеемского вулканогена. / Fig. 1. The tectonic position of volcanogens of the marginal orogenic belts of the northwestern sector of NE Asia [according to State geological map..., 1998; Mineral resources map..., 1999; with additions of authors] 1-2 – base complex: 1 – Paleozoic siltstone-sandstone formation; 2 – Middle Jurassic sandstone-siltstone formation; 3-9 – geosynclinal complexes: 3 – Hauteriv-Barremian, andesitic formation; 4 – Volga-Albian 4 – tufogenic-sandstone-siltstone formation; 5 – gravelite-siltstone-sandstone formation; 6-7 – Late Cretaceous: 6 – flyschoid formation (Korvak series); 7 – volcanic-siliceous formation (Mametchinsk suite); 8-13 – orogenic complex: 8 – Alb-Maastricht sea molasses; 9 – Paleocene-Eocene volcanicsedimentary formation; 10 – Eocene coastal molasses; 11 – Eocene andesitic formation (Manila, Kytymym suites); 12 – oligocene andesidacite formation (Velolynk series); 13 – Neogene lagooncontinental molasses; 14-15 – faults: 14 – deep, interformational; 15 – local; 16 – boundaries of complexes formations. Numbers and letters on the diagram. Structural-facial zones: I-III. Deep faults: 1 – Oryol-Kamensk, 2 – Penzhinsk, 3 – Pontoneysk, 4 – Parapolsk, 5 – Kuyulsk-Parapolsk, 6 – Vanetatsk. Uplifts: M-Murgalsk, TM – Talovsk-Mainsk, U – Uchichkhilsk. Troughs: P – Penzhinsk, Pr – Parapolsk (Pustoretsk-Parapolsk). Volcanic orogenic belts: OP – Oklano-Penzhinsk, S-ZK – North-West-Koryak. Volcanic fields and volcanic belts: Oklansk, Vaetatsk (Ushkanvinsk), Gaichaveemsk volcanogen. Additions: 17 – transverse interblock faults, lithospheric; 18 – parts of the lithosphere blocks: uplifting (a), sinking (b); 19 – contour of the Gaichaveem volcano.

Такое изложение обращает акцент на планетарный механизм развития земной коры и литосферы на активных окраинах континентов всего побережья Тихого океана. Возникновение и постоянное развитие Концепции делает её близкой к планетарной тектонике окраин континента, развивающихся необратимо и последовательно в одном направлении во времени благодаря последовательному образованию нормального разреза коры. При этом сильное влияние на образование разреза коры оказывают процессы вертикального движения окраин путём непрерывной гранитизации комплексов её осадочных горизонтов. Появление каналов движения вверх гранитизированных пород разреза к поверхности приводит к возникновению гранитоидных внедрений во времена орогенной тектономагматической активизации. На поверхности в орогенных поясах рассматриваемой территории это привело к умеренно кислому магматизму. Он проявлен в излиянии андезидацитовых покровов, экструзий и внедрению интрузий гранитоидов.

Общая геотектоническая позиция орогенных поясов северо-западного сектора СВ Азии

Покажем общую геологическую позицию окраинных вулканических поясов в Северо-Западном секторе Северо-Востока Азии. Это территория низовьев р. Пенжины и левобережья р. Пальматкиной. На ней происходили процессы, отражающие отмирание окраины древнего палеозойского континента. Далее, через орогенные вулканические пояса, происходит прирост новой окраины более молодыми вулканогенными и осадочными образованиями, в т. ч. орогенными поясами и молассами. И так, во времени, последовательно отмирали одни окраины, возникали новые и формировались структурно-формационные зоны (рис. 1).

Орогенный вулканизм развит двумя поясами на территории северо-западного сектора СВ Азии по северному и южному обрамлению позднемелового Корякского микроконтинента Центрально-Корякской СФЗ. Территория по южному обрамлению лежит от широты 61° Северной Камчатки по мыс Дежнёва на западной долготе около 168°. На севере континент ограничен системой рек и озёр бассейна правых притоков р. Пенжины, на юге – северным обрамлением Берингова моря. В геоморфологии территория выражена хребтами Пенжинского кряжа и Корякского нагорья с вершиной г. Ледяной. К югу система южных хребтов и долин образует выходы центральной части системы, выделенной в Корякский микроконтинент. Вся территория образует Центрально-Корякскую (Укэлаятскую) СФЗ. Южной границей этой зоны является Вывенско-Ватынский глубинный разлом. Вдоль его южного борта лежит тектонический покров. Надвиги покрова образованы обдукцией офиолитовых ватынских пород (ачайваямская и ватынская свиты). В геологии поверхности на покрове картируется миоценовый покровный, эффузивный и интрузивный вулканические комплексы Ветроваямской вулканической зоны. Они образуют миоценовый ороген на южной окраине Корякского микроконтинента Центрально-Корякской СФЗ – Ветроваямский вулканоген [Яроцкий, Чотчаев, 2018].

На южном обрамлении основания Охотско-Чукотского вулканического пояса северозападного сектора СВ Азии лежат орогенные вулканические и осадочные молассы. Их положение определено склонами поднятий основания и геосинклинальными образованиями фундамента поднятий: Мургальского, Таловско-Майнского и Учхичхильского. Этот аспект тектоники является классическим признаком процесса орогенеза.

В целом территория [Гос. геологическая карта..., 1998] является частью Кони-Тайгоносско-Корякской геосинклинальной системы. Здесь три структурно-формационных комплекса в последовательном образовании с северо-запада на юго-восток образуют Гижигинскую, Пенжинскую и Центрально-Корякскую структурно-формационные зоны (СФЗ). Они, последовательно сопрягаясь, простираются на юго-восток, будучи разделены глубинными разломами. Орогенный комплекс каждый раз возникает над региональными CB разломами СФЗ и перекрывает несогласно комплексы основания и геосинклинальные.

Гижигинская СФЗ на территории ограничена на юго-западе региональным Орловско-Каменским глубинным разломом (1). Комплексы основания здесь не обнажены, геосинклинальные образования лежат на Мургальском поднятии, склоны которого простираются на юг. Следующая к югу от Орловско-Каменского разлома Пенжинская СФЗ лежит на комплексе геосинклинальных образований позднемезозойского фундамента. На юге зоны – Таловско-Майнское поднятие, на северных склонах которого лежат неогеновые лагунноконтинентальные орогенные молассы.

От юга Гижигинской СФЗ Пенжинская СФЗ отделена окраинным орогенным эоценовым Оклано-Пенжинским вулканическим поясом (ОП). На противоположном склоне Таловско-Майнского поднятия основания орогенные молассы лежат на северном сочленении поднятия с Пенжинским прогибом, проходящим по Понтонейскому разлому (3). На южных склонах Таловско-Майнского поднятия Парапольский разлом (4) маркирует север неогеновой лагунно-континентальной молассы. Куюльско-Парапольский разлом (5) маркирует северный борт Парапольского (Пусторецко-Парапольского) прогиба (Апрелков и др., 1994). Над прогибом лежат орогенные комплексы олигоценовой андезидацитовой формации, слагающие Гайчавеемское вулканическое поле.

Орогенные олигоценовые комплексы Гайчавеемского вулканического поля образуют одноимённый вулканоген. Вулканоген ограничен с юга Ванэтатским разломом (6) который проходит по северу Учхичхильского поднятия геосинклинального основания. На северных частях поднятия Центрально-Корякской зоны вдоль Ванэтатского разлома формируется позднемеловая вулканогенно-кремнистая формация (маметчинская и эссовеемская свиты). Куюльско-Парапольский и Ванэтатский разломы «заключают» южную часть Парапольского подгоцене андезидацитового орогенного комплекса. Зажатая часть прогиба является наиболее погру-

женной на северном склоне Учхичхильского поднятия, включая весь орогенный комплекс олигоцена. И именно здесь заложена на пересечении поперечного литосферного межглыбового Омолон-Каменско-Олюторского разлома с прогибом локальная впадина, в которой и локализован орогенный вулканический комплекс.

На территории в конце эоцена-олигоцена произошла тектоно-магматическая активизация, что привело к формированию (рис. 1) Оклано-Пенжинского и Северо-Западно-Корякского вулканических орогенных поясов с проявлениями гранитоидного магматизма.

К западу от Гайчавеемского вулканогена, в 150 км к побережью Пенжинского залива, лежит крупное Уннэйваямское вулканическое поле. Это поле получило наиболее обширное изучение [Апрелков и др., 2002] и является эталонным в оценке остальной территории Северо-Западно-Корякского вулканического окраинного орогенного пояса олигоцена.

Оклано-Пенжинский эоценовый орогенный вулканический пояс

На рисунке 1 в северо-западном углу территории находится фрагмент Оклано-Пенжинского орогенного вулканического пояса. Его Окланская и Ваэтатская (Ушканьинская) площади – согласно [Карта полезных ископаемых, 1999] входят в зону эоценовой тектономагматической активизации на участке северо-западного Омолон-Каменско-Олюторского поперечного межглыбового разлома. Их эоценовая андезитовая орогенная формация лежит на готерив-барремском геосинклинальном основании южного склона Мургальского поднятия. К северо-востоку, далее от р. Ушканьи, комплекс локализуется в площади г. Плоской. Ещё далее к северо-востоку от неё, через перерыв, занятый молассой Пенжинского прогиба, андезитовый комплекс вновь появляется на площади г. Оленьей и простирается до р. Майни.

Орогенный вулканический комплекс пояса начинается на юго-западе, на суше, близ устья р. Пенжины. Его общая протяжённость, вдоль южной окраины вулканитов Охотско-Чукотского вулканического пояса, с юго-запада на северо-восток составляет более 170 км – вплоть до р. Майни. Все площади эоценового орогенного вулканизма лежат в северо-западной части правобережья Пенжинского прогиба, в верховьях и средних правых притоках р. Пенжины.

По нашей авторской интерпретации структурной карты опорного горизонта прогиба [Мороз, 1987, 2014] эта его часть разбита серией северо-западных разломов в геосинклинальном комплексе фундамента и Мургальского и Таловско-Майского поднятий (рис. 2). Так в прогибе возникла серия последовательных локальных блоков чередующихся впадин и поднятий (с юго-запада на северо-восток): Усть-Пенжинская – Первореченское – Окланская – Гильминтское – Ушканьинская – Слаутненское – Чернореченская – Налгимское. Именно этими структурами фундамента определён уровень вывода на поверхность либо погружения наложенных орогенных вулканических формаций орогенного пояса. Фактически, весь вулканический орогенный пояс вдоль юга Мургальского и далее Оклан-Гореловского поднятий является единой вулканической орогенной геоструктурой сочленения окраин Гижигинской и Пенжинской СФЗ, как тектонических зон.

Особенностью вулканических площадей Оклано-Пенжинского эоценового орогенного комплекса является его продолжение в обе стороны. Так, к западу за Омолон-Каменско-Олюторским поперечным межглыбовым разломом комплекс Усть-Пенжинской площади локально ограничен побережьем Пенжинского залива по линии устье р. Шестоковой-с. Манилы. Далее, по продолжению пояса на юго-запад, комплекс через залив выходит на его западный берег между мысами Обрывистый-Пупырь (между устьями рек Парени-Кечичма). На противоположном конце пояса, к северо-востоку за Налгимским поднятием, пояс эоценовых орогенных комплексов продолжается ещё до р. Майни на Чукотке [Апрелков и

9 (3) 2019



др., 1997]. Таким образом, протяжённость пояса достигает 300 км!

Рис. 2. Структурная карта поверхности опорного геоэлектрического горизонта Пенжинского прогиба (геосинклинальный комплекс пород) и его внутреннего строения [Мороз, 1987; Гос. геологическая карта, 1998] с изменениями и дополнениями авторов). 1 – изученная МТЗ площадь прогиба; 2 – выходы пород геосинклинального фундамента на бортах прогиба; 3 – границы Пенжинского прогиба; 4 – внутриглыбовые разломы фундамента; 5 – изолинии глубин, км. Тектонические структуры: Пенжинский прогиб. Поперечные внутриглыбовые поднятия: 2 – Налгимское, 4 – Слаутненское. Локальные впадины: 1 – Чернореченская, 3 – Кондыревская, 5 – Окланская, 7 – Усть-Пенжинская. Локальные поднятия: 6 – Гильминтское, 8 – Первореченское.

Дополнения: 6 – внутриглыбовые разломы в Кондыревской впадине и в т. ч. выходящие в поднятия СФЗ; 7 – поперечные межглыбовые разломы северо-западного – алеутского направления: П-Т-Т – Парень-Таловско-Тиличикский, О-К-О – Омолон-Каменско-Олюторский; 8 – локальные поднятия (а) и впадины (б) прогиба; 9 – направления субвертикальных движений сопредельных глыб коры (а – воздымающиеся, б – опускающиеся (опаздывающие в воздымании). Буквенные обозначения. Поднятия: М – Мургальское, Т-М – Таловско-Майнское; О-ПОВП – Оклано-Пенжинский орогенный вулканический пояс. Локальные структуры в Кондыревской впадине: Кн – Кондыревская, Ушк – Ушканьинское поднятие, ЧК – впадина Чёрный Кул.

Fig. 2. Structural map of the surface of the geoelectric reference horizon of the Penzhinsk trough (geosynclinal complex of rocks) and its internal structure [Moroz, 1987; State geological map, 1998] with changes and additions of the authors).

1 – investigated MTZ area of the trough; 2 – outcrops of rocks of the geosynclinal foundation on the sides of the trough; 3 – boundaries of the Penzhinsk trough; 4 – internal block faults of the foundation; 5 – contours of depths, km. Tectonic structures: Penzhinsk deflection. Transverse intrablock uplifts: 2 – Nalgimsk, 4 – Slautnensk. Local depressions: 1 – Chernorechensk, 3 – Kondyrevsk, 5 – Oklansk, 7 – Ust-Penzhinsk. Local uplifts: 6 – Gilmintsk, 8 – Pervorechensk.

Additions: 6 – internal block faults in the Kondyrevsk Depression, including emerging in the uplifts of the structural-facial zone; 7 – transverse interblock faults of the northwest – Aleutian direction: P-T-T – Paren-Talovsk-Tilichiksk, O-K-O – Omolon-Kamensk-Olyutorsk; 8 – local uplifts (a) and troughs (b) of the deflection; 9 – directions of subvertical movements of adjacent blocks of crust (a – uplifting, b – descending (late in uplift)). Letter designations. Uplifts: M-Murgalsk, TM – Talovsk-Maynsk; O-POVP – Oklano-Penzhinsk orogenic volcanic belt. Local structures in the Kondyrevskaya depression: Kn – Kondyrevsk, Ushk – Ushkanyinsk uplift, CK – Chernyi Kul depression.

Все эоценовые площади рассматриваются как части единого протяжённого линейного Оклано-Пенжинского орогенного вулканического пояса с локальными площадями его полей со всеми их классическими орогенными признаками тектоники и вещества. Положение пояса во внутренней тектонике геосинклинального фундамента окраины континента обусловило его блоковое деление, как и Пенжинского прогиба, особенности вещественного состава зрелой коры и наложенного орогенного комплекса. Пояс лежит в поднятой глыбе литосферы Олюторского полуострова, простирающейся от побережья на СЗ [Яроцкий, 2017]. Его часть между Омолон-Каменско-Олюторским и Олойско-Слаутненско-Ачайваямским поперечными межглыбовыми разломами геосинклинального основания выведена на поверхность чередующимися локальными поднятиями и погребёнными впадинами разного уровня.

Орогенный вулканический комплекс является единой продольной геоструктурой-линейным вулканогеном вдоль древней южной окраины континента [Krasnyi, 1975]. Этим Оклано-Пенжинский пояс и отличается от гнездового типа тектонического механизма Северо-Западно-Корякского. В этом поясе площади вулканических полей лежат в зонах поперечных межглыбовых разломов и отделены друг от друга выходами геосинклинального основания, на протяжении около 75 км. В этом типе – формирование северо-восточного простирания вулканогенов в локальных впадинах-гнёздах окраины континента.

Тип тектонического механизма Оклано-Пенжинского линейного протяжённого пояса, очевидно, более мощный своими локальными вулканическими полями, образующими протяжённый единый линейный вулканоген. Такой тип вулканогена известен на правобережье Берингова моря, на западных отрогах Корякского хребта в Чукотско-Корякском миоценовом орогенном вулканическом поясе на его юго-западном окончании в междуречье Анапки-Ветроваям. Здесь образован Ветроваямский вулканоген аналогичного линейного типа. Его миоценовый вулканический андезидацитовый покровный с диоритами комплекс заключён в Игунаваямском сводовом поднятии геосинклинального комплекса, обособленными поперечными межглыбовыми северо-западными разломами: Ребро-Анапкинским и Омолон-Каменско-Олюторским. Вулканоген образован массивами вторичных кварцитов, лежащих в чередующихся локальных блоках – впадинах и горстах. Кварциты в металлогении образуют рудные узлы с месторождениями самородной серы, золота, меди, ртути [Яроцкий, Чотчаев, 2018].

Таким образом, в Северо-Западном секторе CB Азии имеются два типа тектонического механизма возникновения орогенного вулканизма на окраинах континента: линейный и гнездовой.

Аспекты геотектоники орогенной стадии сочленения Пенжинской и Центрально-Корякской СФ3

На сочленении Пенжинской и Центрально-Корякской СФЗ лежит Уннэйваямское вулканическое поле олигоценового орогенеза Западно-Камчатско-Корякского вулканического пояса [Апрелков и др., 1984]. Название и содержание пояса заимствовано у Н.И. Филатовой и относиться к 1987 г. Оно повторено в [Гос. геологическая карта..., 1998]. Однако, С.Е. Апрелков с соавторами пишет, что соединение олигоценовых вулканитов Уннэйваямского вулканического поля (УВП) с вулканитами эоценового возраста известных под кинкильской свитой на северо-западном побережье в один пояс Камчатки, нелогично. Авторы, ссылаясь на петрохимические особенности пород велолныкской серии УВП и кинкильских пород площадей Западной Камчатки, принципиально отличают их. В нашей интерпретации это подтверждается положениями глыбово-клавишной концепции строения земной коры [Rudnick, Fountain, 1995]. Эоценовые кинкильские комплексы Западно-Камчатского вулканического комплекса образуют обширные протяжённые территории без очевидной тектонической обособленности в Западно-Камчатской СФЗ. В отличие от него, Северо-Западно-Корякский олигоценовый пояс отчётливо локализован цепочкой отдельных изолированных площадей. Площади локализованы узловыми пересечениями ортогональных глубинных СВ продольных и поперечных СЗ литосферных межглыбовых разломов – вплоть до гранитного (метаморфического) слоя коры и глубже. На глубину разломов указывают и участки выходов на поверхность орогенного олигоценового комплекса базальтовых пород, лежащих в слоях коры ниже гранитно-метаморфических (заметим, что это один из признаков вулканического орогенеза [Геотектоника.., 1976, стр. 506; Pearce, 1983]).

Велолныкские олигоценовые комплексы сформировались в условиях зрелой коры, кинкильские – характеризуют островодужные условия образования. Аспект возраста эоценовых и олигоценовых вулканитов очевиден в [Карта полезных ископаемых..., 1999], отражающей Камчатский отрезок Западно-Камчатско-Корякского пояса, именно как эоценовый, а Корякский – как олигоценовый, что лежит и в тектонике их частей. Поэтому считаем Корякский отрезок Северо-Западно-Корякским вулканическим окраинным поясом, включая в него и оценку его как показателя состояния зрелой земной коры окраины Корякского микроконтинента. Таким образом, породы олигоценовой формации становятся предметом исследования орогенной стадии северной окраины Центрально-Корякской СФЗ. Здесь Уннэйваямская синклинорная структура Северо-Западно-Корякского орогенного пояса представляет собой погруженный блок континентальной коры. Он отразил континентальный склон с интенсивно смятой чешуйчато-складчатой структурой. На северном склоне блока определились в палеогеновое время локальные Ичигин-Уннэйваямская вулкано-тектоническая депрессия и Айнаветкинское плутоногенное поднятие.

Айнаветкинское поднятие фундамента Центрально-Корякской СФЗ является предпосылкой формирования вулканизма в орогенную стадию – для него характерно широкое развитие разломов. Оба этих факта являются признаком развивавшихся на его северо-западном склоне в олигоцене именно орогенных формаций. Заметим, что эти признаки характерны и для следующего на востоке – Гайчавеемского вулканогена. Этот вулканоген лежит в поясе в 150 км к северо-востоку от Уннэйваямского вулканогена. Он расположен на северо-западном склоне Учхичхильского поднятия фундамента Центрально-Корякской СФЗ. Он лежит в локальной впадине геосинклинального фундамента на пересечении поперечного межглыбового Омолон-Каменско-Олюторского разлома и сочленения Пусторецко-Парапольского прогиба с окраинной Центрально-Корякской СФЗ.

Продолжение исследования тектонического положения вулканогенов Северо-Западно-Корякского окраинного орогенного пояса приводит к следующему вулканогену – Пальматкинскому, расположенному в 150 км к СВ от Гайчавеемского вулканогена. Его положение связано с Ваежским поднятием, которое маркируется выходами мялекасынской и маметчинской свит (валанжин), а также пекульнейской свиты (апт-альб). На восточных склонах Ваежского поднятия в бассейне верховий р. Пальматкиной лежит Пальматкинский вулканоген, образованный выходами орогенных фаций олигоцена (велолныкская серия) Северо-Западно-Корякского пояса. Орогенный комплекс лежит в локальной впадине, аналогичной Уннэйваямской и Гайчавеемской. Ранее подробно вулканический пояс и его вулканогены рассмотрены в [Яроцкий, Чотчаев, 2018].

Сателлиты вулканогенов Северо-Западно-Корякского орогенного пояса на северном борту Пусторецко-Парапольского прогиба

Особым аспектом связи орогенных вулканических формаций с поднятиями геосинклинального фундамента являются небольшие выходы вулканитов велолныкской серии вдоль южного борта Пенжинской СФЗ [Карта полезных..., 1999; Гос. геолоическая карта..., 1998, Лист Р-59-XII]. Через Парапольский прогиб, выполненный неогеновой лагунно-континентальной молассой, в долине низовьев р. Пальматкиной картируются площади выходов олигоценовой андезидацитовой орогенной формации. Эти площади небольшие (первые десятки кв. км) лежат к СЗ от каждого из трёх вулканогенов Северо-Западно-Корякского пояса: Уннэйваямского (60 км, г. Мигитунуп), Гайчаваямского (в 60 км от г. Яньягинан) и Пальматкинского (в 50 км от г. Пальматкина). Площади называются, соответственно, Велолныкская, Усть-Энычаваямская и Усть-Импенвеемская и названы сателлитами.

Велолныкская площадь орогенного велолныкского комплекса простирается от южных склонов Белоголовско-Шелиховского поднятия до середины Пенжинского залива, Усть-Эныгчаваямская и Усть-Импевеемская площади расположены на южных склонах Таловско-Майнского поднятия. Все три площади в большей степени скрыты орогеновой неогеновой лагунно-континентальной молассой, перекрытой четвертичными отложениями и лишь более ярко намечаются в магнитном поле. Площади названы нами сателлитами как наиболее вероятные родственные трём вулканогенам пояса. Поэтому остаётся определить их тектонические аспекты возникновения. Все три сателлита могут рассматриваться как последняя вспышка дериватов на периферии вертикальных сквозькоровых магматических каналов вулканической активизации пояса. Детальные геологические работы на них по-кажут полный состав орогенного комплекса. Тем не менее, сателлиты лежат на глубинных литосферных разломах с достижением базальтового слоя коры. Это возможно увидеть только в рамках глыбово-клавишной концепции.

Согласно авторским углублениям концепции установлен важный элемент тектоники глыб. Глыбы испытывают чередующиеся поднятия и опускания. В горизонтах их разрезов возникают наиболее напряжённые места складчатости: замки и кили складок. Через них проходят субвертикальные продольно-осевые СЗ литосферные разломы глыб. Такой разлом, под названием Хаилинский, выделен и показан на территории Хаилинского высокомагнитудного сейсмического центра близ с. Хаилино. Этот разлом прослежен по геолого-геофизическим данным от него на СЗ до Усть-Энычаваямского сателлита. Все три сателлита лежат на оси аналогичных продольно-осевых внутриглыбовых разломов. Пересечение таких разломов с окраиной приведёт к становлению сквозькорового рудного столба. Предложенное тектоническое решение проблемы положения сателлитов – важное свидетельство целесообразности глыбово-клавишной концепции.

Таким образом, определены площади выходов орогенных вулканитов андезидацитовой формации Северо-Западно-Корякского олигоценового вулканического пояса, как северной тектонической окраины Центрально-Корякской СФЗ.

Территория положения орогенных фаций геологического разреза вулканогенов Северо-Западно-Корякского орогенного пояса

Территория определена в построениях Концепции глыбово-клавишной структуры земной коры. Она лежит между двумя поперечными региональными северо-западными литосферными разломами, заключающими погружённую глыбу литосферы с её геоструктурами позднемелового и кайнозойского периодов последовательного развития СФЗ окраин континента. На окраине возникают орогенные окраинные вулканические пояса, сопровождаемые орогенными вулканитами и морскими, лагунными молассами. Молассы образуют прогибы Пенжинский и Парапольский. На западе территорию пересекает длительно живущий Парень-Таловско-Тиличикский поперечный межглыбовый литосферный разлом. На окраине Пенжинской СФЗ, на южных склонах Таловско-Майнского позднемелового поднятия основания, также возникают условия локализации магматизма олигоценовой тектоно-магматической активизации в сателлитах – формируется олигоценовая андезидацитовая формация. Условия проявления и локализации пород определены зоной поперечного межглыбового разлома в пересечении основания Парапольского прогиба. Прогиб возник на окраинах Пенжинской и Центрально-Корякской СФЗ над Куюльско-Парапольским глубинным продольным разломом. В месте пересечения Куюльско-Парапольского и Омолон-Каменско-Олюторского разломов в коре, и особо в её гранитном слое, возникает локальная впадина глубиной около 1 км и до 8 км [Мороз, 1987; Яроцкий, 2018]. Впадина лежит в геосинклинальных комплексах прогиба и его метаморфического (кристаллического) основания – слоёв верхней части земной коры. Образуется столб давления из гранитизированной коры вверх магматического вещества. Вещество локализуется в локальной впадине породами андезидацитового комплекса по многочисленным трещинам в виде экструзий и интрузий. Среди последних – крупнейшая на СВ Азии Мигитунупская интрузия гранитов в Уннэйваямском вулканогене.

Гайчавеемский вулканоген (рис. 1) является полным геологическим и тектоническим аналогом Уннэйваямского. Орогенная вулканическая андезидацитовая формация также выполняет локальную впадину в геосинклинальном комплексе фундамента Центрально-Корякской СФЗ. Геоморфологически вулканоген идентичен Уннэйваямскому. Локальная впадина образована в месте пересечения южного борта Парапольского прогиба, лежащего на Ванэтатском разломе, и поперечного межглыбового Омолон-Каменско-Олюторского глубинного разлома северо-западного простирания. В образовавшуюся локальную впадину в недрился орогенный комплекс с классическим составом и гранитной Инвалопинонской интрузией. Мощность комплекса 550 м [Гос. геологическая карта..., 1998]. К северу от вулканического орогена лежит лагунно-континентальная моласса, покрывавшая Парапольский прогиб. Комплекс лежит на северных склонах Учхичхильского поднятия позднемелового геосинклинального комплекса. Это поднятие на севере имеет локальное Ваежское поднятие, слившееся с Таловско-Майнским поднятием.

Вулканоген представлен площадью распространения орогенных вулканитов велолныкской серии олигоцена, аналогичным Уннэйваямскому. Субвулканические фации – тела базальтов, андезитов, дацитов, риолитов, риодацитов [Irvine, Baragar, 1971]. Интрузивные породы – диориты, гранодиориты, гранодиорит-порфиры, граниты, андезибазальты. Базальты являются характерным признаком орогенеза, когда в дополнение к андезидацитовому комплексу примешивается «базальтовая магма более глубинного происхождения» [Тектоника..., 1976, стр. 506].

Система орогенного вулканизма поясов активных окраин континента Северо-Западного сектора СВ Азии, их металлогения

Орогенная вулканическая стадия на южной активной древней континентальной окраине выражена в последовательной во времени вулканической деятельности, как завершения на ней тектоно-магматической активизации. Активизация происходила в условиях интенсивной разломной тектоники с выносом на поверхность компонентов андезидацитового вулканизма. Вынос кислых и умеренно кислых фаций орогенного вулканического комплекса эоцен-олигоцена в орогенных вулканических поясах в северо-западном секторе CB Азии обусловил вынос и отложение рудоносных ассоциаций. Именно этот аспект орогенного вулканизма является одной из главных его функций [Dosseto et al., 2003].

В эоценовом вулканическом комплексе (на севере Ванэтатское (Ушканьинское) поле) Оклано-Пенжинского пояса известно рудное и россыпное золото. Оно ассоциирует с интрузиями гранодиорит-порфиров, кварцевыми диоритами, гранитами. В орогенных олигоценовых комплексах Северо-Западно-Корякского орогенного пояса известны многочисленные рудные месторождения и проявления серебра Уннэйваямского, Гайчавеемского и Пальматкинского вулканогенов. Проявления в связи с гранитоидными интрузиями олигоцена. На южных обрамлениях названных вулканогенов Северо-Западно-Корякского пояса в образованиях геосинклинального фундамента Центрально-Корякской СФЗ (верхнемеловые корякская, манильская и эссовеемская свиты) формируются руды месторождений олова, ртути. К югу от Северо-Западно-Корякского орогена, на среднегорьях запада Корякского хребта, расположен крупнейший по площади на территории северо-восточной Корякии Ветровеемский вулканоген миоцена. Он является западным окончанием Чукотско-Корякского орогенного вулканического пояса миоцена на границе Центрально-Корякской и Олюторской СФЗ. Ветроваямский вулканоген лежит на Ильпинском своде геосинклинального фундамента (нижнемеловая ачайваямская свита, палеоцен-олигоценовая ивтыгинская, иночвиваямская свиты и ильпинская серия). Вулканогенный орогенный комплекс представлен группой кислых покровных и субвулканических фаций андезитов и андезибазальтов, их кислых экструзий и диоритовых интрузий. Для комплекса характерна, как правило, базальтовая магма более глубинного происхождения – яркий признак орогенного вулканизма. Ветроваямский вулканоген площадью около 6000 км² является крупным рудным районом Олюторской СФЗ с известным рядом месторождений самородной серы вулканического генезиса, эпитермального золота, серебра, меди, ртути [Яроцкий, Чотчаев, 2018].

К востоку от Ветроваямского вулканогена в Чукотско-Корякском орогенном вулканическом поясе миоцена лежат последовательно вулканогены Апукваямский, Пахачинско-Апукский, Хатырский, Талакайрхинский, Беринговский. Для всех них характерны однотипные: андезидацитовая формация, покровный и субвулканический состав фаций, диоритовые и гранодиоритовые интрузии. Для пород площадей обрамления орогенных вулканических фаций этого пояса, в целом, характерны проявления золота, меди, свинца, ртути, марганца.

Признаки закономерных структурных связей элементов системы «тектоника-орогенный вулканизм» территории северо-западного сектора СВ Азии

Системным исследованием элементов тектонических систем окраинных орогенных вулканических поясов показано, что для совокупности этих геоструктур на Северо-Западном секторе СВ Азии характерно:

 сопряжение орогенных наземных вулканических поясов и орогенных моласс морских, прибрежно-морских, лагунно-континентальных;

 вулканические орогенные пояса мигрируют с северо-запада на юго-восток, маркируя завершение развития активной окраины континента;

 вулканические орогенные пояса сопряжены с поднятиями осадочно-вулканогенного геосинклинального фундамента;

 в Северо-Западно-Корякском орогенном вулканическом поясе олигоцена разобщёнными выходами геосинклинального фундамента его звенья образуют изолированные вулканогены гнездового типа;

- вулканогены Северо-Западно-Корякского орогенного пояса локализованы в локаль-

ных впадинах геосинклинального разреза Центрально-Корякской СФЗ, образованных пересечениями Парапольского (Пусторецко-Парапольского) прогиба поперечными межглыбовыми северо-западными литосферными разломами;

 мощность олигоценовой андезидацитовой формации велолныкской серии Северо-Западно-Корякского пояса составляет 500-1000 м и определяется глубиной локальной впадины в кровле геосинклинального комплекса и метаморфического кристаллического фундамента Центрально-Корякской структурно-формационной зоны [Engebretson et al., 1985];

– для вулканогенов Северо-Западно-Корякского пояса характерен однотипный состав орогенной андезидацитовой формации с серебряной рудной минерализацией с аномально высокими (вплоть до ураганных) содержаниями серебра, при незначительной примеси золота, ртути, мышьяка. Во вмещающих терригенных геосинклинальных комплексах обрамления юга вулканогена характерна оловорудная и россыпная минерализация;

 по совокупности тектонических и минерагенических факторов вулканогены Северо-Западно-Корякского орогенного пояса олигоцена рассматриваются как сереброрудная с оловом металлогеническая зона, образованная их рудными районами;

– в Оклано-Пенжинском едином по простиранию орогенном вулканическом поясе зоцена вулканические поля андезитовой формации образуют протяжённую полосу чередующихся локальных поднятий и впадин геосинклинального комплекса – это линейный тип вулканогенов вдоль южной окраины Гижигинской СФЗ.

Орогенный вулканизм на территории северо-западного сектора CB Азии ярко отражает историю геологического развития на южной окраине Охотско-Чукотского вулканического пояса. Орогенный вулканизм неизбежно сопряжён с орогенными молассами различного происхождения, как неизбежный элемент развития окраины. Орогенный вулканизм сопряжён с важными аспектами тектоники и магматизма, создавшими условия формирования минерагенических таксонов золота, серебра, олова. Магматизм тектоно-магматической активизации обусловил образование металлогенических площадей вулканогенов с их адекватными рудными районами. На примерах орогенных вулканических поясов эоцена и олигоцена видна роль геотектонических и металлогенических аспектов глыбово-клавишной структуры земной коры активных окраин континента. В этой структуре проявлены элементы системы «тектоника-орогенный вулканизм-металлогения», установление структурных связей между которыми открывает общую целостность системы.

Исследование орогенных геоструктур на методической основе глыбово-клавишной структуры земной коры (литосферы) показывает эффективность её положений в решении задач тектоники и минерагении орогенных структур. Орогенный процесс является неизбежным и естественным этапом в развитии земной коры суши. При значительном многообразии орогенеза безусловными его факторами являются тектонические и вулканические элементы орогенных систем.

Заключение

Общую геотектоническую схему развития окраинных (краевых) вулканических орогенных поясов Северо-Запада СВ Азии представляем в следующем виде.

Территория окраины суши континента расчленена системой глубинных литосферных разломов подавляюще диагональной планетарной сети. Её северо-восточные разломы определили северо-восточную геоструктурную конфигурацию окраин в разное геологическое время. Одновременно в литосфере окраин заложены северо-западные глубинные разломы, поперечные северо-восточным геоструктурам. Тем самым, разделенные на части, северо-восточные геоструктуры активных и пассивных окраин испытывают интенсивные вертикальные движения. Это привело к прерывистости процессов осадкообразования вдоль протяжённой единой региональной геоструктуры окраины. Так возникла продольная зональность характеристик вещества с полезными ископаемыми и разным возрастом осадков. Таким образом, в окраинных вулканических поясах возникли вулканические разобщённые поля вулканогенов единого пояса.

В Северо-Западно-Корякском вулканическом поясе орогенные образования видны в классическом Уннэйваямском гнездовом вулканогене. Его типовой Уннэйваямский андезидашитовый комплекс локализован в локальной впалине геосинклинального основания Центрально-Корякской СФЗ. Впадина глубиной около 1 км возникла в месте пересечения Парапольского (Путорецко-Парапольского) прогиба и поперечного межглыбового литосферного Омолон-Каменско-Олюторского глубинного разлома. Она прослежена и на глубину в гранитный слой коры. В месте пересечения образовался канал, по нему из гранитного (метаморфического) слоя коры с глубины 8 км [Мороз, 1987] поднимается вещество и растворы, образующие рудные столбы. Локальная впадина заполнена андезидацитовыми породами с кислыми экструзивами и гранитными телами. Благодаря положению впадины на склонах поднятия, породы комплекса остывают в условиях интенсивной трещиноватости. Насыщенность комплекса экструзивно-интрузивными телами и их корнями, в целом, площадь их распространения на поверхности отражается отрицательным гравитационым полем. Глубинные породы несут рудную нагрузку – подавляюще серебряную орогенного комплекса, а их растворы отложили оловорудные ассоциации в породах вулканического покрова. Тектоно-магматическая активизация максимально проявлена в рудоносных столбах локальных впадин на окраине Центрально-Корякской СФЗ. Вместе с тем, на северной окраине Парапольской впадины, пересечённой продольно-осевым глубинным внутриглыбовым разломом Олюторского п-ова образовались сателлитные орогенные вулканические поля. Они также олигоценового возраста и идентичны по составу вулканогенам окраин. Вместе с тем, видимо, малая мощность их рудоносных процессов может не создала аналогичного рудоносного столба (возможно, что дело в детальности изучения). Тем не менее, вулканическая составляющая орогенеза пород вполне видима. Аналогичным является механизм образования для вулканических полей линейного вулканогена Оклано-Пенжинского орогенного пояса.

Орогенные стадии тектоно-магматической активизации всегда приводят к сюрпризам тектоники и металлогении, что делает их достойными глубокого системного исследования.

Литература

1. Апрелков С.Е., Богдан П.С., Попруженко С.В. Палеовулканоструктуры Уннэйваямского поля в Корякском нагорье и связь с ними оруденения /по геолого-геофизическим данным // Тихоокеанская геология. – 2002. – Т. 21. № 5. – С. 51-61.

2. Апрелков С.Е., Декина Г.И., Попруженко С.В. Особенности геологического строения Корякского нагорья и бассейна р. Пенжины // Тихоокеанская геология. – 1997. – Т. 16. №2. – С. 46-57.

3. Апрелков С.Е., Попруженко С.В. Особенности глубинного строения Восточно-Камчатского вулканического пояса // Тихоокеан. Геология. – 1984. – № 3. – С. 68-73.

4. Буш В. А. Трансконтинентальные линеаменты и проблемы мобилизма // Геотектоника. – М.: Наука, 1983. – № 4. – С. 14-25.

5. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:200000. Серия Еропольская. Лист P-58-XI (Оклан). Серия Корякская. Листы P-58-XII (Слаутное), P-58-XVIII (р. Пальматкина), P-59-XII (р. Эссовеем). Объяснительная записка. – М. – 1998. – 160 с.

6. Карта полезных ископаемых Камчатской области м-ба 1:500000. Листы 2-8, 11. Ред. Литвинов А.Ф., Патока М.Г., Марковский Б.А. Редакторы-составители Фролов Ю.Ф. и др. – СПб.: Карт. фабрика ВСЕГЕИ, 1999. – 19 л.

7. Красный Л.И. Геологическое строение северо-западной части Тихоокеанского подвижного пояса. – М.: Недра, 1966. – 516 с.

8. Леонов В.Л. Поперечные структуры и их влияние на развитие четвертичного вулканизма // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин севера Пацифики. Материалы

Всероссийского совещания, посвящённого 90-летию академика Н. А. Шило. (XII год. Собрание СВотделения ВМО) Магадан.: 3-6.06.2003 г. – 2003. – Т. 3. – С. 158-162.

9. Лобковский Л.И., Баранов Б.В. Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах. – М.: Наука, 1984. – Т. 275. № 4. – С. 843-847.

10. Масуренков Ю.П. Тектоническое положение и краткая история развития вулканов Восточной Камчатки // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х томах. – М.: Наука, 1991. – Т. 2. – С. 8-13.

11. Мороз Ю. Ф. Глубинное строение юго-западной части Корякского нагорья // Советская геология. – 1987. – № 5. – С. 118-123.

12. Мороз Ю. Ф., Самойлова О. М., Мороз Т. А. Глубинное строение побережья северной Камчатки по геофизическим данным // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». – Петропавловск-Камчатский. – 2014. – С. 205-212.

13. Тектоника континентов и океанов (терминологический справочник). – Хабаровск. – 1976. – 511 с.

14. Яроцкий Г.П. Глыбово-клавишная структура литосферы активной окраины континента на СВ Азии. Корякско-Камчатский регион // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №2. – С. 135-151.

15. Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Ветроваямский вулканоген и его рудный район, Юго-Запад Юго-Восточно-Корякского пояса // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 1. – С. 79-92.

16. Dosseto A., Bourdon B., Joron J.-L., Dupre B. U-Th-Pa-Ra study of the Kamchatka arc: New constraints on the genesis of arc lavas // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2003. – Vol. 67. No. 15. – Pp. 2857-2877.

17. Engebretson D, Cox A., and Gordon R.G. Relative motions between oceanic and

continental plates in the northern Pacific basin // Spec. Pap. Geol. Soc. Am., 206. – 1985. – Pp. 1-59.

18. Irvine T.N. and Baragar W.R. A. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. // Can. J. Earth Sci. – 1971. – No. 8 – Pp. 523-548.

19. Krasnyi M.L. Anomalous Magnetic Field of the Sea of Japan Basin in Geomagnetic Field of Marginal Seas of the Northwestern Pacific and its Correlation with Geological Structure. – Yuzhno-Sakhalinsk. – 1975. – Pp. 34-62.

20. Pearce J.A. Role of the subcontinental lithosphere in magma genesis atactive continental margins // Continental basalts and mantle xenoliths, Nantwich: Eds. Hawkesworth C.J., Norry M.J. Sica Publ. – 1983. – Pp. 230-249.

21. Rudnick R.L. and Fountain D.M. Nature and Composition of the Continental Crust: a Lower Crustal Perspective. // Rev. Geophys. – 1995. – No. 33. – Pp. 267-309.

References

1. Aprelkov S.E., Bogdan P.S., Popruzhenko S.V. Paleovolcanostructures of the Unneivayama field in the Koryak upland and mineralization relationship with them according to geological and geophysical data. Pacific Geology. 2002. Vol. 21. No. 5. pp. 51–61. (In Russ.)

2. Aprelkov S.E., Dekina G.I., Popruzhenko S.V. Features of the geological structure of the Koryak Upland and the basin of river Penzhins. Pacific geology. 1997. Vol. 16. No. 2. pp. 46–57. (In Russ.)

3. Aprelkov S.E., Popruzhenko S.V. Features of the deep structure of the East Kamchatka volcanic belt. Pacific. Geology. 1984. No. 3. pp. 68–73. (In Russ.)

4. Bush V.A. Transcontinental lineaments and problems of mobilism. Geotectonics. M. Nauka, 1983. No. 4. pp. 14–25. (In Russ.)

5. State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200 000. Series Eropolskaya. Sheet P-58-XI (Oklan). Series Koryak. Sheets P-58-XII (Slautnoe), P-58-XVIII (r. Palmatkina), P-59-XII (r. Essoveem). Explanatory note. M. 1998. 160 p. (In Russ.)

6. Map of mineral resources of the Kamchatka region in a scale 1: 500000 Sheets 2-8, 11. Ed. Litvinov A.F., Patoka M.G., Markovskii B.A. Editors-compilers Frolov Yu.F. et al. - St. Petersburg, Map factory VSEGEI, 1999. 19 p. (In Russ.)

7. Krasnyi L.I. The geological structure of the northwestern part of the Pacific mobile belt. M. Nedra, 1966. 516 p. (In Russ.)

8. Leonov V.L. Transverse structures and their influence on the development of Quaternary volcanism. Geodynamics, magmatism and mineralogeny of the continental margins of the north of Pacific. Materials of

the All-Russian meeting dedicated to the 90th anniversary of Academician N.A. Shilo. (XII year. Meeting of the WMO NE Division) Magadan. June 3-6.06.2003. 2003. Vol. 3. pp. 158-162. (In Russ.)

9. Lobkovskii L.I., Baranov B.V. Keyboard model of strong earthquakes in island arcs and active continental margins. M. Nauka, 1984. Vol. 275. No. 4. pp. 843-847. (In Russ.)

10. Masurenkov Yu.P. Tectonic position and a brief history of the development of volcanoes in East Kamchatka. Active volcanoes of Kamchatka. In 2 volumes. M. Nauka, 1991. Vol. 2. pp. 8–13.

11. Moroz Yu.F. The deep structure of the southwestern part of the Koryak upland. Soviet geology. 1987. No. 5. pp. 118-123. (In Russ.)

12. Moroz Yu.F., Samoilova O.M., Moroz T.A. The deep structure of the coast of northern Kamchatka according to geophysical data. Materials of the annual conference dedicated to the Day of the volcanologist "Volcanism and related processes". Petropavlovsk-Kamchatsky. 2014. pp. 205-212. (In Russ.)

13. Tectonics of continents and oceans (terminological reference book). Khabarovsk. 1976. 511 p. (In Russ.)

14. Yarotskii G.P. The block-key structure of the lithosphere of the active margin of the continent in NE Asia. Koryak-Kamchatka region. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2017. No. 2. pp. 135-151. (In Russ.)

15. Yarotskii G.P., Chotchaev Kh.O. Vetrovayaamsk volcanogen and its ore region, South-West of the South-East-Koryak belt. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2018. No. 1. pp. 79-92. (In Russ.)

16. Dosseto A., Bourdon B., Joron J.-L., Dupre B. U-Th-Pa-Ra study of the Kamchatka arc: New constraints on the genesis of arc lavas. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2003. Vol. 67. No. 15. pp. 2857-2877.

17. Engebretson D, Cox A., and Gordon R.G. Relative motions between oceanic and

continental plates in the northern Pacific basin. Spec. Pap. Geol. Soc. Am., 206. 1985. pp. 1-59.

18. Irvine T.N. and Baragar W.R.A. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. Can. J. Earth Sci. 1971. No. 8. pp. 523-548.

19. Krasnyi M.L. Anomalous Magnetic Field of the Sea of Japan Basin in Geomagnetic Field of Marginal Seas of the Northwestern Pacific and its Correlation with Geological Structure. Yuzhno-Sakhalinsk. 1975. pp. 34-62.

20. Pearce J.A. Role of the subcontinental lithosphere in magma genesis atactive continental margins. Continental basalts and mantle xenoliths, Nantwich, Sica Publ. 1983. pp. 230-249.

21. Rudnick R.L. and Fountain D.M. Nature and Composition of the Continental Crust: a Lower Crustal Perspective. Rev. Geophys. 1995. No.33. pp. 267-309.
= ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ =

УДК 622.511: 556.3: 550.42 DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36478</u>

Оригинальная статья

Изменение гидрогеохимических условий в Восточном Донбассе за 25 лет

А.И. Гавришин, д. г.-м. н., проф.

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: 9 сентября 2019, доработана: 23 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Многие десятилетия угледобывающая промышленность оказывает интенсивное негативное влияние на все компоненты окружающей среды в Восточном Донбассе. Одним из наиболее мощных факторов преобразования гидрогеохимических условий являются шахтные воды являющиеся объектом исследования. Особенно интенсивные изменения концентраций макрокомпонентов в шахтных водах произошли в последние 25 лет поле массовой ликвидации угольных шахт в регионе. Методы исследования. Сопоставление концентраций компонентов производится с предельно-допустимой концентрацией (ПДК) для вод хозяйственно питьевого и культурно бытового водопользования выполнено по Гигиеническим нормативам, с использованием статистических методов оценки параметров. Результаты работы. Для всех лимитируемых макрокомпонентов обнаружено превышение ПДК вод хозяйственнопитьевого и культурно-бытового водопользования по средним концентрациям, а для некоторых компонентов даже по минимальным значениям. По средним концентрациям 20-ти микроэлементов превышение ПДК обнаружено в 53-х% компонентов, по максимальным концентрациям в 73%. Средние концентрации по ряду элементов в десятки раз превышают соответствующие ПДК, а по максимальным концентрациям превышение составляет сотни раз. В грунтовых и поверхностных водах произошло увеличение средних, медианных и максимальных концентраций макрокомпонентов в 1,2-2,0 раза. По средним концентрациям превышение ПДК отмечено для 67%, а по максимальным – для 83-100% лимитируемых компонентов. После ликвидации угольных шахт, произошло резкое усилении процессов окисления сульфидов и серы, содержащихся в углях и вмещающих горных породах, и растворение сульфатов. Сравнение гидрогеохимических условий в Восточном Донбассе до и после массовой ликвидации угольных шахт (за 25 лет) выявило значительное ухудшение качества шахтных вод и усиление процессов загрязнения грунтовых и поверхностных вод в регионе. Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты свидетельствуют о необходимости проведения реабилитационных мер и о совершенствовании очистных технологий.

Ключевые слова: Восточный Донбасс, шахтные, грунтовые, поверхностные воды, химический состав, ликвидация шахт.

Для цитирования: Гавришин А. И. Изменение гидрогеохимических условий в Восточном Донбассе за 25 лет. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 36-46. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36478.

37

=GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36478

Original paper

Changing the Hydrogeochemical Condition in the Eastern Donbass for 25 years

A.I.Gavrishin

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

Received 9 September 2019; revised 23 September 2019; accepted 24 September 2019.

Abstract: Relevance. The mining industry has had an intense negative impact on all environmental components in the East Donbass for many decades. One of the most powerful factors in the conversion of hydrogeochemical conditions is mine water, which is the subject of research. Particularly intense changes in the concentrations of macrocomponents in mine waters have occurred in the last 25 years in the field of mass liquidation of coal mines in the region. Methods. Comparison of the concentrations of the components is carried out with the maximum allowable concentration (MAC) for drinking water and domestic water used in accordance with hygienic standards, using statistical methods for evaluating the parameters. **Results.** For all the limiting macrocomponents, MAC was exceeded by the average concentration of drinking water and domestic water, and for some components even by the minimum values. For average concentrations of 20 microelements, MAC exceedance was found in 53% of the components, and for maximum concentrations of 73%. The average concentrations for a number of elements are tens of times higher than the corresponding MACs, and for the maximum concentrations, the exceedance is hundreds of times. In ground and surface waters, an increase in the average, median and maximum concentrations of macrocomponents was 1.2-2.0 times. In average concentrations, MAC exceedance was noted for 67%, and in maximum concentrations - for 83-100% of limited components. After the liquidation of coal mines, there was a sharp increase in the oxidation processes of sulfides and sulfur contained in coals and host rocks, and the dissolution of sulfates. A comparison of the hydrogeochemical conditions in the East Donbass before and after the massive liquidation of coal mines (over 25 years) revealed a significant deterioration in the quality of mine water and an increase in the pollution of ground and surface water in the region. Practical significance. The results obtained in the work indicate the need for rehabilitation measures and the improvement of treatment technologies.

Keywords: Eastern Donbass, mine, groundwater, surface water, chemical composition, elimination of mines.

For citation: Gavrishin A.I. Changing the Hydrogeochemical Condition in the Eastern Donbass for 25 years. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 36-46. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36478.

Введение

Угледобывающая и углеперерабатывающая промышленности оказывают существенное негативное влияние на воздушную, водную, геологическую, биологическую и социальные среды в Восточном Донбассе. В регионе формируются мощные потоки загрязнения окружающей среды, происходит проседание земной поверхности, осушение массивов горных пород, деформация зданий, сооружений и коммуникаций и многие другие негативные явления [Гавришин, 2018; Грязев и др., 2018; Chen, 2014; Neidell et. al., 2019; Wang et al., 2015]. При реструктуризации угольной промышленности и массовой ликвидации угольных шахт в рассматриваемом регионе еще более усилились процессы загрязнения окружающей среды, подтопления территории, техногенной трещиноватости горных пород, выделения «мертвого воздуха», разрушения производственных и жилых зданий [Гавришин, 2018; Гавришин и др., 2018; Закруткин и др., 2014, 2015; Мохов, 2012; Appelo, Postma,

9 (3) 2019

Таблица 1. / Table 1.

Средний состав шахтных, грунтовых и поверхностных вод в 2015 году (мг/л и %-моль). / The average composition of mine, ground and surface waters in 2015 (mg / l and% mol).

Вид вод / Type of water	pН	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	М	
Illowaru to / Mino waton	6.05	591	2837 +	347 +	293	267 +	966 +	5201	
maximile / white water	0,95	12	76	12	17	28	55	3301 -	
Грунтовые / Ground	7.2	472	1511 +	333 +	325	152 +	437 +	2220 +	
water	1,2	16	65	19	33	27	40	5250 +	
Поверхностные /	7.05	428	1773 +	212	267	146 +	575 +	2401	
Surface water	7,95	14	74	12	26	24	50	5401 +	
Чистые грунтовые /	7.62	289	267	288	102	40	230	1215	
Clean groundwater	7,05	26	30	44	28	18	54	1213	
Чистые поверхностные	7.09	303	304	200 153 85 50		50	1005		
/ Clear surface water	/,98	30	37	33	46	42	12	1095	

Примечание. Здесь и во всех таблицах знак «+» обозначает превышение концентраций компонентов по ПДК для вод хозяйственно- питьевого и культурно-бытового водопользования, М – минерализация. /

Note. Here and in all tables, the "+" sign marks the excess of the components concentrations according to the MPC for household drinking water and cultural and domestic water use, M is mineralization. /

2005; Gavrishin, 2018; Giulio, Jackson, 2016; Mokhov, 2012; Pfunt et al., 2016]. Это потребовало переселения части населения на безопасные территории. Особенно интенсивные изменения происходят в химическом составе вод региона [Гавришин, 2019; Закруткин и др., 2014, 2015; Gavrishin, 2018; Reshetnyak et al., 2014; Zakrutkin, Sklyarenko, 2015]. В табл. 1 приведен средний химический состав шахтных, грунтовых и поверхностных вод и указано превышение ПДК для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (знак «+») [ГН 2.1.5.1315-03, 2003]. По большинству макрокомпонентов их содержания превышают ПДК в 3-5 раз. По сравнению с чистыми водами содержания многих лимитируемых компонентов повысились в грунтовых и поверхностных водах в 4-5 раз (табл. 1).

Наиболее существенные изменения химического состава шахтных, грунтовых и поверхностных вод в Восточном Донбассе произошли под влиянием массовой ликвидации угольных шахт. В данной работе выполнен сравнительный анализ трансформации гидрогеохимических условий за последние 25 лет: первый период характеризует ситуацию в 1990 году – до ликвидации шахт, второй – после стабилизации процесса ликвидации шахт в 2015 году.

Методика исследований

Анализ гидрогеохимической информации выполнен с привлечением математико-статистических методов оценки параметров: среднего арифметического, медианы, минимального и максимального значения и стандарта (среднего квадратического отклонения). Сравнение концентраций компонентов произведено с ПДК для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования по Гигиеническим нормативам ГН 2.1.5.1315-03 [ГН 2.1.5.1315-03, 2003].

В название вод по химическому составу включаются компоненты с концентрациями более 25%-молей и располагаются в порядке увеличения концентраций.

Изменение химического состава шахтных вод

Изменение химического состава шахтных вод изучено по результатам анализа 41 пробы в 1990 г. и 40 проб в 2015 году. В таблицах 2 и 3 приведены оценки статистических параметров распределения содержаний макрокомпонентов в шахтных водах Восточного Донбасса в указанные годы. Медианные значения изменились незначительно (несколько увеличились для концентраций HCO₃, SO₄, Mg и уменьшились для Cl и Na), но существенно выросла изменчивость концентраций (стандарт) за счет высоких максимальных значений, особенно для SO₄, Mg, M. Для всех лимитируемых компонентов обнаружено превышение ПДК вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования по средним концентрациям, а для некоторых компонентов даже по минимальным значениям (табл. 2, 3).

Изменения концентраций макрокомпонентов в шахтных водах до и после массовой ликвидации угольных шахт (через 25 лет) наиболее наглядно представлены в таблице 4. По общему составу воды из хлоридно-сульфатных натриевых преобразовались в сульфатные магниево-натриевые. В 1,5-2 раза выросли концентрации SO₄, Mg и величина M, уменьшились концентрация Cl и величина pH. Особенно интенсивно в 9,4 раза выросла концентрация Fe. Все это свидетельствует о резком усилении процессов окисления сульфидов и серы, содержащихся в углях и вмещающих горных породах, и растворении сульфатов, как

Таблица 2. / Table 2.

	ne enemiear co	mposition of														
Показатели / Indicators	Среднее / The average	Медиана / Median	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Стандарт / Standard											
pH	7,5	7,6	3,0 +	8,1	0,99											
HCO ₃	580	500	0	2086	362											
SO ₄	1700 +	1548	585 +	4915 +	869											
Cl	730 +	451	142	3122 +	639											
Са	205	190	49	761	131											
Mg	137 +	121	18	291 +	61											
Na	1035 +	929	292 +	2827 +	526											
М	4390 +	4061	2254 +	9621 +	1565											

Химический состав шахтных вод в 1990 г. (мг/л) / The chemical composition of mine waters in 1990 (mg/l) /

Таблица 3. / Table 3.

Химический состав шахтных вод в 2015 г. (мг/л) / The chemical composition of mine waters in 2015 (mg/l)

Компонент / Component	Среднее / The average	Медиана / Median	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Стандарт / Standard
pН	6,95	7,04	3,67 +	9,04 +	0,92
HCO ₃	591	587	6	1244	290
SO ₄	2837 +	2058	607 +	12084 +	2178
Cl	347 +	214	10	1897 +	333
Са	293	296	10	556	127
Mg	267 +	216	6	1581 +	262
Na	966 +	518	62	2116 +	465
М	5301 +	4516	1624 +	17496 +	3171

9 (3) 2019

следствие ликвидации угольных шахт [Гавришин, 2018; Bazhin et al., 2016; Gavrishin, 2018; Mish et al., 2016].

Таблица 4. / Table 4.

Средний химический состав шахтных вод (мг/л и %-моли). / The average chemical composition of mine waters (mg/l and% mol).

Период / Period	pН	HCO ₃	SO_4	Cl	Са	Mg	Na	Fe	М
1000 507	7.5	580	1700	730	205	137	1035	26	4200
1990 год	/,3	15	54	31	15	17	68	5,0	4390
2015 797	6.0	591	2837	347	293	267	966	2.4	5201
201310Д	0,9	12	76	12	17	28	55	3,4	5501

По результатам анализа состава шахтных вод в 2015 году (табл. 5) выполнено сравнение концентраций микроэлементов с ПДК для вод хозяйственно-питьевого и культурнобытового водопользования. По средним концентрациям превышение ПДК обнаружено в 53% компонентов, по максимальным концентрациям в 73%.

Таблица 5. / Table 5.

	1			. 8	,
Элемент / Element	Среднее / The	Медиана / Median	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Стандарт / Standard
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
Со	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

Характеристика содержаний микроэлементов в шахтных водах в 2015 году (мг/л) / Description of trace elements in mine waters in 2015 (mg/l)

Средние концентрации по ряду элементов во много раз превышают соответствующие ПДК (например, по Fe в 100 раз, по Mn в 50, по Li в 10), а по максимальным концентрациям превышение составляет сотни раз (например, по Fe в 1300, по Mn в 400, по Al в 520, по Be в 200 раз). /

The average concentrations for a number of elements are many times higher than the corresponding MPCs (for example, for Fe by 100 times, for Mn by 50, for Li by 10), and in the maximum concentrations, the excess is hundreds of times (for example, for Fe by 1300, for Mn by 400, for Al by 520, for Be by 200 times).

Сравнение гидрогеохимических условий в Восточном Донбассе до и после массовой ликвидации угольных шахт (за 25 лет) свидетельствует о значительном ухудшении качества шахтных вод в регионе. Наиболее резко выросли концентрации SO₄, Mg, Fe и величина M, уменьшились концентрация Cl и величина pH. По микроэлементам выявлены существенные превышения ПДК для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (в десятки и сотни раз для Fe, Mn, Li, Be и др.). Все это свидетельствует о том, что шахтные воды все время являются мощным источником загрязнения природных вод в регионе [Гавришин, 2018, 2019; Закруткин и др., 2014, 2015; Gavrishin, 2018; Zakrutkin, Sklyarenko, 2015].

Изменение химического состава грунтовых вод

Изменение химического состава грунтовых вод изучено по результатам анализа 277 проб в 1990 г. и 239 проб в 2015 году. Сравнение данных таблицах 6 и 7 (приведены оценки статистических параметров распределения содержаний макрокомпонентов в грунтовых водах Восточного Донбасса в указанные годы) показывает, что произошло увеличение средних, медианных и максимальных концентраций макрокомпонентов в 1,5-2,0 раза. По средним концентрациям превышение ПДК отмечено для 67%, а по максимальным – для 100% лимитируемых компонентов.

Таблица 6. / Table 6.

Компонент / Component	Среднее / The average	Медиана / Median	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Стандарт / Standard								
pH	7,2	7,2	6,2	9,8 +	0,43								
HCO3	385	364	61	999	130								
SO4	913 +	758	69	2804 +	625								
CL	327	268	21	1679 +	265								
Ca	223	220	16	657	114								
Mg	98 +	88	10	321 +	57								
Na	365 +	325	5	1253 +	224								
М	2265 +	2016	380	5526 +	1065								

Химический состав грунтовых вод в 1990 году (мг/л). / The chemical composition of groundwater in 1990 (mg/l).

Таблица 7. / Table 7.

Компонент / Среднее / The Медиана / Минимум / Максимум / Стандарт / Component Median Minimum Maximum Standard average 7,2 7,2 6,2 8,5 0,32 pН 472 475 37 HCO₃ 1244 153 1566 +1511 5341 + SO_4 30 772 231 1690 +Cl 333 45 259 325 320 15 125 Ca 661 146 26 377 +Mg 152 +66 290 Na 437 +470 17 2435 +М 3230 +3248 1558 8756 + 1218

Химический состав грунтовых вод в 2015 г. (мг/л). / The chemical composition of groundwater in 2015 (mg/l).

9 (3) 2019

Относительно ПДК вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования для средних концентраций микроэлементов в грунтовых водах превышение отмечено в 40%, а для максимальных значений в 67% случаев (табл. 8). Средние концентрации превышают ПДК в несколько раз (Fe в 6, Mn в 6, Be в 4, Li в 2 раза), максимальные концентрации – в десятки раз (Fe в 44, Mn в 38, Al в 16, Be в 10 раз).

Таблица 8. / Table 8.

Элемент / Element	Среднее / The average	Медиана / Median	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Стандарт / Standard
Al	0,2 +	0,07	0,01	2,34 +	0,41
Be	0,0007 +	0,0007	0,0001	0,0029 +	0,0006
Fe	3,13 +	1,35	0,05	21,7 +	4,7
Cd	0,001 +	0,0004	0,0001	0,015 +	0,0023
К	14,8	10,3	0,4	68,8 +	15,3
Со	0,002	0,001	0,001	0,021	0,003
Li	0,06 +	0,05	0,01	0,3 +	0,05
Cu	0,004	0,001	0,001	0,047	0,008
Mn	0,61 +	0,27	0,001	3,84 +	0,93
Ni	0,002	0,001	0,001	0,025 +	0,004
Pb	0,001	0,001	0,001	0,003	0,0003
Se	0,016 +	0,007	0,005	0,072 +	0,017
Sr	3,1	2,7	0,07	11,0 +	2,24
Cr	0,002 -	0,001	0,001	0,029	0,004
Zn	0,08 -	0,006	0,005	0,39	0,08

Характеристика содержаний микроэлементов в грунтовых водах в 2015 году (мг/л). / Description of trace elements in groundwater in 2015 (mg/l).

Все изложенные факты свидетельствуют об усилении процессов загрязнения грунтовых вод в Восточном Донбассе после массовой ликвидации угольных шахт.

Изменение химического состава поверхностных вод

Качество химического состава поверхностных вод изучено по результатам анализа 100 проб в 2015 году. В среднем по составу поверхностные воды близки к грунтовым (табл. 1, 7 и 9). Превышение ПДК вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования для средних концентраций макрокомпонентов составляет 67% от числа лимитируемых (табл. 9), а по максимальным концентрациям – 83%.

Относительно ПДК для средних концентраций микроэлементов в поверхностных водах превышение отмечено в 40%, а для максимальных значений в 67% случаев (табл. 10). Средние концентрации превышают ПДК в несколько раз (Fe в 1,5, Mn в 6, Be в 4, Li в 5 раз), максимальные концентрации – в десятки раз (Fe в 19, Mn в 77, Al в 58, Be в 18 раз).

Поверхностные воды по составу близки к грунтовым (табл. 1), это сульфатные хлоридные магниево-кальциево-натриевые воды, в которых сформировались интенсивные потоки загрязнения [Гавришин, 2019; Gavrishin, 2018: Reshetnyak et al., 2014].

Таблица 9. / Table 9.

Характеристика химического состава поверхностных вод в 2015 г. (мг/л). / The chemical composition of surface waters in 2015 (mg/l).

9 (3) 2019

Компонент / Component	Среднее / The average	Медиана / Median	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Стандарт / Standard
pH	7,95	7,99	7,00	8,73	0,31
HCO3	428	406	98	793	142
SO4	1773 +	1585	17	4007 +	815
Cl	212	157	50	917 +	146
Ca	267	276	80	621	88
Mg	146 +	146	6	353 +	76
Na	575 +	343	25	1574 +	313
М	3401 +	2948	1104	6772 +	1324

Таблица 10. / Table 10.

Характеристика содержаний микроэлементов в поверхностных водах в 2015 г. (мг/л). / Characterization of trace elements in surface waters (mg/l).

Элемент / Element	Среднее / The average	Медиана / Median	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Стандарт / Standard
Al	0,34 +	0,11	0,02	11,60 +	1,18
Be	0,0008 +	0,0007	0,0001	0,0037 +	0,0006
Fe	0,45 +	0,21	0,04	5,65 +	0,68
Cd	0,0005	0,0001	0,0001	0,0065 +	0,0010
K	13,0	7,5	0,3	67,0+	14,3
Со	0,002	0,001	0,001	0,039	0,005
Li	0,16 +	0,08	0,02	0,65 +	0,15
Cu	0,003	0,002	0,001	0,009	0,002
Mn	0,61 +	0,27	0,01	7,72 +	1,00
Ni	0,009	0,001	0,001	0,482 +	0,051
Pb	0,0010	0,0010	0,0010	0,0013	0,0001
Se	0,019 +	0,009	0,005	0,070 +	0,017
Sr	3,92	3,75	0,37	8,76 +	2,15
Cr	0,0018	0,0010	0,0010	0,0060	0,0014
Zn	0,014	0,006	0,005	0,335	0,034

Заключение

Многие десятилетия угледобывающая промышленность оказывает интенсивное негативное влияние на все компоненты окружающей среды в Восточном Донбассе. Одним из наиболее мощных факторов преобразования гидрогеохимических условий являются шахтные воды. Особенно интенсивные изменения концентраций макрокомпонентов в шахтных водах произошли в последние 25 лет поле массовой ликвидации угольных шахт в регионе. Для всех лимитируемых макрокомпонентов обнаружено превышение ПДК вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [ГН 2.1.5.1315-03, 2003] по средним концентрациям, а для некоторых компонентов даже по минимальным значениям. По средним концентрациям 20-ти микроэлементов превышение ПДК обнаружено в 53-х% компонентов, по максимальным концентрациям в 73%. Средние концентрации по ряду элементов в десятки раз превышают соответствующие ПДК, а по максимальным концентрациям превышение составляет сотни раз.

В грунтовых и поверхностных водах произошло увеличение средних, медианных и максимальных концентраций макрокомпонентов в 1,2-2.0 раза. По средним концентрациям превышение ПДК отмечено для 67%, а по максимальным – для 83-100% лимитируемых компонентов. Для средних концентраций микроэлементов в грунтовых водах превышение отмечено в 40%, а для максимальных значений в 67% случаев. Средние концентрации микроэлементов превышают ПДК в несколько раз, максимальные концентрации – в десятки раз. После ликвидации угольных шахт, произошло резкое усиление процессов окисления сульфидов и серы, содержащихся в углях и вмещающих горных породах, и растворение сульфатов.

Сравнение гидрогеохимических условий в Восточном Донбассе до и после массовой ликвидации угольных шахт (за 25 лет) выявило значительное ухудшение качества шахтных вод и усиление процессов загрязнения грунтовых и поверхностных вод в регионе. Все изложенное свидетельствует о необходимости проведения реабилитационных мер и совершенствования очистных технологий.

Литература

1. Гавришин А.И. Состояние окружающей среды в районе угольных шахт Восточного Донбасса. // Горный журнал. – 2018. – № 1. – С. 92-96.

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

3. 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.

4. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03. Минздрав. РФ. Пост. № 78. – М. – 2003. – 19 с.

5. 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.

6. Закруткин В.Е., Скляренко Г.Ю., Гибков Е.В. Особенности химического состава и степень загрязненности подземных вод углепромышленных районов Восточного Донбасса. // Известия вузов. Северокавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 4. – С. 73-77.

7. 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.

8. Мохов А.В. Гидродинамическая эволюция пустотного пространства каменноугольных шахт под влиянием затопления. // Вестник Южного научного центра РАН. – 2012. – Том 8. № 3. – С. 42-49.

9. Appelo C.A. J., Postma D. Geochemistry, Groundwater and Pollution. // 2nd ed. – Leiden: A.A. Balkema Publishers. – 2005. – 683 p.

10. 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.

11. 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.

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. – 2018. – Vol. 45. No. 5. – Pp. 785-794.

13. 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.

14. Misch D., Gross D., Huang Q., Zaccarini F., Sachsenhofer R. F. Light and trace element composition of Carboniferous coals from the Donets Basin (Ukraine): An electron microprobe study. // International Journal of Coal Geology. – 2016. – Vol. 168. – Pp. 108-118.

15. Mokhov A. V. The Hydrogeochemical Structure of Water Bodies in Flooded Openings of Coal Mines. // Reports Earth Sciences. – 2012. – Vol. 445. Part 1. – Pp. 903-905.

16. Neidell M., Gross T., Graff Z., Joshua Chang Tom 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., ZakrutkinV. Ye., Gibkov Ye. V. The chemical composition of surface waters of technogenicalli affected geo-systems in Eastern Donbas region. // European Researcher. – 2014. – No. 11-1 (86). – Pp. 1978-1992.

19. Wang Gang, Xie Jun, Xue Sheng, Wang Haiyang. Mining a coal seam below a heating goal with a force auxiliary ventilation system at Longhua underground coalmine. // International Journal of Mining Science and Technology. China. – 2015. – Vol. 25. – Pp. 67-72.

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. The state of the environment in the region of coal mines of the East Donbass. Mountain Journal. 2018. No. 1. pp. 92–96. (In Russ.)

2. 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.

3. Gavrishin A.I., Borisova V.E., Toropova E.S. The distribution of the chemical composition of mine water in the territory of East Donbass. Geology and geophysics of the South of Russia. 2018. No. 2. pp. 5–15. (In Russ.)

4. 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. 19 p. (In Russ.)

5. 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.)

6. Zakrutkin V. E., Sklyarenko G. Yu., Gibkov E.V. Features of the chemical composition and the degree of contamination of groundwater in coal-mining regions of the East Donbass. University news. North-Caucasian region. Natural Sciences Series - 2014. No. 4. pp. 73–77. (In Russ.)

7. 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.)

8. Mokhov A.V. Hydrodynamic evolution of the void space of coal mines under the influence of flooding. Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 8. No. 3. pp. 42–49. (In Russ.)

9. Appelo C. A. J., Postma D. Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd ed. Leiden: A.A. Balkema Publishers. 2005. 683 p.

10. 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.

11. 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.

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. 2018. Vol. 45. No. 5. pp. 785–794.

13. 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.

14. Misch D., Gross D., Huang Q., Zaccarini F., Sachsenhofer R. F. Light and trace element composition of Carboniferous coals from the Donets Basin (Ukraine): An electron microprobe study. International Journal of Coal Geology. 2016. Vol. 168. pp. 108–118.

15. Mokhov A.V. The Hydrogeochemical Structure of Water Bodies in Flooded Openings of Coal Mines. Reports Earth Sciences. 2012. Vol. 445. Part 1. pp. 903–905.

16. Neidell M., Gross T., Graff Z., Joshua Chang Tom 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., ZakrutkinV.Ye., Gibkov Ye.V. The chemical composition of surface waters of technogenicalli affected geo-systems in Eastern Donbas region. European Researcher. 2014. No. 11-1 (86). pp. 1978–1992.

19. Wang Gang, Xie Jun, Xue Sheng, Wang Haiyang. Mining a coal seam below a heating goal with a force auxiliary ventilation system at Longhua underground coalmine. International Journal of Mining Science and Technology. China. 2015. Vol. 25. pp. 67–72.

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.

—— ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ 🛛 =

VДК 552.323.5 DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36479

Оригинальная статья

Мезозойские субщелочные породы центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минерагения

В.М. Газеев (^{1, 2}, к.г.-м.н., А.Г. Гурбанов (^{1, 2}, к.г.-м.н., И.А. Кондрашов (¹)

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35;

²Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр РАН», Россия, 362027, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркуса, 22, e-mail: gurbanov@igem.ru.

Статья поступила: 7 июня 2019, доработана: 24 июля 2019, одобрена в печать: 27 июля 2019.

Аннотация: Актуальность работы. В Центральной части Северного Кавказа, в пределах Кестанты-Хазнидонской неоаллохтонной зоны, выделенной в южной части Скифской платформы, встречаются лавовые потоки, силлы, мелкие штоки и дайки вулканитов «хуламского комплекса» с которыми ассоциирует золото-серебряное оруденение. В статье рассмотрена мезозойская геологическая история региона, существующие представления о геодинамической позиции и возрасте вулканитов. Объектом исследования являются эффузивные и субвулканические образования «хуламского» комплекса (ХК), распространенные преимущественно в пределах Кестанты-Хазнидонской неоаллахтонной зоны, в центральной части Северного Кавказ. Целью исследования являлось изучение наиболее распространенных пород, представленных щелочными и умеренно-щелочными базальтовыми порфиритами, диабазами, анальцимовыми долеритами, трахитами, трахириолитами. Методы исследования: петрографическое описание пород, частотно-резонансный анализ (RFA), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), петрохимические и геохимические методы. Результаты. Показано, что изученные породы являются высоко и умеренно-глино-земистыми, высоко и умеренно-титанистыми, умеренно и низко-магнезиальными образованиями, среди которых отмечаются высоко-калиевые и высоко-натриевые разновидности и в связи с этим наблюдается их изменчивая щелочность (Na2O/K2O=0,03-77,0). Установлено, что породы имеют повышенный уровень концентрации Aq, Be, LILe, LREE и высокозарядных элементов Zr, Hf, Nb, Ta. Спектры распределения REE, нормированных к хондриту, у базальтов, диабазов и анальцимовых долеритов имеют вид наклонных линии, расположенных между профилями OIB и E-MORB. Трахиты отличаются небольшим Еи минимумом. Для риолитов и окварцованных трахитов характерны существенно больший Еи минимум и широкий диапазон содержаний REE. Предполагается, что исходный расплав основного состава образован при плавлении шпинелевых перидотитов, подвергался влиянию флюидной фазы и был обогашен компонентами континентальной коры и субконтинентальной литосферы. Эволюционные изменения расплава, на стадии образования трахитов и риолитов, включали такие процессы как фракционирование плагиоклаза, апатита, ильменита и частичное смешение с выплавками, образовавшимися при плавлении метаосадков. На основании геологических оценок сделано предположение, что полиметаллическое и Au-Ag оруденение ассоциирующее с вулканитами, образовано в результате взаимодействия остывающих субвулканических тел с захороненными, возможно минерализованными, вадозными и седиментационными водами с последующим выщелачиванием рудных компонентов из среднеюрской углерод содержащей терригенной черносланцевой толщи (механизм конвективной ячейки).

Ключевые слова: петрография; геодинамическая типизация, геохимическая специализации, минерагения.

Благодарности: Работа поддержана Госзаданием ИГЕМ РАН «Петрология и минерагения магматизма внутриплитных и посторогенных обстановок: роль литосферных и астеносферных источников в формировании расплавов» и подготовлена при поддержке гос. темы: Регистрационный номер: АААА-А19-119031890027-3.

Для цитирования: Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Мезозойские субщелочные породы центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минерагения. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 47-62. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36479.

=GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36479

Original paper

Mesozoic subalkaline rocks of Central part of the Northern Caucasus: geodynamical typification, geochemistry and minerageny

V. M. Gazeev^{(D1, 2}, A. G. Gurbanov^{(D1, 2}, I. A. Kondrashov^{(D1})

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

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

Received 7 June 2019: revised 24 July 2019: accepted 27 July 2019.

Abstract: Relevance. Lava flows, sills, small stocks and dykes of volcanic rocks of the "Hulam" complex (which are associated with gold-silver mineralization) are presented in the Central part of the North Caucasus, within the Kestant-Khaznidon neoallochthonous zone, allocated in the southern part of the Scythian platform. The Mesozoic geological history of the region, existing ideas about the geodynamic position and age of volcanic rocks are considered in the article. The object of research is the effusive and subvolcanic formations of the "Hulam" complex (HC), which are distributed mainly within the Kestant-Khaznidon neoallochthonous zone in the Central part of the North Caucasus. Aim. To study the most common rocks represented by alkaline and moderately alkaline basalt porphyrites, diabases, analcite dolerites, trachytes, trachyriolites. Methods. Petrographic description of rocks, resonance frequency analysis (RFA), Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), petrochemical and geochemical methods. Results. It was shown that the rocks under investigation are high and moderate clay-earthy, high and moderate titanic, moderately and low-magnesian formations, among which high potassium and high sodium varieties are and, therefore, their variable alkalinity (Na20 / K20 = 0.03-77.0) is observed. It was found that rocks have an increased level of concentration of Ag, Be, LILe, LREE and highly charged elements Zr, Hf, Nb, Ta. The distribution spectra of REE normalized to chondritis in basalts, diabases, and analcimeic dolerites have the form of oblique lines located between the OIB and E-MORB profiles. Trachites have a small Eu minimum. Rhyolites and silicified trachites are characterized by a significantly larger Eu minimum and a wide range of *REE* contents. It is assumed that the initial melt of the basic composition, formed during the spinel peridotite melting, was influenced by the fluid phase, and was enriched by the components of the continental crust and subcontinental lithosphere. The evolutionary changes in the melt at the stage of trachyte and rhyolite formation included such processes as fractionation of plagioclase, apatite, ilmenite, and partial mixing with the melts formed during the melting of metasediments. Based on geological estimates, it was suggested that polymetallic and Au-Ag mineralization associated with volcanics is formed as a result of the interaction of cooling subvolcanic bodies with buried, possibly mineralized, vadose and sedimentation waters, followed by leaching of ore components from Middle Jurassic carbon containing terrigenous black shale strata (convection cell mechanism).

Keywords: petrography, geodynamical typification, geochemical specialilization, minerageny.

Acknowledgments: The research was supported by the State Assignment of the IGEM RAS "Petrology and Minerageny of Magmatism of intraplate and postorogenic environments: the role of lithospheric and asthenospheric sources in the formation of melts" and was prepared with the support of state topic: Registration number: AAAA-A19-119031890027-3.

For citation: Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Mesozoic subalkaline rocks of Central part of the Northern Caucasus: geodynamical typification, geochemistry and minerageny. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii* = *Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 47-62. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36479.

Введение. Геологическая история региона в юрское и меловое время и объект исследования

Объектом исследования были выбраны эффузивные и субвулканические образования «хуламского» комплекса (XK), распространенные преимущественно в пределах Кестанты-Хазнидонской неоаллахтонной зоны, в центральной части Северного Кавказа (рис. 1). В геологическом плане территория их распространения расположена в южной части Скифской платформы (СП) и в раннеюрское время являлась северным плечевым поднятием рифтогенного морского бассейна Большого Кавказа (БК). Уже в плинсбахе и тоаре в пределах СП формируется система узких грабенообразных мелководных бассейнов, в разрезах которых сохраняются раннеюрские вулканиты типа БАДР. В позднем аалене и байосе вдоль южной границы рифтогенного трога БК происходит становление среднеюрского Крымско-Закавказского вулканического пояса, где накапливаются вулканические серии известковошелочного состава. Считается, что этот вулканический пояс маркировал юрскую окраину континента на границе с океаном Нео-Тетис. К северу от БК в южной части СП накапливаются мелководные морские и континентальные осадки, а в зонах проявившегося здесь задугового растяжения формируются спилит-диабазовые дайковые пояса. В последующий период в фазу среднекиммерийского задугового сжатия, контролировавшуюся активностью Нео-Тетической субдукционной системы, происходит частичная инверсия трога БК, однако, после этой фазы, территория БК была вовлечена в новый цикл рифтинга, начавшегося в келловее и закончившегося в берриасе. Келловейско-позднеюрский трог БК был параллелен более южному известково-щелочному вулканическому поясу Понтиды-Закавказье с максимальной вулканической активностью в киммеридже. Вдоль южной границы трога БК, в пределах Рионского бассейна в Грузии, отмечается вулканизм, представленный щелочными и оливиновыми базальтами. В южной части СП в этот период формируются Терский, Западно- и Восточно-Кубанские рифтовые бассейны. Между ними и трогом БК присутствует небольшое поднятие. На границе юры и мела трог БК испытал слабые компрессионные деформации, обусловленные кратковременным задуговым сжатием. СП после этой фазы компрессионной тектоники, в неоком-барреме, является регионом с часто меняющимися палеогеографическими условиями [Никишин и др., 2005].

В разные голы изучением петрографии, петрохимии, пород ХК занимались сотрудники институтов АН СССР [Лебедев, 1950; Цветков, 1977], а изучением оруденения, ассоциирующего с этими породами – геологи КБ ГРЭ, ГГП «Кольцовгеология» ПГО и ФГУГП «Севкавгеология». В результате, здесь выделено Левобережное рудное поле включающее месторождение «Радужное» и ряд мелких рудопроявлений полиметаллов, золота и серебра. В настоящее время, несмотря на длительный период изучения, сохраняются различия в представлениях о количестве и последовательности внедрения магматических фаз, об их возрасте и формационной принадлежности. Например, по представлениям А.А. Шветкова в междуречье Черек Балкарский – Чегем присутствуют три разновозрастные магматические формации: 1 – Базальтовых порфиритов (средняя юра – байос); 2 – трахитов (верхняя юра); 3 – субщелочных габброидов – тешенитов (нижний-верхний мел) [Цветков, 1977]. По представлениям других исследователей возраст этих пород среднеюрский. Наиболее ранними являются лавы и субвулканические тела базальтовых порфиритов и трахириолитов, в последующий период происходит внедрение тел трахитового и трахиандезитового состава. На заключительном этапе внедряются тешениты [Письменный, 2001; Курбанов, 2004]. В настоящей публикации рассматриваются результаты петролого-геохимического изучения мезозойских субщелочных пород Центральной части Северного Кавказа и их геодинамическая типизация и минерагения.

9 (3) 2019



Рис. 1. Геологическая карта Кестанты-Хазнидонской неоаллахтонной зоны с мезозойскими магматическими породами (данные ФГУГП «Кавказгеолсъемка» листы К-38- VIII, XIV. 2001 г.) / Fig. 1. Geological map of the Kestant-Khaznidon nevillejones zone with Mezozoic igneous rocks (data from the «Kavkazgeolsolzemka» FSUE, Sheets K-38-VIII, XIV. 2001)

Фактический материал и методы его исследования

Материалом для исследования послужила коллекция образцов, собранная авторами при геологических исследованиях объектов в 1988-1991 гг., 2011-2013 гг. Аналитические исследования выполнены в 2017 г., в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика»: в 45 пробах проведены определения концентраций петрогенных и микроэлементов рентгено-флюоресцентным анализом (*XRF*) на спектрометре «Респект-100»; в 27 пробах проведены определения рудных, редких и редкоземельных элементов методом спектроскопии с индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием (*ICP-MS*) на масс-спектрометре *X-Series II*. Использованы методики и условия анализов, принятые в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика» и ФГБУН ИГЕМ РАН. Точность анализа контролировалась путем измерения российских и международных стандартных образцов. Дополнительно, при построении диаграмм использованы силикатные анализы из литературных источников [Лебедев, 1950; Цветков, 1977] и геологических отчетов [Корсаков, Киричко и др., 1989].

Краткая петрографическая характеристика пород

9 (3) 2019

Среди исследованных пород преобладают базальтовые порфириты, мандельштейны, диабазы, риолиты, трахиты реже встречаются анальцимовые долериты и диабазы. Базальтовые порфириты и мандельштейны отмечены в виде маломощных лавовых потоков с характерной шаровой отдельностью. Структура порфировая и гломеропорфировая, основная масса апоинтерсертальная. Вкрапленники представлены деанортизированным иногда ситовидным плагиоклазом [рис. 2-1], содержащим включения карбоната (*in situ*) и выделения альбита. Основная масса образована удлиненными кристаллами, либо микролитами



2-1. Базальтовый порфирит с ситовидным плагиоклазом ($\mathcal{I} - 2,9$) / Basalt porphyrite with sieve plagioclase (D - 2,9)



2-3. Гломеропорфировая структура риолитов (Д – 2,9) / Glomeroporphyric rhyolite structure (D – 2,9)



2-5. Трахит существенно-натровый (Д - 2,9) / Trachyte substantially-sodium <math>(D - 2.9)



2-2. Диабаз (Д – 2,9) / Diabase (D – 2,9)



2-4. Трахит калиево-натровый (Д – 2,9) / Potassium-sodium trachyte (D – 2,9)



2-6. Долерит анальцимовый (Д – 2,9) / Dolerite analcime (D – 2,9)

Рис. 2. Микрофотографии пород (\mathcal{I} – диагональ снимка в мм) / Fig. 2. Microphotographs of rocks (D – image diagonal in mm)

9 (3) 2019

олигоклаз-андезина, в промежутках между которыми присутствует хлоритовый агрегат с примесью карбоната, цеолитов, окислов железа и лейкоксена. Часто в породе наблюдаются удлиненно-округлые миндалины, выполненные этими же минералами. Диабазы слагают дайки и силлы. Структура порфировая, гломеропорфировая, основная масса офитовая, участками пойкилоофитовая. Вкрапленники представлены плагиоклазом (андезин-лабрадор) реже авгитом [рис. 2-2]. Основная масса сложена преобладающим плагиоклазом (олигоклаз-андезин), авгитом цеолитами и редкими псевдоморфозами замещения. По оливину они выполнены серпентин-хлоритом с примесью талька и карбоната. Трахириолиты и риолиты образуют протяженный горизонт и мелкие штоки. Встречаются их натровые и калиевые разновидности, которые пространственно разобщены. Структура порфировая и гломеропорфировая [рис. 2-3], основная масса фельзитовая и аллотриаморфнозернистая. Вкрапленники представлены пелитизированным альбит-олигоклазом либо анортоклазом в более калиевых разновидностях. Основная масса состоит из кварца и полевого шпата, сцементированных тонкозернистым агрегатом этих же минералов с примесью серицита, хлорита, карбоната и магнетита. Трахиты слагают силлы и мелкие лакколиты. Отмечены калиево-натровые и существенно-натровые разновидности. Структура порфировая, гломеропорфировая основная масса трахитовая и бостонитовая реже микропойкилитовая. В калиево-натровых трахитах [рис. 2-4] вкрапленники представлены преимущественно пелитизированным калиево-натровым полевым шпатом (КПШ), реже кварцем. Основная масса сложена преобладающими микролитами КПШ с примесью кристаллов роговой обманки. В промежутках между микролитами присутствует кварц и хлорит. В существенно натровых трахитах [рис. 2-5] вкрапленники представлены альбит-олигоклазом, реже пелитизированым КПШ и иногда кварцем. Основная масса сложена преобладающими микролитами альбита, в промежутках между которыми присутствует кварц и хлорит. В обеих разновидностях отмечаются мелкие пустотки, с карбонатом, кварцем, хлоритом.

Долериты и диабазы анальцимовые слагают дайки и силлы. Структура гипидиоморфнозеристая, офитовая и пойкилоофитовая. Состоят они из удлиненно-таблитчатых кристаллов плагиоклаза (андезин-лабрадор), замещающихся альбитом, карбонатом, пренитом. В промежутках, между которыми отмечаются выделения КПШ, авгита, анальцима [рис. 2-6], биотита, хлорита и ильменита. Иногда в породе встречаются округлые обособления сложенные антигоритом и боулингитом – псевдоморфозы по оливину и пустотки с цеолитом и пренитом.

Петрохимические и геохимические характеристики пород

На классификационной диаграмме $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$ (рис. 3-1) фигуративные точки составов пород XK расположены в поле щелочных и умеренно-щелочных пород, от щелочных базальтов и трахибазальтов до трахитов и умереннощелочных трахириолитов. Присутствуют также нормально-щелочные риолиты, и ассоциирующие с ними ультракислые автометасоматиты. На диаграмме Zr/TiO_2 *0,0001 – Nb/Y (рис. 3-2) где критерием щелочности является Nb/Y отношение, точки составов группируются вдоль раздела пород известково-щелочной и щелочной серии, а в поля классических щелочных пород фактически не попадают.

На диаграмме AFM (рис. 3-3) точки пород основного состава расположены в центральной части, а риолиты и трахиты преимущественно в щелочном углу. На диаграммах SiO_2 – петрогенные элементы (рис. 4) можно отметить, что при увеличении SiO_2 : концентрации Fe_2O_3 , CaO, P_2O_5 образуют непрерывные тренды с отрицательной корреляцией; Al_2O_3 , MgO, TiO_2 тренды с изломом. Содержания K_2O , Na_2O в породах среднего и кислого состава варьируют в широких пределах.

Основные породы (ОП) (табл. 1) высоко и умеренно титанистые, умеренно и низкомагнезиальные Mg# 0,55-0,61; $Al^l 1,1-1,3$ (высокоглиноземистые); $Na_2O/K_2O= 2,6-77$. Трахиты



1 – щел. пикриты; 2 – щел. пикробазальты; 3 – щелочные базальты; 4 – трахибазальты; 5 – базальты; 6 – трахиандезибазальты; 7 – трахиандезиты; 8 – щелочные трахиты; 9 – трахиты; 10 – трахидациты; 11 – низкощел. дациты; 12 – трахириолиты; 13 – риолиты /

1 – Alkaline picrites; 2 – Alkaline picrobasalts; 3 – Alkaline basalts; 4 – Trachybasalts; 5 – Basalts;
6 – Trachiandesibasalts; 7 – Trachiandesites; 8 – Alkaline trachytes; 9 – Trachytes; 10 – Trachidacites;
11 – Low-Alkaline Dacites; 12 – Trachyrhyolites; 13 – Rhyolites





3-3. $(Na_2O+K_2O) - FeOt-MgO$

Рис. 3. Составы пород на классификационных диаграммах. Условные обозначения: 1 – риолиты; 2 – трахиты; 3 – базальты, долериты, диабазы. На рисунке 3-1 разным цветом выделены XRF, выполненные в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика» и ранее опубликованные в статьях и отчетах. /

Fig. 3. The composition of the rocks on the classification diagrams.

Legend: 1 – rhyolites; 2 – trachytes; 3 – basalts, dolerites, diabases. In Figure 3-1, XRFs are shown in different colors, made at the IGEM – Analytics Center and previously published in articles and reports.

 $Mg\#0,5-0,38; Al^{l} = 1,6-3,4; Na_2O/K_2O = 0,25-1,3$. Риолиты $Mg\#=0,03-0,75; Al^{l} = 3,6-63$ (плюмазитовые $Al_2O_3 > CaO + K_2O + Na_2O$); $Na_2O/K_2O = 0,01-1,5$. По положению фигуративных точек ОП и трахитов на петрогенетических диаграммах Zr/Y - Zr (рис. 5-1); $Zr/4 - Nb \times 2 - Y$ [Meschede, 1986] (рис. 5-2); Y/15-La/10-Nb/8 [Cabanis, Lecolle, 1989] (рис. 5-3) они диагностируются как внутриплитные, континентальные образования. На диаграмме Sm/Yb-La/Sm [Школьник и др. 2009] (рис. 5-4) составы ОП группируются вблизи тренда плавления шпинелевых перидотитов. На диаграмме Nb/Y - Zr/Y [Fitton et al., 1997; Condie, 2005] (рис. 5-5), точки ОП ХК сгруппированы вдоль линии ΔNb от PM к EN с концентрацией большинства



Fig. 4. Diagrams of concentrations of petrogenic components (in wt.%). Conventions see figure 3.

точек в поле (*IAB*, *ACMB*) – пород островных дуг и активных континентальных окраин, вблизи *с EN*. Точки составов риолитов на диаграмме *Rb-* (*Y*+*Nb*) [Pearce et al., 1984] (рис. 5-6) сгруппированы в поле (*VAG*) – гранитов вулканических дуг и (*WPG*) – внутриплитных гранитов. На диаграммах *Ba/Th* – *Th/Yb* [Мартынов, 2010] (рис. 5-7) и *Th/Nd-Sr/Nd* [Гриб и др., 2012] (рис. 5-8) отмечается, влияние флюидной фазы на состав ОП и влияние на

магмогенез трахитов, но в большей степени – риолитов, т.е. расплавов образующихся при частичном плавлении метаосадков.

Спектры распределения редкоземельных элементов (рис. 6) нормированных к хондриту [San, McDonough, 1989] у ОП имеют вид наклонных линий, расположенных между профилями OIB и E-MORB. Трахиты имеют близкий с ОП профиль, с небольшим европиевым минимумом. Для риолитов и окварцеванных трахитов характерен существенно больший Еи минимум и широкий диапазон содержаний REE. В ОП $La^{\mu}/Sm^{\mu} = 1,3-2,5.$ $Gd^{\mu}/Yb^{\mu} = 1,0-1,9.$ La^и/Yb^и отношение (показатель степени фракционирования REE) в пределах 2,2-6,5. Величина количественного дефицита европия Eu/Eu^* ($Eu^* = (Sm_n + Gd_n)/2$) составляет 0,8-1,03. ∑*REE* 86-135 г/т (табл. 2). В трахитах *La^н/Sm^н* = 2,0-2,9. *Gd^н/Yb^н* = 0,8-1,3. *La^н/Yb^н* = 3,0-4,0. $Eu/Eu^* = 0,52-1,2$. $\Sigma REE = 130-183$ г/т. В риолитах $La^{\mu}/Sm^{\mu} = 2,8-5,4$. $Gd^{\mu}/Yb^{\mu} = 0,7-1,1$ La^{μ}/Sm^{μ} *Yb^н* = 3,0-6,6. *Eu/Eu*^{*} = 0,04-0,5. *SREE* = 54-60 г/т. Концентрации несовместимых элементов (рис. 6) в ОП нормированные к *N-MORB* [San, McDonough, 1989], образуют наклонные спектры, располагающиеся между профилями E-MORB и OIB. Отмечается обогащение пород LILe, LREE и высокозарядными элементами. Заметна положительная аномалии Ba. Для *Rb* и *K* характерен существенный разброс содержаний, у последнего отмечаются положительные и негативные аномалии. Трахиты при сравнении с ОП характеризуются более интенсивными положительными аномалиями – K, Zr, Hf и появившимися отрицательными, относительно N-MORB, аномалиями Sr и Ti. В риолитах и окварцованных трахитах отмечаются положительные аномалии: K, Zr, Hf, Th; отрицательные аномалии Sr, P, Eu, Ti; и в ряде случаев негативные аномалии Nb, Ta.

Для уточнения геохимической специализации изучаемых пород составлены ранжированные ряды кларков концентрации (Кк>1,5). Для долеритов и диабазов – $Ag_{8,0} Be_{3,0} Nb_{2,3}$ $Hf_{1,6}$. Для базальтов и анальцимовых диабазов – $Ag_{10} Be_{4,3} Nb_{3,7} Cs_{3,6} Hf_{2,0} Ta_{1,7} Zr_{1,6}$.Для трахитов – $Ag_{12} Nb_{5,4} Hf_{3,3} Ta_{2,9} Be_{1,8} Y_{1,6} W_{1,5}$. Для риолитов – $Ag_{81} Nb_{4,6} Zr_{3,2} Hf_{2,1} Ta_{1,7}$. Геохимическая специализация в целом – $Ag_{27} Nb_{4,0} Hf_{3,0} Be_{2,3} Ta_{1,8} Zr_{1,8}$. Сравнение полученных формул с геохимией близких петрогеохимических типов разных геодинамических обстановок [Гусев, Кудрявцев и др., 1999] показывает, что изученные породы сопоставимы с породами внутриплитных обстановок: континентальных рифтов; океанических горячих точек; трапповых провинций и тыловых рифтов активных континентальных окраин. Геохимическая специализация литофильно-редкометальная и халькофильная.

Обсуждение результатов

Изученные породы представлены щелочными и умеренно-щелочными базальтовыми порфиритами, диабазами, анальцимовыми долеритами, трахитами, трахириолитами которые являются высоко и умеренно-глиноземистыми, высоко и умеренно-титанистыми, умеренно и низкомагнезиальными образованиями, среди которых отмечаются высоко-калиевые и высоко-натриевые разновидности и в связи с этим наблюдается изменчивая их щелочность ($Na_2O/K_2O=0,03-77$). На модели равновесного плавления гранатового (Ol55Opx25Cpx10Grt10) и шпинелевого (Ol55Opx25Cpx15Sp15) перидотита (рис. 5-4), составы ОП группируются вблизи тренда плавления шпинелевых перидотитов, субконтинентальной литосферы (рис. 5-5). *Ni/Co* отношение варьирует от 1,8 до 5,4 (среднее 3,1), что соответствует характеристикам мантийных выплавок (Ni/Co = 2,5-5,0).

Умеренная и низкая магнезиальность ОП возможно, свидетельствует о том, что изучаемые породы являются производными уже предварительно эволюционировавшего расплава. Известно, что кристаллизационная дифференциация типичной минеральной ассоциации базитовых магм (*Ol, Cpx, Opx*) приводит к росту концентрации всего спектра *REE*, незначительно меняя их форму [Мартынов, 2010]. Субпараллельные тренды ОП и трахитов указывают на их происхождение из одной и той же родоначальной магмы. По-видимому, в

B Becobbix %; Jiementul B r /T) / /eight%; elements in g / t)	к-333/91 108-7 108-8 к-273/91	80,49 83,83 77,93 74,28	0,10 $0,07$ $0,07$ $0,19$	9,94 8,42 11,66 11,66	1,12 $0,19$ $0,16$ $3,11$	0,01 0,01 0,01 0,06	0,11 0,09 0,15 0,08	0,11 0,02 0,15 0,16	4,01 0,12 0,18 3,36	2,60 5,69 9,46 6,20	0,03 0,02 0,02 0,03	1,16 1,23 - 0,50	99,68 99,69 99,79 99,63	<10 - <10	<10 - <10	<10 - 5 <10	<10 - <10	<10 - <10	17 17 8 102	15 166 107 <10	72 126 220 113	40 15 30 28	524 1304 801 201	10 10 12 179	175 103 115 1707	21 28 24 106	1,54 $0,02$ $0,01$ $0,54$	8,08 31,18 63,67 3,65	0,12 0,5 0.75 0,03	3/12, к-86/88; трахиты к-261/91, к-281/91,
(oксиды vides in	108-4	57,88	0,32	15,43	0,34	0,41	0,12	7,64	5,68	5,67	0,08	5,78	99,35	-			-	12	18	61	73	80	188	49	480	87	1,0	33,34	0,3	ьцимовые
omplex (c	107-2	63,68	0,47	16,73	4,45	0,11	0,35	0,86	6,84	5,24	0,12	0,94	99,79		17	5	•	•	83	•	74	93	383	56	691	53	1,3	3,48	0,15	абазы анал
Hulam co	к-281/91	56,43	0,58	15,34	5,45	0,22	0,40	5,84	4,59	5,19	0,11	5,67	99,82	13	17	<10	<10	10	74	<10	74	67	388	35	449	51	0,88	2,62	0,14	сриты и ди
s of the	к-261/91	60,22	1,68	14,63	6,47	0,06	2,37	1,42	1,80	6,94	0,49	3,66	99,74	24	174	20	18	30	105	<10	170	52	695	33	301	99	0,25	1,65	0,38	.90/91; дол
) of rock	к-86/88	45,81	2,17	17,31	8,42	0,11	6,74	4,80	5,22	1,88	0,48	6,84	99,78	103	208	28	92	38	<i>LL</i>	<10	24	287	398	27	282	42	2,7	1,14	0,61	:-34/88, к-2 08-7.
vsis (XRI	23/12	45,09	2,24	15,98	7,99	0,14	4,69	8,16	4,98	1,87	0,51	8,09	99,74	121	173	31	139	33	69		18	354	514	29	238	37	2,6	1,26	0,52	7, 107-10, к к-273/91, 1
nce analy	к-290/91	45,93	2,18	15,15	11,01	0,25	6,98	5,40	4,81	0,27	0,31	7,45	99,74	213	221	32	105	35	126	25	<10	263	358	20	288	39	17,8	0,84	0,55	иабазы 107 91, 108-8, 1
fluoresce	к-34/88	51,82	1,40	16,75	7,98	0,14	4,97	6,35	6,22	0,08	0,21	3,91	99,83	182	175	30	63	58	20 20	,	<10	192	82	12	233	45	77,7	1,29	0,54	фириты и д иты к-333/
of X-ray	107-10	50,50	1,43	16,82	7,97	0,45	4,65	10,77	4,48	0,41	0,33	2,32	100,13	129	146	26	60	68	<i>LL</i>	10	8	191	66	11	172	39	10,9	1,33	0,55	товые порс тты и риол
results (107	48,46	1,11	15,17	7,15	$0,\!22$	4,06	8,46	6,10	0,44	0,15	8,42	99,74	173	123	24	77	44	68		11	404	486	11	204	38	13,8	1,35	0,55	ние: базаль рахириоль
The	Nº oбp. / Nº sample	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ou M	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	uuu	Cymma / Sum	Cr	Λ	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Rb	Sr	Ba	Nb	Zr	Y	Na_2O/K_2O	Al^{l}	Mg#	Примечан 107-2, 108-4; т

56

9 (3) 2019

Геология и геофизика Юга России

Таблица 2. / Table 2.

Элементы (г/т) /	Номера проб / Sample Numbers													
Elements (g/t)	к-34/88	k-290/91	107-10	23/12	k-86/88	k-261/91	k-281/91	k-333/91	108-8					
Li	50	53	38	67	44	25	26	6,8	13					
Be	1,2	1,6	1,2	1,3	2,2	2,9	3,7	1,1	1,0					
Sc	24	12	20	20	12	9,8	2,6	<ПО	14,4					
Ti	7302	11442	8856	10486	13633	9413	2881	468	455					
V	148	180	175	200	197	152	4,2	1,6	2,0					
Cr	155	131	131	116	89	11	<ПО	3,5	4,3					
Mn	971	1627	974	1142	924	411	1380	50	8,7					
Со	24	27	27	27	25	13	0,44	0,2	0,50					
Ni	52	84	38	38	80	33	1,8	11	1,6					
Си	41	33	51	55	36	28	5,1	13	5,7					
Zn	57	95	62	84	75	93	51	2,9	0,9					
Rb	1,1	4,5	8,0	1,5	21	183	41	59	223					
Sr	185	263	194	472	301	38	39	18	23					
Y	30	23	29	31	27	49	36	11	12					
Zr	137	256	180	199	276	281	439	125	109					
Nb	9,5	29	15	17	35	39	48	5,9	5,6					
Мо	<∏O	1,5	0,35	0,42	0,44	3,1	1,8	1,7	1,0					
Ag	0,44	1,3	0,86	0,89	1,3	1,4	2,0	0,58	1,5					
Cd	0,24	0,66	0,35	0,47	0,49	0,54	0,71	0,21	0,17					
Cs	<∏O	0,09	13	13 0,06 7,2 0,60		0,24	0,14	0,38						
Ba	64	351	244	375	399	708	323	418	622					
La	11	20	11	13	23	29	22	11	10					
Се	28	43	27	32	51	67	44	23	23					
Pr	3,8	5,1	3,7	4,2	6,2	8,3	6,1	2,4	2,8					
Nd	17	22	18	20	27	36	26	8,9	11					
Sm	5,0	4,6	4,5	4,9	6,0	8,1	6,0	1,7	2,3					
Eu	1,5	1,4	1,6	1,7	2,1	1,4	1,6	0,1	0,24					
Gd	4,9	4,7	4,9	5,3	5,9	8,1	6,1	1,4	2,1					
Tb	0,88	0,85	0,91	1,0	1,0	1,5	1,2	0,29	0,45					
Dy	5,6	5,0	5,8	6,4	5,9	9,9	7,3	2,0	3,0					
Но	1,2	1,0	1,2	1,3	1,2	2,0	1,4	0,46	0,65					
Er	3,4	2,6	3,3	3,6	2,9	5,2	4,0	1,3	1,9					
Тт	0,50	0,38	0,49	0,52	0,42	0,82	0,62	0,23	0,32					
Yb	3,2	2,5	3,4	3,4	2,5	5,2	3,9	1,6	2,1					
Lu	0,49	0,39	0,46	0,52	0,39	0,76	0,59	0,24	0,31					
Hf	3,5	5,6	4,0	4,5	5,6	7,5	9,4	3,8	3,6					
Та	0,58	1,9	1,0	1,2	2,2	2,7	2,9	0,70	1,0					
W	<ПО	0,05	0,94	0,06	<ПО	1,6	1,8	3,1	3,4					
Pb	5,0	5,0 13,5 2,3 3,2 2,6 4,8					2,0	18,2	78					
Th	1,9	3,6	1,4	1,7	2,8	10	6,0	6,4	9,0					
U	0,52	0,92	0,36	0,35	0,85	2,6	1,8	2,5	1,6					
$\sum REE$	86,47	113,52	86,26	97,84	135,51	183,28	130,81	54,62	60,17					

Результаты ICP-MS анализа пород Хуламского комплекса / Results of ICP-MS analysis of rocks of the Hulam complex.







Рис. 6. Составы пород на спайдер диаграммах. Концентрации несовместимых элементов нормированные к N-MORB, концентрации REE нормированные к хондриту по [San, McDonough, 1989]. /

Fig. 6. Compositions of rocks on spider diagrams. Concentrations of incompatible elements normalized to N-MORB, REE concentrations normalized to chondritis [San, McDonough, 1989].

процессе магмообразования (рис. 5-6, 5-7) основанной расплав подвергался влиянию флюидной фазы. Индикатором флюидного компонента являются относительные концентрации Ba, U и Sr. Негативные аномалии Eu Sr, P, Ti в трахитах и риолитах преимущественно связаны с процессами фракционирования плагиоклаза, апатита, ильменита. При образовании риолитов имело место смешение трахитового расплава с выплавками, образовавшимися при частичном плавлении метаосадков. Надежным индикатором осадочного компонента в магмогенезисе является Th [Мартынов, 2010], содержание которого повышается в трахитах и риолитах (табл. 2).

Изучаемая ассоциация пород XK в геодинамическом плане обычно рассматривается как островодужная, расположенная в тыловой зоне мезозойской палеоостровной дуги Северного Кавказа [Богатиков, Цветков 1988] или как образование Северокавказской нижнесреднеюрской трансформной континентальной окраины [Гусев 1990]. По положению на петрогенетических диаграммах (рис. 5-1, 5-2, 5-3) эти породы диагностируются как внутриплитные континентальные образования, либо как породы островных дуг и активных континентальных окраин (рис. 5-4, 5-6). Их геохимические формулы по ряду элементов также сопоставимы с породами внутриплитных обстановок и тыловых рифтов активных континентальных окраин. Важно отметить, что породы типичных внутриплитных обстановок и тыловых рифтов активных континентальных рифтов и горячих точек на нормированных спектрах несовместимых элементов и *REE* располагаются вдоль линии *OIB* и выше нее [Туркина, 2014], а в нашем случае они расположены между *E-MORB* и *OIB*. Сравнение ОП XK с породами среднеюрской, задуговой структуры растяжения (СЗСР), расположенной южнее XK на 10-15 километров [Газеев и др., 2018], позволяет констатировать однотипность спектров распределения *REE*, что, по-видимому, указывает на единство их родоначальных расплавов, но их дальнейшая эволюция, происходившая в разных структурных блоках, существенно различается. Считается, что позднеальпийские щелочные породы Кавказского региона формировались в районах относительно спокойной тектоники [Дзоценидзе, 1964], где возможна длительная дифференциация базальтовой магмы, что согласуется с геологической позицией магматических тел ХК, расположенных на южной окраине Скифской плиты. Отметим и то, что на диаграмме Nb/Y – Zr/Y (рис. 5-5), учитывающей распределение высокозарядных элементов, вынесены области распространения конечных компонентов мантии: а) глубоко обедненный плюмовый компонент (DEP); б) обогащенный компонент (EN), включающий верхнюю часть континентальной коры и субконтинентальной литосферы; в) переработанный компонент (REC), включающий компоненты EM1, EM2 и HIMU; г) компонент слабо деплетированной мантии (DM) и примитивной мантии (PM) [Туркина, 2014], точки ОП ХК сгруппированы вдоль линии ΔNb от PM к EN с концентрацией большинства точек вблизи с *EN*. Важно отметить, что породы C3CP расположены ближе к *PM* [Газеев и др., 2018], но в целом, образуют единый тренд с породами ХК.

Известно, что с основными породами, трахитами и риолитами ХК ассоциирует полиметаллическое и Au-Ag оруденение [Курбанов и др., 2004], которое приурочено к вулканогенно-осадочной толще. Наиболее продуктивные тела локализованы в брекчиях вблизи контактов вулканогенных пород либо в риолитах. По полученным нами данным изученные породы имеют повышенные содержания Ag c Кк от 8 до 81 (Au не определялось). Содержания Pb, Zn находятся на кларковом уровне и ниже него. Появление подобного оруденения сложно объяснить особенностями кристаллизации магматических расплавов в период становления небольших штокообразных и силлоподобных тел. По-видимому, происходило взаимодействие остывающих субвулканических тел с захороненными, возможно минерализованными, вадозными и седиментационными водами с последующим выщелачиванием ими рудных компонентов из среднеюрской углеродосодержаей терригенной черносланцевой толщи (механизм конвективной ячейки).

Заключение

Изучены петрохимические и геохимические особенности щелочных и умеренно-щелочных разновидностей пород Хуламского комплекса. Установлено, что породы имеют повышенный уровень концентрации Ag, Be, LILe, LREE и высокозарядных элементов Zr, Hf, Nb, Ta. На основании сравнения спектров распределения REE предполагается, что ОП ХК и близкие с ними по составу породы C3CP являются производными единой высокоглиноземистой магмы, возникшей при плавлении шпинелевых перидотитов. Однако, породы ХК, более обогащены компонентами континентальной коры и субконтинентальной литосферы. Эволюционные изменения расплава, на стадии образования трахитов и риолитов, включали фракционирование плагиоклаза, апатита, ильменита и частичное смешение с выплавками, образовавшимися при плавлении метаосадков. На основании геологических оценок высказано предположение, что полиметаллическое и Au-Ag оруденение ассоциирующее с вулканитами, образовано при взаимодействии остывающих субвулканических тел с захороненными вадозными и седиментационными водами из среднеюрской углеродосодержащей терригенной черносланцевой толщи.

Литература

 Богатиков О. А., Цветков А. А. Магматическая эволюция островных дуг. – М.: Наука, 1988. – 241 с. 2. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Основные породы среднеюрского, задугового дайкового пояса Большого Кавказа (геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация) // Геология и геофизика юга России. – 2018. – № 2. – С. 16-29.

3. Гриб Е. Н., Леонов В. Л., Перепелов А. Б. Поперечная геохимическая зональность на примере Карымского вулканического центра // Вулк. и сейсмология. – 2012. – № 5. – С. 25-40.

4. Гусев А.И. Петрофациальные типы нижнее-среднеюрских песчаников Северного Кавказа и геодинамические обстановки их формирования // Труды Дагестан. научн. центра АН СССР, ин-т Геол. – 1990. – С. 54-64.

5. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гущин А.В., Сурин Т.Н., Бескин С.М., Донец А.И., Ермолаев А.Н., Жабин А.Г., Куриленко Н.М., Онтоева Т.Д., Филатов Е.И., Ширай Е.П. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. – Санкт – Петербург: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.

6. Дзоценидзе Г.С. Тектоническое положение щелочных пород Кавказа // Происхождение щелочных пород. – М.: Наука, 1964. – С. 12-15.

7. Корсаков С.Г., Киричко Ю.А., Овсепянц Ю.А. и др. Геологическая карта Кавказа. Листы К-38-14-В, Г, К-38-27-А, К-38-15-В. – Ессентуки: ФГУГП «Севкавгеология», 1989.

8. Курбанов М. М. Поисковые работы в пределах Безингийского рудного поля в 2002-2004 гг. – Ессентуки. Фонды ФГУП Севкавгеология. Отчет о результатах работ. Т. 1. – 113 с.

9. Лебедев А. П. Юрская вулканогенная формация Центрального Кавказа // Труды института геологических наук. Изд. АН СССР Вып. 118. Петрографическая серия № 33. – 1950. – 174 с.

10. Мартынов И. А. Основы магматической геохимии. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 215 с. 11. Никишин А. М., Фокин П. Л., Тихомиров Е. Ю. и др. 400 миллионов лет геологической истории южной части Восточной Европы. – М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2005. – 351 с.

12. Письменный А.Н., Терещенко В.В., Перфильев В. А, и др. Государственная геологическая карта РФ. Листы К-38-VIII, XI. – Ессентуки: ФГУГП «Севкавгеология», 2001.

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

14. Цветков А.А. Мезозойский магматизм центральной части Северного Кавказа. – М.: Наука, 1977. – 166 с.

15. Школьник С.И., Резницкий Л.З., Беличенко В.Г., Бараш И.Г. Геохимия, вопросы петрогенеза и геодинамическая типизация метавулканитов Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион). // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. № 9. – С. 1013-1024.

16. Cabanis B., Lecolole M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de mélange et /ou de contamination crustale // C. R. Acad. Sci. Ser. II. – 1989. – Vol. 309. – Pp. 2023-2029.

17. 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.

18. Fitton J. G., Saunders A. D., Norry M. J. et al. Thermal and chemical structure of the Iceland plume // Earth Planet. Science Letter. – 1997. – Vol. 153. Pp. 197-208.

19. Meschede M.A. Method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nd-Zr-Y diagram. // Chemical. Geol. – 1986. – Vol. 56. – Pp. 207-218.

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

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

References

1. Bogatikov O.A., Tsvetkov A.A. Magmatic evolution of island arcs. Moscow, Nauka, 1988. 241 p. (In Russ.)

2. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. The basic rocks of the Middle Jurassic, backarc dike belt of the Greater Caucasus (geochemistry, questions of petrogenesis and geodynamic typing). Geology and Geophysics of the South of Russia. 2018. No. 2. pp. 16–29. (In Russ.) 3. Grib E.N., Leonov V.L., Perepelov A.B. Transverse geochemical zoning on the example of the Karymsky volcanic center. Volcanology and Seismology. 2012. No. 5. pp. 25–40. (In Russ.)

4. Gusev A.I. Petrofacial types of Lower-Middle Jurassic sandstones of the North Caucasus and the geodynamic conditions of their formation. Proceedings of Dagestan Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR, Institute of Geology. 1990. pp. 54–64. (In Russ.)

5. Gusev G.S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V., Surin T.N., Beskin S.M., Donets A.I., Ermolaev A.N., Zhabin A.G., Kurilenko N.M., Ontoeva T.D., Filatov E.I., Shirai E.P. Geochemical and metallogenic specialization of structural-material complexes. St. Petersburg: VSEGEI, 1999. 514 p. (In Russ.)

6. Dzotsenidze G.S. The tectonic position of the alkaline rocks of the Caucasus. The origin of alkaline rocks. M. Nauka, 1964. pp. 12-15. (In Russ.)

7. Korsakov S.G., Kirichko Yu.A., Ovsepyants Yu.A. et al. Geological map of the Caucasus. Sheets K-38-14-V,G, K-38-27-A, K-38-15-V. Essentuki: FGUGP "Sevkavgeologiya", 1989. (In Russ.)

8. Kurbanov M.M. Exploration work within the Besingi ore field in 2002–2004. Essentuki. Funds of FSUE Sevkavgeologiya. Report on the results of work. Vol. 1, 113 p. (In Russ.)

9. Lebedev A.P. Jurassic volcanic formation of the Central Caucasus. Proceedings of the Institute of Geological Sciences. Ed. USSR Academy of Sciences. Issue 118. Petrographic series No. 33. 1950. 174 p. (In Russ.)

10. Martynov I. A. Fundamentals of magmatic geochemistry. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 215 p. (In Russ.)

11. Nikishin A.M., Fokin P.L., Tikhomirov E.Yu. et al. 400 million years of geological history of southern Eastern Europe. M. GEOKART, GEOS, 2005. 351 p. (In Russ.)

12. Pis'mennyi A.N., Tereshchenko V.V., Perfil'ev V.A, et al. State geological map of the Russian Federation. Sheets K-38-VIII, XI. Essentuki: FGUGP "Sevkavgeologiya", 2001. (In Russ.)

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

14. Tsvetkov A.A. Mesozoic magmatism of the central part of the North Caucasus. M. Nauka, 1977. 166 p. (In Russ.)

15. 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 Tunkinsky terrane (Baikal-Khubsugul region). Geology and geophysics. 2009. Vol. 50. No. 9. pp. 1013-1024. (In Russ.)

16. Cabanis B., Lecolole M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. C.R.Acad. Sci. Ser. II. 1989. Vol. 309. pp. 2023–2029.

17. 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.

18. Fitton J.G. Saunders A.D. Norry M.J. et al. Thermal and chemical structure of the Iceland plume. Earth Planet. Science Letter. 1997. Vol. 153. pp. 197–208.

19. Meschede M.A. Method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nd-Zr-Y diagram. Chemical. Geol. 1986. Vol. 56. pp. 207–218.

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

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

63

= ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА 🛛 =

УДК 551.243 DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36480

Оригинальная статья

Альпийская структура складчатой системы Северо-Западного Кавказа и условия ее образования

Т.В. Гиоргобиани 问^{1, 2}, к. г.-м. н., Д.П. Закарая³, к. г.-м. н.

 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;
 ³ООО «Геология», Грузия, 0179, г. Тбилиси, ул. Я. Николадзе, 5a, e-mail: d_zakara@yahoo. com

Статья поступила: 3 сентября 2019, доработана: 20 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Северо Западный Кавказ (СЗК) представляет собой западное окончание мегантиклинория Большого Кавказа (БК), который от смежных тектонических единиц разграничен крупными, длительно развивающимися разломами. Несмотря на многолетние исследования СЗК, ее тектоническая структура все еще остается недостаточно изученной. В последние годы представления авторов о складчатой структуре СЗК и условиях ее образования были дополнены и изменены, что отражено в настоящей работе. Объект исследования – складчатая система Северо-Западного Кавказа. Цель работы установление её альпийской структуры и условий её образования. Методы исследования: полевой, камеральный и аналитический. Результаты. В результате многолетнего детального изучения выявлены закономерности внутреннего строения альпийской складчатой структуры Северо-Западного Кавказа. Установлено, что одной из характерных особенностей этого региона является латеральная зональность его складчатой структуры в поперечном сечении, выразившаяся в последовательной смене с юго-запада на северо-восток интенсивной складчатости умеренной, а затем слабой. Это свидетельствует о спаде деформационных усилий в указанном направлении в процессе образования складчатости Северо-Западного Кавказа. Выявлено широкое развитие в пределах южного склона Северо-Западного Кавказа интерференционных складчатых структур, возникающих в результате наложения деформаций разного плана и возраста. Установлено, что интерференционная складчатость отражает изменение плана деформации Северо-Западного Кавказа от северо-восточного на субмеридиональное во время образования складчатой системы. Рассмотрены кинематические особенности образования складчатости различной морфологии, развитой в пределах изученного региона. Выявлены причины разнообразия складчатых форм, наблюдаемых в современной структуре Северо-Западного Кавказа. Установлено широкое развитие в регионе многочисленных разнообразных по ориентировке, возрасту и кинематике разрывных нарушений. Показано, что действие шолевой тектоники привело к преобразованию первичной складчатости в южном активном крае Северо-Западного Кавказа. Новейший процесс деформации с образованием наложенных на первичную складчатость структур продолжается в регионе и в настоящее время.

Ключевые слова: Северо-Западный Кавказ, микроконтинент, складчатая структура, интерференция, этапы тектогенеза, зональность складчатости, тангенциальное сжатие, разрывы

Для цитирования: Гиоргобиани Т. В., Закарая Д. П. Альпийская структура складчатой системы Северо-Западного Кавказа и условия ее образования. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 63-76. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36480.

= GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =

DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36480</u>

Original paper

Alpine structure of the folding system of North-West Caucasus and conditions of its forming

T.V. Giorgobiani (D^{1, 2}, D.P. Zakaraia³

 ¹Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 1 Chavchavadze Ave., Tbilisi 0179, Georgia;
 ²AI. Djanelidze Geological Institute, 31 Politkovskaia Str., Tbilisi 1086, Georgia, e-mail: ciala_gugava@mail.ru;
 ³LTD "Geologi", 5a J. Nikoladze Str., Tbilisi0179, Georgia, e-mail: d_zakara@yahoo.com

Received 3 September 2019; revised 20 September 2019; accepted 24 September 2019.

Abstract: Relevance. The Northwest Caucasus is the western end of the meganticlinorium of the Greater Caucasus, which is distinguished from adjacent tectonic units by large, long-term faults. Despite many years of the research of the Northwest Caucasus, its tectonic structure is still studied insufficiently. In recent years, the authors' ideas about the folded structure of the Northwest Caucasus and the conditions of its formation were supplemented and changed, that is reflected in this paper. The object of study is the folded system of the Northwest Caucasus. Aim. To determine the alpine structure of the folded system of the Northwest Caucasus and the conditions of its formation. Methods: field, office and analytical. Results. As a result of many years of detailed study, regularities of the internal structure of the alpine folded structure of the Northwest Caucasus are identified. It has been determined that one of the characteristic features of this region is the lateral zonality of its folded structure in cross section, which is expressed in a successive change from the south-west to the north-east of intense folding of moderate and then weak. This indicates a decrease in deformation efforts in the indicated direction during the formation of folding in the Northwest Caucasus. Widespread development of interference folded structures arising as a result of superposition of deformations of different planes and ages was revealed within the southern slope of the Northwest Caucasus. It has been determined that interference folding reflects a change in the deformation plan of the Northwest Caucasus from the north-eastern to submeridional during the formation of the folded system. The kinematic features of folding formation of various morphology (developed within the studied region) are considered. The causes of the diversity of folded forms observed in the modern structure of the Northwest Caucasus are revealed. The wide development of numerous discontinuous violations diverse in orientation, age and kinematics has been defined in the region. It has been shown that the action of scholle tectonics led to the transformation of primary folding in the southern active region of the Northwest Caucasus. The latest deformation process with the formation of structures superimposed on the primary folding is continuing in the region at present.

Keywords: North-West Caucasus, microcontinent, folded structure, interference, stages of tectogenesis, zones of folding, tangential compression, faults

For citation: Giorgobiani T.V., Zakaraia D.P. Alpine structure of the folding system of North-West Caucasus and conditions of its forming. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 63-76. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36480.

Введение

Северо-Западный Кавказ (СЗК) представляет собой западное окончание мегантиклинория Большого Кавказа (БК), который от смежных тектонических единиц разграничен крупными, длительно развивающимися разломами (рис. 1). Северной границей этого региона служит Ахтырский разлом, за которым располагается Западно-Кубанский передовой





Рис. 1. Структурная схема Северо-Западного Кавказа

1 – Западно-Кубанский передовой прогиб; 2 – Черноморско-Закавказский микроконтинент (микроплита); Мегантиклинорий Северо-Западного Кавказа. Структурные этажи: 3 – доюрский; 4 – нижне-среднеюрский; 5 – верхнеюрско-эоценовый; 6 – олигоцен-нижнемиоценовый и средне-верхнемиоценовый (сармат); 7 – верхнемиоцен (меотис) – нижнеплиоценовый и средневерхнеплиоценовый; 8 – перекрытая структурами мегантиклинория часть Адлерской депрессии; 9 – оси синклиналей; 10 – крупные долгоживущие разломы, разграничивающие мегантиклинорий от смежных тектонических единиц: А – Ахтырский, П – Приморский; 11 – Приморский разлом в пределах Черного моря, установленный геофизическими данными; 12 – разломы разграничивающие структурно-фациальные зоны: ТГ – Тугупсинский, ТХ – Тхамахинский, ВА – Верхнеабинский, БК – Бекишейский, БЗ – Безепский, К – Краснополянский, М – Монастырский; 13 – внутризональные продольные и диагональные разломы; 14 – В – Воронцовский покров; 15 – субмеридиональные поперечные разломы: М – Молдаванский, Д – Джанхотский, Т – Туапсинский, П-А – Пшехско-Адлерский; 16 – линии геолого-структурных профилей; На врезке показана изученная территория. 16 — I, II, III и IV — линии геолого-структурных профилей. / Fig. 1. The structural diagram of the North-West Caucasus 1 – West Kuban foredeep; 2 – Black Sea-Transcaucasian microcontinent (microplate); Meganticlinorium of the Northwest Caucasus. Structural floors: 3 – Pre-Jurassic; 4 – Lower Middle Jurassic; 5 – Upper Jurassic-Eocene; 6 – Oligocene-Lower Miocene and Middle-Upper Miocene (Sarmatian); 7 – Upper Miocene (Meotis) – Lower Pliocene and Middle Upper Pliocene; 8 – part of the Adler depression overlapped by meganticlinorium structures; 9-axis of synclines; 10-large long-lived faults, delimiting the meganticlinorium from adjacenttectonic units: A - Akhtyrsk, P - Primorsk; 11 - Primorsk fault within the Black Sea, established by geophysical data; 12 - faults delimiting structural-facies zones: TG - Tugupinsk, TX - Tkhamakhinsk, VA – Verkhneabinsk, BK – Bekisheysk, BZ – Bezep, K – Krasnopolyansk, M-Monastyrsk; 13 – intrazonal longitudinal and diagonal faults; $14 - B - Vorontsov \ cover$; $15 - submeridional \ transverse \ faults$: M-Moldovansk, D-Dzhanhot, T – Tuapse, P-A – Przheshko-Adler; 16 – lines of geological and structural profiles; The inset shows the investegated area. 16 - I, II, III and IV are the lines of geological and

structural profiles.

прогиб, заложенный на эпигерцинской Скифской платформе. С юга складчатая система C3K ограничена Монастырским разломом, отделяющим его от Абхазской зоны. Последняя является северной краевой частью Грузинской глыбы Черноморско-Закавказского микроконтинента (микроплиты), представленной в современной структуре Адлерской депрессией. Продолжением Монастырского разлома в пределах Черного моря является Приморский разлом, установленный морскими геофизическими исследованиями. Он разграничивает флишевые толщи мел-палеогена от отложений конца миоцена, южным ограничением которых служит Восточно-Черноморский разлом [Терехов и др., 1973; Расцветаев, 1977]. Западным ограничением этого региона является Керченско-Таманский прогиб, а восточная граница проводится по Пшехско-Адлерской зоне поперечных разломов, за которой простирается Центральный Кавказ.

Геологическое, в том числе и тектоническое строение СЗК, исследовали многие знаменитые геологи [Белоусов, Трошихин, 1937; Козлов, 1937; Ефремов, 1948; Милановский, Хаин, 1963; Сорский, 1964; Шарданов, Борукаев, 1968; Дьяконов и др., 1972; Шолпо, 1978; Шемпелев, 1978]. Проведенные ими работы имели важное значение для выяснения основных характерных черт геологического строения рассматриваемого региона. Однако, несмотря на многолетние исследования СЗК, ее тектоническая структура все еще остается недостаточно изученной.

В период 1977-1985 гг. авторы статьи проводили исследования складчатой структуры СЗК, результаты которого были опубликованы [Гиоргобиани, Закарая, 1989; Giorgobiani, 1995]. В последующие годы представления авторов о складчатой структуре СЗК и условиях ее образования были дополнены и изменены, что отражено в настоящей работе.

Тектоническое строение

В пределах альпийского комплекса СЗК выделяются шесть структурных этажей: нижне-среднеюрский, верхнеюрско-эоценовый, олигоцен-нижнемиоценовый, средне-верхнемиоценовый (сармат), верхнемиоцен (мэотис) – нижнеплиоценовый и средне-верхнеплиоценовый (рис. 1).

Нижне-среднеюрский этаж сложен вулканогенно-осадочными и терригенными песчано-глинистыми формациями мощностью более 6 км. Верхнеюрско-эоценовый этаж состоит из флишевых терригенных, карбонатно-терригенных и карбонатных формаций, общая мощность которых достигает почти 10 км. Более молодые этажи сложены олигоцен-плиоценовыми молассовыми терригенными песчано-глинистыми и карбонатно-терригенными формациями суммарной мощностью 4,5 км.

В тектоническом строении альпийского этажа мегантиклинория СЗК принимают участие линейные структуры разных порядков и возраста, вытянутые в северо-западном направлении. Структурами первого порядка являются: Гойтхский антиклинорий, представляющий собой ядро мегантиклинория и сложенный нижне-среднеюрским этажом. Его обрамляют отложения верхнеюрско-эоценового этажа, в пределах которого выделяются Абино-Гунайский синклинорий, слагающий северо-восточное крыло мегантиклинория и Новороссийско-Лазаревский синклинорий, представляющий собой юго-западное крыло этой структуры. В юго-восточной части синклинория расположена Чвежипсинская структурно-фациальная зона, которая с севера ограничена крупным Краснополянским разломом. Она по характеру фациального состава осадков представляет зону переходную от глубоководных флишевых толщ СЗК к мелководным отложениям Черноморско-Закавказского микроконтинента (ЧЗМ). Чвежипсинская зона состоит из двух крупных структур второго порядка – Дагомысской антиклинали, расположенной в северной половине зоны, и Пластунской синклинали, занимающей южную ее часть.

Дагомысская антиклиналь в целом представляет собой крупную (шириной более 8 км) асимметричную слабо наклоненную к юго-западу брахиформную складку. Ее южное крыло залегает под углами 45-50° и наклонено на юго-запад, а пологое северное крыло – под углом 30-40° падает на северо-восток. В пределах Дагомысской антиклинали обнажен полный разрез верхней юры и мела. Ядро складки сложено вулканогенными образованиями байоса и несогласно залегающими на них отложениями верхней юры, а крылья – меловыми породами. Пологое крыло антиклинали местами осложнено сильно сжатыми, асимметричными, опрокинутыми на юго-запад складками более высокого порядка, размером от 300 до 700 м.

Пластунская синклиналь в основном сложена палеогеновыми отложениями и представляет собой асимметричную, наклоненную на юго-запад структуру с крутым северным и пологим южным крыльями. Крутое крыло ее залегает субвертикально и тектонически граничит с Дагомысской антиклиналью, а пологое, под углом 20-30°, падает на северовосток. Ширина складки достигает 10 км. Пологое крыло синклинали осложнено сильно сжатыми мелкими флексурообразными складками, с короткими крутыми и длинными пологими крыльями, размером 150-350 м. Все структуры опрокинуты на юго-запад. Нередко наблюдаются лежачие складки с падением осевых плоскостей под углом 15-25° на северовосток.

На юге Пластунская синклиналь по Монастырскому разлому, проходящему на южном крыле шовной антиклинали Ахцу, соприкасается с Абхазской структурно-фациальной зоной. Краевая часть последней по пологому (20–25°) падающему на север Воронцовскому надвигу перекрыта структурами Чвежипсинской зоны. Величина перекрытия покровом участка колеблется в пределах 1-3 км. Абхазская зона, сложенная мощной байосской порфиритовой серией и субплатформенными карбонатными и терригенными формациями верхней юры, мела и палеогена, резко отличается от вышеописанных тектонических зон характером своей складчатой структуры. Она в пределах исследованного района, в общем, представляет собой пологую (5–15°) моноклиналь, которая местами осложнена слабо сжатыми, с углами падения крыльев 20-30°, кулисно расположенными брахиформными складками северо-западного простирания.

Гойтхский антиклинорий от расположенного севернее Абино-Гунайского синклинория, разграничен Тугупсинским (на востоке) и Тхамахинским и Верхнеабинским (на западе) разломами. С юга он отделен от Новороссийского синклинория Безепским (на западе) и Бекишейским (на востоке) разломами. Объектами наших исследований были нижне-среднеюрский и верхнеюрско-эоценовый этажи, из которых в основном и сложено складчатое сооружение СЗК. Остальные этажи развиты в пределах западного погружения мегантиклинория, а также его северного крыла и имеют ограниченное распространение. Продольная тектоническая структура осложнена трансзональными субмеридиональными поперечными долгоживущими разломами. Это Молдаванский, Джанхотский, Туапсинский и Пшехско-Адлерский разломы, обусловившие ступенчатое строение региона (рис. 1).

Складчатая структура

Для изучения складчатой структуры СЗК авторами выполнены детальные (масштаб 1:1000) геолого-структурные разрезы вдоль серии профилей, ориентированных вкрест ее простирания, которые в несколько упрощенном виде приведены на рисунке 2.

В результате проведенных исследований выявлены важные особенности альпийской тектонической структуры мегантиклинория [Гиоргобиани, Закарая, 1989]. Установлено, что нижне-среднеюрский этаж характеризуется сложным внутренним строением (рис. 2, III, IV). Одной из наиболее свойственных ему черт является многопорядковость складчатости. Здесь выделяются линейные складки трех порядков северо-западного простирания. Структуры первого порядка, устанавливаемые с помощью маркирующих горизонтов (свит и пачек), самые крупные. Их длина достигает нескольких десятков километров, при шири-



не 1,7-5 км. Осложнены они складками второго порядка, ширина которых колеблется в пределах 0,3-1,0 км. Последние в свою очередь состоят из складок третьего порядка, шириной до 100 м. Это, в основном, асимметричные интенсивно сжатые складки с узкими замками и крутыми крыльями. Они наклонены или опрокинуты на юго-запад. Осевые плоскости складок падают на северо-восток под углами 65-80°.

Другая важная особенность Гойтхского антиклинория – закономерно изменчивый характер складчатости в поперечном направлении. В юго-западной части антиклинория, между нижне-среднеюрским и верхнеюрско-эоценовым этажами, наблюдается угловое несогласие: на интенсивно сжатые в мелкие складки среднеюрские породы налегают относительно слабоскладчатые киммеридж-титонские отложения (рис. 2, III). На северо-востоке между этими этажами наблюдается параллельное несогласие. Здесь оба этажа дислоцированы одинаково и полого (20–30°) наклонены на север. Эти факты дают основание предположить, что в поперечном сечении Гойтхского антиклинория происходит уменьшение интенсивности складчатости с юго-запада на северо-восток.

Верхнеюрско-эоценовый этаж сложен чрезвычайно разнообразными по размеру, морфологии и ориентировке структурами (рис. 2, I-IV). Однако складки определенного морфологического типа и степени сжатости закономерно располагаются в общей структуре региона, образуя зоны вытянутые в общекавказском направлении (рис. 4 А). В поперечном сечении региона с юго-запада на северо-восток выделяются четыре зоны: сильносжатой, среднесжатой, слабосжатой складчатости и зона моноклинали.

Первая зона характеризуется развитием сильно сжатой, близкой к изоклинальной складчатости. Степень сжатости складок – 45-50%. Они асимметричны, наклонены или опрокинуты к юго-западу, крылья падают под углами 45-50° и 75-85°. Осевые плоскости круто (70–80°) наклонены на северо-восток. Ширина складок – 1-3 км. На крайнем юговостоке региона структуры этой зоны в виде надвига Воронцовского покрова (20°) частично перекрывают Абхазскую зону. Такие же надвиги наблюдаются и севернее, вплоть до Краснополянского разлома (рис. 1).

В зоне среднесжатой складчатости степень сжатости складок меньше – 30-35%, крылья более пологие – 40-50° и 70-75°. Складки также асимметричны наклонены к юго-западу, с падением осевых поверхностей на северо-восток под углом 70-80°, ширина их – 3-6 км.

Зона слабосжатой складчатости характеризуется еще меньшей степенью деформации толщ – 10-20%. В плане это типичные брахиформные складки, слабовытянутые в обще-кавказском направлении. Ширина их – 6-10км. Они слабо асимметричны, наклонены к юго-западу, крылья их еще положе – 30-40° и 50-60°, а осевые плоскости круто (80–85°) падают на северо-восток.

Зона моноклинали это область пологого (20–30°) залегания слоев, наклоненных к северо-востоку и нередко осложненных коленообразными флексурами.

Таким образом, одной из характерных особенностей верхнеюрско-эоценового этажа СЗК является зональность их складчатой структуры в его поперечном сечении, выразившаяся в последовательной смене интенсивной складчатости умеренной, а затем слабой, переходящей к северо-востоку в полого наклоненную моноклиналь.

Проведенные нами исследования показали, что еще одной особенностью складчатой структуры этого региона является присутствие здесь складчатых структур весьма своеобразной морфологии и некавказского простирания. В частности, на южном склоне СЗК в полосе развития мел-палеогеновых флишевых отложений, расположенных между Джанхотским и Туапсинским поперечными разломами, складчатая структура имеет аномальное, в общем близширотное простирание (рис. 3 А). Эта полоса, которая имеет протяженность почти 90 км и максимальную ширину около 20 км, характеризуется очень сложным внутренним строением. Здесь часто происходит изгибание в плане и разрезе шарниров складок, наблюдается разветвление складок и фестончатые формы их периклиналей, от-



Рис. 3. А. Схема геологического строения территории, в пределах которой развита интерференционная складчатость

 1 – палеоген; верхний мел: 2 – сеноман-сантонские ярусы, 3 – нижний мел и объединенные кампандатские ярусы; 4 – нижняя-средняя юра; 5 – оси антиклиналей и синклиналей близширотного и юго-западного простирания; 6 – разрывные нарушения; 7 – поперечные разломы: Д – Джанхотский, Т – Туапсинский. В. Эксперименты по моделированию интерференционной складчатости: I – исходная модель; II – складчатая структура возникшая после первого этапа сжатия; III – после второго этапа сжатия под углом 45°; черные слои – петролатум, белые – петролатум+каолин, стрелки – направление сжатия. /

Fig. 3. A. a diagram of the geological structure of the territory where interference folding is developed I - Paleogene; Upper Cretaceous: 2 - Cenomanian-Santonian sequences, 3 - Lower Cretaceous and the combined Campanian-Danish sequences; 4 - Lower-Middle Jurassic; 5 - axis of anticlines and synclines of near-latitudinal and southwestern strike; 6 - discontinuous faults; 7 - transverse faults: D-Dzhankhot, T - Tuapse. B. Experiments on modeling interference folding: I - initial model; $II - folded structure that arose after the first stage of compression; III – after the second stage of compression at an angle of <math>45^\circ$; black layers – petrolatum, white layers – petrolatum + kaolin, arrows – direction of compression.

мечаются также необычные клинообразные формы складок. Антиклинали нередко имеют изометричную или овальную куполообразную форму, а синклинали – чашеобразный или корытообразный вид. Таким образом, первичная линейная складчатость превращена в нелинейные структуры. Кроме того, здесь наблюдается развитие относительно мелких новообразованных субширотных складок на пологих крыльях крупных первичных структур северо-западного простирания. Складки на крыльях осложнены крутопадающими взбросами и взбросо-сдвигами, в основном, субширотного направления. Все это является важнейшими признаками пересекающейся складчатости, возникающей в результате интерференционного наложения деформаций разного плана и возраста [Паталаха, Слепых, 1974; Giorgobiani, Zakaraia, 2010]. Следовательно, интерференционная складчатость отражает изменение направления сжатия в пределах СЗК в течение альпийского цикла его развития.

Характерное для этого региона в целом северо-западное направление линейной складчатости, зональность складчатой структуры и ее юго-западная вергентность указывают на то, что своим происхождением складчатость обязана горизонтальному сжатию, ориентированному на северо-восток – вкрест простирания более ранних структур. Асимметричный характер латеральной зональности свидетельствует об относительной неподвижности Скифской плиты в процессе альпийского складкообразования на БК.

Общая субширотная ориентировка зоны преобразованной складчатости, аналогичные простирания осей новообразованных складок и разрывных нарушений, свидетельствуют о повторном тангенциальном сжатии первичной линейной складчатой структуры в субмеридиональном направлении.

Таким образом, в течение альпийского цикла развития СЗК происходила смена направления тангенциального сжатия от северо-восточного на субмеридиональное [Гамкрелидзе, Гиоргобиани, 1987; Гиоргобиани, Закарая, 1989].

Формировались интерференционные структуры после среднего палеогена, поскольку преобразованные складки сложены отложениями вплоть до эоцена. Однако складчатые структуры, установленные в пределах Черного моря и сложенные осадками конца миоцена [Терехов и др., 1973], между Джанхотским и Туапсинским поперечными разломами, как и на суше, меняют свое северо-западное простирание на субширотное, что вероятно тоже связано с переориентировкой этих структур (рис. 1). Эти данные позволяют предположить, что возникновение преобразованных складчатых структур СЗК происходило после миоцена, скорее всего в предпозднеплиоценовую (роданскую) фазу складчатости.



Рис. 4. А. Схема морфологических типов складчатости Северо-Западного Кавказа Структурные этажи: 1 – нижне-среднеюрский этаж; Верхнеюрско-эоценовый структурный этаж; 2 – зона сильносжатой складчатости; 3 – зона среднесжатой складчатости; 4 – зона слабосжатой складчатости; 5 – зона моноклинали; 6 – Западно-Кубанский передовой прогиб; 7 – область распространения мел-палеогеновых флишевых отложений в пределах Черного моря; 8 – глубинные разломы: А – Ахтырский, П – Приморский; 9 – границы зон складчатости. Б. Схема движения Черноморско-Закавказского срединного массива во время адыгейской (батской), пиринейской (предолигоценовой), штирийской (предсреднемиоценовой) и аттической (верхнемиоценовой) фаз складчатости. Разломы: А – Ахтырский, П – Приморский. В. Схема движения блоков Черноморско-Закавказской микроплиты в процессе роданской (предсреднеплиоценовой) и валахской (предчетвертичной) фаз складчатости.
1 – Скифская платформа; 2 – Черноморско-Закавказская микроплита; 3 – поперечные

разломы: М – Молдаванский; Д – Джанхотский; Т – Туапсинский; Г – Гудаутский. Шоли: Гл – Геленджикский, Ту – Туапсинский, Сч – Сочинский, Гд – Гудаутский.

Г. Принципиальная схема механизма формирования складчатой структуры в ранне-

среднеальпийское время.

I – осадочный слой; 2 – гранитный слой; 3 – базальтовый слой; 4 – зона придвига; 5 –

межзональные и внутризональные разломы, ограничивающие крупные блоки фундамента; 6 –

направление сжатия. ЧМ – Черноморско-Закавказская микроплита; ЗСС – зона сильносжатой

складчатости; 3СрС – зона среднесжатой складчатости; 3СлС – зона слабосжатой

складчатости; ЗМ – зона моноклинали; СП – Скифская платформа. /

Fig. 4. A. Scheme of morphological types of folding in the Northwest Caucasus Structural floors: 1 – lower-middle Jurassic floor; Upper Jurassic-Eocene structural floor; 2 – highly compressed folding zone; 3 – zone of medium compression folding; 4 – zone of slightly compressed folding; 5 – monocline zone; 6 – West Kuban foredeep; 7 – distribution area of Cretaceous-Paleogene flysch deposits within the Black Sea; 8 – deep faults: A – Akhtyrsk, P – Primorsk; 9 – the boundaries of the folding zones.

E. The movement pattern of the Black Sea-Transcaucasian middle massif during the Adyg (Bat), Pyrenean (Pre-Ligocene), Styrian (Pre-Middle Miocene) and Attic (Upper Miocene) folding phases. Faults: A – Akhtyrsk, P – Primorsk.

B. The movement pattern of blocks of the Black Sea-Transcaucasian microplate during the Rodan (pre-Middle Pliocene) and Walachian (pre-Quaternary) folding phases.

1 – Scythian platform; 2 – Black Sea-Transcaucasian microplate; 3 – transverse faults: M-Moldavian; D-Dzhanhotsky; T – Tuapse; G – Gudautsky. Sholi: Gl – Gelendzhik, Tu – Tuapse, Sch – Sochi, Gd – Gudautsky.

 Γ . A schematic diagram of the mechanism of formation of a folded structure in the early-mid-Alpine time. 1 – sedimentary layer; 2 – granite layer; 3 – basaltic layer; 4 – a zone of a drive; 5 – interzonal and intrazonal faults bounding large blocks of the foundation; 6 – direction of compression. Ψ M – Black Sea-Transcaucasian microplate; 3CC – zone of highly compressed folding; 3CpC – zone of medium compressed folding; $3C\pi C$ – a zone of slightly compressed folding; 3M – monocline zone; SP – Scythian platform.

Проведенные авторами тектонические эксперименты на эквивалентных материалах (рис. 3 Б) подтвердили высказанное выше мнение о механизме возникновения интерференционных структур СЗК.

Разрывные нарушения

Складчатая структура СЗК осложнена многочисленными разнообразными по ориентировке, морфологии и возрасту разрывными нарушениями. Они по расположению относительно складчатых структур отчетливо разделяются на продольные и диагональные, а по отношению к складкообразовательному процессу – на доскладчатые, соскладчатые и постскладчатые нарушения (рис. 1).

Продольные долгоживущие доскладчатые разломы разграничивают СЗК от смежных тектонических единиц, а также структурно-фациальные зоны мегантиклинория.

Продольные соскладчатые разломы являются внутризональными нарушениями, тесно связанными с формированием складчатых структур. Эти разрывные нарушения в основном представляют собой крутопадающие (70–85°) на северо-восток взбросы.

Диагональные доскладчатые разломы являются поперечными крутыми ($80-85^{\circ}$) трансзональными сбросами и имеют в основном субмеридиональное ($0-15^{\circ}$), редко северо-восточное ($20-30^{\circ}$) направление.

Внутризональные диагональные соскладчатые разломы являются крутопадающими (70–85°) на север взбросами и простираются субширотно (260–275°). Образовались разломы на позднеальпийском этапе в процессе формирования интерференционных складчатых структур.

Диагональные посткладчатые разломы представляют собой трансзональные нарушения, деформирующие как складчатые структуры, так и тесно связанные с ними продольные разломы. Выделяются в основном две группы нарушений – северо-восточного (40–65°) и северо-западного (335–345°) простирания. Эти разломы, как правило, имеют крутые (70– 85°) падения и являются взбросо- и сбросо-сдвигами.

Условия образования структуры

Анализ фактического материала, истории тектонического развития, а также региональный структурный анализ БК дают возможность высказать свое мнение о механизме формирования современной структуры СЗК.

В настоящее время существуют два противоположных представления о механизме формирования тектонической структуры СЗК – фиксистское и мобилистское. Сторонники фиксистской концепции считают, что формирование складчатости происходит в результате вертикальных тектонических движений, возникающих за счет процесса глубинного диапиризма или адвекции. Последние при этом трансформируются во вторичные горизонтальные давления, вызывающие складчатость изученного региона [Сорский, 1964; Шолпо, 1978 и др.]. Мобилисты предполагают образование складчатой структуры тангенциальными силами, допуская при этом возникновение складчатости в результате продвижения к северу и пододвигания под БК ЧЗМ [Белоусов, Трошихин, 1937; Козлов, 1937; Милановский, Хаин, 1963; Шемпелев, 1978; Гамкрелидзе, Гиоргобиани, 1987; Гиоргобиани, Закарая, 1989 и др.]. В настоящее время фиксистская концепция и целесообразность применения ее идей для объяснения происхождения складчатости БК, многими исследователями отрицается. Они считают, что это представление противоречит фактическим данным и не учитывает конкретные особенности тектонического строения БК.

Проведенные авторами детальные геолого-структурные исследования СЗК показали, что механизм образования его современной складчатой структуры значительно сложнее, чем предполагалось panee [Gamkrelidze, Giorgobiani, 1990; Gamkrelidze et al., 1998].

В формировании современной складчатой структуры СЗК выделяются два качественно различных этапа деформации и тектогенеза. Происходили они на фоне глобального геодинамического процесса сближения Африкано-Аравийского и Евразийского континентов [Giorgobiani, Zakaraia, 2013].

Первый этап деформации включает длительный доинверсионный период и раннеорогенную стадию (юра-средний миоцен), с проявлением предкелловейской (батской), пиренейской и штирийской фаз складчатости. В этот период была сформирована главная линейная складчатая структура СЗК северо-западного простирания. Ее образование было обусловлено придвижением и прижатием ЧЗМ к выполненному осадками прогибу БК вкрест его простирания в северо-восточном направлении, вызванным аналогичным дрейфом в это время Африкано-Аравийского континента [Giorgobiani at al., 1998]. Процесс придвига (термин Е.И. Паталахи) обуславливает складкообразование в регионе, которое происходит в обстановке мягкой и жесткой коллизии (термины предложенные Н.В. Короновским) ЧЗМ с БК. Воздействие жесткого ЧЗМ на литифицированные маловязкие отложения СЗК относится к разряду мягкой коллизии, испытанной регионом на данном этапе деформации. В условиях мягкой коллизии одностороннее юго-западное тангенциальное сжатие и спад деформационных усилий к северо-востоку привели к формированию латеральной асимметричной зональности складчатой структуры изученного региона. Примечательно, что на этом этапе тектогенеза на СЗК воздействовал целостный ЧЗМ, поэтому такую деформацию можно рассматривать как проявление микроплитовой тектоники.

Второй, более короткий (поздний миоцен-антропоген), позднеорогенный этап тектогенеза СЗК проходил на фоне общего воздымания БК в процессе аттической, роданской,

9 (3) 2019

валахской и четвертичных фаз складчатости, в условиях южного субмеридионального горизонтального сжатия. В отличие от предыдущей, эта была обстановка жесткой коллизий, обусловленная взаимодействием ЧЗМ и уже консолидированной складчатой системы СЗК. Коллизионный этап развития региона характеризуется изменением главного направления его сжатия с северо-восточного на субмеридиональное. Произошло это в результате отделения Аравийского континента от Африки и его продвижения на север к Скифской плите.

В начале позднеальпийского этапа ЧЗМ был расчленен субмеридиональными разломами на отдельные поперечные мелкие блоки-шоли (рис. 1). Они в результате тангенциального долготного давления перемещались к северу и косо вдвигались в СЗК. Это вызывало в складчатой системе автономные разнообразные наложенные коллизионные деформации. Проявление шолевой тектоники привело к преобразованию и разрушению пологими разломами первичной складчатости в южном активном крае БК. В изменившейся обстановке столкновение шолей ЧЗМ с СЗК происходило в различных кинематических условиях. При придвигании блоков к складчатой системе образовалась интерференционная складчатость (Геленджикская и Туапсинская шоли), а при пододвигании Сочинской шоли сформировался Воронцовский покров.

Заключение

Проведенные детальные исследования тектонической структуры СЗК показали, что существующий сейчас поддвиговый механизм тектогенеза достоверно не объясняет причины альпийского складкообразования. Более реальным и основанным на фактическом материале является придвиговый механизм деформации. Он действовал в пределах СЗК на первом этапе тектогенеза в процессе формирования его главной линейной складчатой структуры. В процессе второго позднеорогенного этапа тектогенеза складкообразование СЗК происходило в сочетании придвиговых и поддвиговых механизмов деформации во время образования неоднородных коллизионных структур.

Рассмотренные двухэтапые (многофазные) процессы структурообразования в пределах СЗК еще не достигли своего завершения и продолжаются в настоящее время.

Литература

1. Белоусов В.В., Трошихин Б.М. Краткий геологический очерк района рек Пшеха и Белой в Северо-Западном Кавказе. // Зап. Всерос. Минер. О-ва. – 1937. – Ч. 66. Вып. 4. – С. 796-824.

2. Гамкрелидзе И. П., Гиоргобиани Т. В. Проблемы альпийской деформации Большего Кавказа и смежных с ним областей. // В кн.: Геология и полезных ископаемые Большого Кавказа. – М.: Наука, 1987. – С. 35-40.

3. Гиоргобиани Т.В. Закарая Д.П. Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. – Тбилиси: изд-во «Мецниереба», 1989. – 60 с.

4. Дьяконов А. И, Байдов Р. К., Кузьменко Ю. Д. Типы локальных структур геосинклинальной и переходной областей. // Тектоника Сибири. Т. V. – М.: Наука, 1972. – С. 149-153.

5. Ефремов Г. М. Тектоническая структура Северо-Западного Кавказа и история ее формирования. // Тр. Новочер. Полит. Ин-та. – 1948. – Т. XVII (XXXI). – С. 27-38.

6. Козлов А. Л. Черноморское побережье в районе Сочи и низовья р. Мзымты. // Экск. По Кавказу. Черноморское побережье. ОНТИ НКТП СССР. – 1937. – С. 26-44.

7. Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. – М.: Изд. МГУ, 1963. – С. 356.

8. Паталаха Е.И., Слепых Ю.Ф. Пересекающаяся складчатость. – М.: Недра, 1974. – С. 118.

9. Расцветаев Л. М. Горный Крым и Северное Причерноморье. // В кн.: Разломы и горизонтальные движения горных сооружений СССР. – М.: Наука, 1977. – С. 95-114.

10. Сорский А.А. Типы геосинклинальной складчатости Кавказа и условия их формирования. // Складчатые области Евразии. – М.: Наука, 1964. – С. 303-317.

11. Терехов А. А., Маношина К. И., Москаленко Э. П. О продолжении структур Северо-Западного Кавказа во впадину Черного Моря. // Геотектоника. – 1973. – № 1. – С. 113-120. 12. Шарданов А. Н., Борукаев Ч. Б. Тектоника Западного Кавказа. // Геология СССР. Т. IX. – М.: Недра, 1968. – С. 595-606.

13. Шемпелев А.Г. О глубинном выражении Главного Кавказского надвига. // Геотектоника. – 1978. – № 6. – С. 57-65.

14. Шолпо В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. – М.: Недра, 1978. – С. 176.

15. Gamkrelidze I. P., Giorgobiani. T. V. Kinematics of the Alpine deformation of the Caucasus and adjacent areas. // Mechanics of Jointed and Faulted Rock. – Roterdam. – 1990. – Pp. 183-186.

16. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active Deep Faults Map and Catalogue for the Territory of Georgia. // Bulletin of the Georgian Academy of Sciences. – 1998. – Vol. 157. No. 1. – Pp. 80-85.

17. Giorgobiani T. Condition of formation of the Alpine structure of the North-Western Caucasus. // Geologica Balcanica. 1995. – No. 25. – Pp. 27-34.

18. Giorgobiani T., Basheleishvili L., Zakaraia D. The Northwest Drift of the Gondwanian Lithospheric Plates and Geodynamics of the Formation of the Caucasian Orogen. // Jurnal of African Earth Sciences. – 1998. – No. 27. 1A. – Pp. 88-89.

19. 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. – V. 1. – Pp. 39-41.

20. 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.

References

1. Belousov V.V., Troshikhin B.M. A brief geological sketch of the region of the Pshekha and Belaya rivers in the North-West Caucasus. Zap. VMO. 1937. Part 66. Issue 4. pp. 796–824. (In Russ.)

2. 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.)

3. Giorgobiani T.V. Zakaraya D.P. The folded structure of the Northwest Caucasus and the mechanism of its formation. Tbilisi, Metsnireba Publishing House, 1989. 60 p. (In Russ.)

4. D'yakonov A.I, Baidov R.K., Kuz'menko Yu.D. Types of local structures of the geosynclinal and transitional regions. Tectonics of Siberia. Vol. V. Moscow, Nauka, 1972. pp. 149–153. (In Russ.)

5. Efremov G.M. The tectonic structure of the Northwest Caucasus and the history of its formation. Proceedings of Novocherkassk Political Institute. 1948. Vol. XVII (XXXI). pp. 27–38. (In Russ.)

6. 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.)

7. Milanovskii E.E., Khain V.E. Geological structure of the Caucasus. Moscow, Publishing House Moscow State University, 1963. 356 p. (In Russ.)

8. Patalakha E.I., Slepykh Yu.F. Intersecting folding. M. Nedra, 1974. 118 p. (In Russ.)

9. Rastsvetaev L.M. Mountain Crimea and the Northern Black Sea Region. In the book: Faults and horizontal movements of mountain structures of the USSR. M. Nauka, 1977. pp. 95–114. (In Russ.)

10. Sorskii A.A. Types of geosynclinal folding of the Caucasus and the conditions for their formation. Folded areas of Eurasia. M. Nauka, 1964. pp. 303-317. (In Russ.)

11. Terekhov A.A., Manoshina K.I., Moskalenko E.P. On the continuation of the structures of the Northwest Caucasus into the depression of the Black Sea. Geotectonics. 1973. No. 1. pp. 113–120. (In Russ.)

12. Shardanov A.N., Borukaev Ch.B. Tectonics of the Western Caucasus. Geology of the USSR. Vol. IX. M. Nedra, 1968. pp. 595-606. (In Russ.)

13. Shempelev A.G. On the deep expression of the main Caucasian thrust. Geotectonics. 1978. No. 6. pp. 57–65. (In Russ.)

14. Sholpo V.N. Alpine geodynamics of the Greater Caucasus. M. Nedra, 1978. 176 p. (In Russ.)

15. Gamkrelidze I.P., Giorgobiani. T.V. Kinematics of the Alpine deformation of the Caucasus and adjacent areas. Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Roterdam. 1990. pp. 183–186.

16. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active Deep Faults Map and Catalogue for the Territory of Georgia. Bulletin of the Georgian Academy of Sciences. 1998. Vol. 157. No. 1. pp. 80–85.

17. Giorgobiani T. Condition of formation of the Alpine structure of the North-Western Caucasus. Geologica Balcanica. 1995. No. 25. pp. 27–34.

18. Giorgobiani T., Basheleishvili L., Zakaraia D. The Northwest Drift of the Gondwanian Lithospheric Plates and Geodynamics of the Formation of the Caucasian Orogen. Jurnal of African Earth Sciences. 1998. No. 27. 1A. pp. 88–89.

19. 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.

20. 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.

— ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА 😑

VДК 550.34.013.4 DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36485</u>

Обзорная статья

Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики

В.Б.Свалова 厄, к. ф.-м. н.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, 101000, Москва, Уланский переулок, 13, к. 2, e-mail: v-svalova@mail. ru

Статья поступила: 23 июля 2019, доработана: 18 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Проблема формирования и эволюции геологических структур является одной из важнейших в тектонике и геодинамике. Связь поверхностных структур с глубинными движениями в литосфере и астеносфере всегда остается в центре исследований геологов и геофизиков. Объектом исследования является геодинамика Кавказского региона, являющегося сложной высоконапряженной геодинамической структурой, характеризующейся повышенным тепловым потоком, высокой сейсмичностью, магматизмом и вулканизмом. Геодинамика Кавказского региона определяется коллизией Евразийской и Аравийской литосферных плит, а также сложной историей развития Альпийско-Гималайского пояса. С точки зрения глубинной геодинамики Кавказ входит в одну из наиболее активных зон коллизии литосферных плит, характеризующихся значительными скоростями горизонтальных и вертикальных движений. Цель работы – установление условий формирования и эволюции геологических структур в различных сложных геодинамических обстановках. Методы исследования: механико математическое моделирование, геолого геодинамическая реконструкция, сейсмотомография. Решение задачи анализируется на примере геодинамики Кавказского региона. Результаты механико-математического моделирования хорошо подтверждаются данными геолого-геодинамической реконструкции и сейсмотомографии. Механико-математическое моделирование дает возможность изучать эволюцию геологической структуры в динамике, в то время как геофизика и сейсмотомография дают глубинный разрез слоев в настоящий момент времени. Результаты работы. Разработано решение обратной задачи геодинамики прямым методом. Решена первая обратная задача геодинамики – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности. Поставлена и решена вторая обратная задача геодинамики – определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности. Практическая значимость работы. Полученные решения могут использоваться для анализа глубинных геодинамических проблем, а совместно с геотермическим моделированием, геолого-геофизическими методами и сейсмотомографией могут служить надежным аппаратом изучения глубинной геодинамики в связи с формированием и эволюцией геологических структур. Сравнительный анализ различных подходов и решений дает возможность с большей надежностью делать выводы о глубинных механизмах движений и их проявлении на поверхности Земли и обосновать наиболее вероятные причины формирования и эволюции различных геологических структур и процессов.

Ключевые слова: геотермия, сейсмичность, геодинамика, Кавказ, моделирование, сейсмотомография.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-47-02010, «Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India») и темы НИР (№ 0142-2014-0027 «Развитие теории и методов изучения новейшей тектоники и современной геодинамики платформенных и орогенных территорий применительно к оценке их безопасности»).

Для цитирования: Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 77-93. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36485.

= GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36485.

Review

Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics

V.B. Svalova

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, 13 Ulansky pereulok building 2, Moscow 101000, Russian Federation, e-mail: v-svalova@mail.ru

Received 23 July 2019; revised 18 September 2019; accepted 24 September 2019.

Abstract: Relevance. The problem of the formation and evolution of geological structures is one of the most important in tectonics and geodynamics. Interrelation of surface structures and deep movements in the lithosphere and asthenosphere always is in the focus of geologists' and geophysicists' research. The object of the study is the geodynamics of the Caucasus region characterized by increased heat flow, high seismicity, magmatism and volcanism. The geodynamics of the region is caused by the collision of the Eurasian and Arabian lithospheric plates, as well as the complex history of the Alpine-Himalayan belt evolution. In the context of a deep geodynamics, the Caucasus is one of the most active zones of collision of lithospheric plates, characterized by significant speeds of horizontal and vertical movements. Aim. Identification of the conditions for the formation and evolution of geological structures in various complex geodynamic settings. Methods: mechanical and mathematical modeling, geological and geodynamic reconstruction, seismotomography. The problem solution is analyzed by the example of geodynamics of the Caucasus region. The results of mechanical and mathematical modeling are well confirmed by the data of geological and geodynamic reconstruction and seismotomography. Mechano-mathematical modeling makes it possible to study the evolution of a geological structure in dynamics, while geophysics and seismotomography give a deep section of the strata in the present state. Results. A solution of geodynamics inverse problem by the direct method is developed. The first inverse problem of geodynamics (the restoration of the velocity, pressure and stress fields at the depth of the lithosphere from the available data on the velocities on the day surface) is solved. The second inverse problem of geodynamics (the determination of the movement of boundaries at the depth of the lithosphere by the given movements of the day surface) is posed and solved. Practical significance. The obtained solutions can be used for the analysis of deep geodynamic problems; and together with geothermal modeling, geological and geophysical methods and seismotomography they can serve as a reliable instrument for studying deep geodynamics in connection with the formation and evolution of geological structures. A comparative analysis of various approaches and solutions makes it possible to draw more reliable conclusions about the underlying mechanisms of movements and their manifestation on the Earth's surface; it can also explain the most probable reasons for the formation and evolution of various geological structures and processes.

Keywords: geothermy, seismicity, geodynamics, Caucasus, modeling, seismic tomography.

Acknowledgments: This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, (project No. 19-47-02010, "Natural hazards and monitoring for research in Russia and India") and research topics (No. 0142-2014-0027 "Development of the theory and methods of studying the latest tectonics and modern geodynamics of platform and orogenic territories in relation to the assessment of their safety").

For citation: Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. 9(3): 77-93. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485.

1. Введение

Проблема формирования и эволюции геологических структур является одной из важнейших в тектонике и геодинамике. Связь поверхностных структур с глубинными движениями в литосфере и астеносфере всегда остается в центре исследований геологов и геофизиков. Анализ геолого-геофизических данных по развитию Кавказского региона в рамках Альпийско-Гималайского пояса приводит к выводу, что Кавказ может рассматриваться как один из наиболее напряженных и геодинамически активных сегментов глобальной структуры, характеризующийся повышенным тепловым потоком, высокой сейсмичностью, магматизмом и вулканизмом [Гончаров и др., 2015; Милюков и др., 2015; Svalova et al., 2019; Уломов и др., 2007], (рис. 1, 2).



© Уломов В.И. Сейсмичность // Национальный атлас России. Том 2. Природа. Экология. 2004. С. 56-57.

Puc. 1. Карта сейсмичности России и сопредельных территорий. Автор Уломов В. И. / Fig. 1. Map of the seismicity of Russia and adjacent territories. Author Ulomov V.I.



Рис. 2. Сейсмичность Кавказа и фрагменты карт ОСР-97 – общего сейсмического районирования Российской Федерации. На карте сейсмичности эллипсами изображены очаги землетрясений

с M=6,8 и более, кружками – от M=6,7 до M=3,5. На картах OCP-97 (А, В, С) показаны зоны разной сейсмической интенсивности (в баллах), в пределах которых допускается превышение сейсмического эффекта в течение 50-тилетних интервалов времени с различной вероятностью – 10%, 5% и 1%, соответственно [Уломов и др., 2007]. /

Fig. 2. Seismicity of the Caucasus and fragments of maps OSR-97 - the general seismic zoning of the Russian Federation. On the seismicity map, the ellipses show the sources of earthquakes with M = 6.8 or more, circles – from M = 6.7 to M = 3.5. On the maps OSR-97 (A, B, C) zones of different seismic intensity (in points) are shown, within which the seismic effect can be exceeded for 50-year intervals with different probabilities – 10%, 5% and 1%, respectively [Ulomov et al., 2007].

2. Геодинамика Кавказского региона

С точки зрения глубинной геодинамики Кавказ входит в одну из наиболее активных зон коллизии литосферных плит, характеризующихся значительными скоростями горизонтальных и вертикальных движений (рис. 3).



Рис. 3. Геодинамика Кавказского региона. Черными стрелками указано направление перемещения различных структур, белыми – реакция Скифско-Туранской платформы на сжимающие усилия со стороны Аравийской литосферной плиты (крупная стрелка) и альпийских структур Иран – Кавказ – Анатолийского региона. Профили (полосы): 1 – Кипр – Кавказ, протяженность 1870км; 2 – Анатолия – Эльбурс, 2270км: 3 – Эльбурс – Туран, 1520км; 4 – Крым – Копетдаг, 2500км; 5 – Южный Тянь-Шань, 2520км. Около некоторых из очагов проставлены даты их проявления. Черным цветом закрашены очаги землетрясений, произошедших позже 1900 г. [Уломов и др., 2007]. /

Fig. 3. Geodynamics of the Caucasus region. Black arrows indicate the direction of movement of various structures, white arrows show the reaction of the Scythian-Turan platform to compressive forces from the Arabian lithosphere plate (large arrow) and alpine structures Iran-Caucasus-Anatolia region. Profiles (stripes): 1 – Cyprus – Caucasus, length 1870 km; 2 – Anatolia – Elburs, 2270 km: 3 – Elburs – Turan, 1520 km; 4 – Crimea – Kopetdag, 2500 km; 5 – Southern Tien Shan, 2520 km. About some of the foci are marked with the dates of their manifestation. The foci of earthquakes that occurred later than 1900 are shaded in black [Ulomov et al., 2007].

Поле скоростей Северного Кавказа характеризуется горизонтальным смещением в северо-восточном направлении со скоростью 26-28 мм/год. Относительно неподвижной Евразии выявлено общее сжатие региона со скоростью 1-2 мм/год, которое является источником современной геологической и сейсмической активности в пограничной области Кавказа и Восточно-Европейской платформы.

Современные вертикальные движения Северо-Кавказского региона характеризуются небольшими вертикальными движениями 2,5 мм/год в равнинной части Осетии, наибольшими для региона скоростями подъема порядка 3,5-4,5 мм/год в горной части Северного Кавказа и умеренным устойчивым подъемом 2,9 мм/год в северной части северного склона Большого Кавказа. [Милюков и др., 2015].

Согласно геодинамическим представлениям, на месте Большого Кавказа 35 млн лет назад существовал глубоководный бассейн шириной около 200 км. При постепенном закрытии его борта сближались до полного столкновения около 11 млн лет назад, после чего регион стал испытывать постоянное воздымание. При сжатии вещество литосферы образовало горный пояс с толщиной коры 45-50 км и толщиной литосферы до 250 км. В дальнейшем 5-10 млн лет назад Большой Кавказ стал быстро подниматься, а на его оси возникли вулканы Эльбрус, Казбек и др. [Хаин, Ломизе, 2005].

Видимо, это связано с подъемом астеносферы вследствие сжатия и гравитационной неустойчивости. Возможно, ситуацию можно сравнить с развитием задугового спрединга, когда горячий мантийный диапир прорывается сквозь литосферу к земной поверхности и формирует задуговый бассейн [Шарков, Свалова, 1989] (рис. 4).

В структуру Альпийского пояса входят отдельные морские впадины, осадочные бассейны и горные образования. Над поднимающимися мантийными диапирами на земной поверхности могут формироваться структуры сводового поднятия, осадочного бассейна или излияния базальтов в зависимости от стадии подъема диапира и его энергетики [Свалова, 2014]. При этом между отдельными диапирами формируются зоны сжатия, ведущие к горообразованию и утолщению коры. Так впадины западного сектора Альпийско-Гималайского пояса (Альборанская, Балеарская, Тирренская, Лигурийская, Паннонская, Ионическая, Черное море, Прикаспийская, Средне- и Южно- Каспийская) можно связать с поднимающимися мантийными диапирами, а Кавказ не только с зоной коллизии литосферных плит, но и с зоной столкновения потоков литосферы от двух мантийных диапиров под впадинами Черного и Каспийского морей.



Рис. 4. Структура западной части Альпийско-Гималайского пояса. 1 – моря (А – Альборанское, Б – Балеарское, К – Каспийское, Т – Тирренское, Ч – Черное, Э – Эгейское). 2 – Паннонская впадина. 3 – вулканические дуги. 4 – ареалы базальтового вулканизма. 5 – фронтальные зоны крупнейших надвиговых структур [Шарков, Свалова, 1989]. /

Fig. 4. The structure of the western part of the Alpine-Himalayan belt. 1 - seas (A - Alboran, B - Balearic, K - Caspian, T - Tyrrhenian, Y - Black, $\Im - Aegean$). 2 - Pannonian hollow. 3 - volcanic arcs. 4 - areas of basaltic volcanism. 5 - frontal zones of the largest thrust structures [Sharkov, Svalova, 1989].



Рис. 5. Сейсмотомография латеральных неоднородностей литосферной мантии под континентами. Показаны положительные и отрицательные отклонения скорости поперечных волн. (Ж. Поупине). Максимальные скорости приурочены к древним ядрам кратонов. Кавказскому региону соответствуют минимальные скорости [Хаин, Ломизе, 2005]. /

Fig. 5. Seismotomography of lateral heterogeneities of the lithospheric mantlebeneath the continents. Positive and negative shear wave velocity deviations are shown. (J. Pupine). Maximum speeds are confined to the ancient craton nuclei. The Caucasus region corresponds to minimum speeds [Khain, Lomize, 2005].

Сложное напряженно-деформированное состояние литосферы Кавказа выражается в наличии разломов, трещиноватости пород, проявлении магматизма и вулканизма, высокой сейсмичности, повышенного теплового потока, гидротермальной активности, а также подтверждается данными сейсморазведки и сейсмотомографии (рис. 5, 6).

3. Геотермия Кавказского региона

Значение плотности теплового потока является показателем геодинамической активности структур литосферы. Сравнение плотности теплового потока с мощностью земной коры дает неоднозначные результаты. Для отдельных блоков коры существует прямая связь этих параметров, для других же – обратная. Примером обратной связи может быть котловина Черного моря с тонкой земной корой. В этой структуре отмечаются низкие значения теплового потока (30-40 мВт/м²) при малой мощности земной коры [The Global Heat Flow Database...]

Другая ситуация с высоким тепловым потоком наблюдается в орогенных областях с мощной земной корой, например, в Гималаях, мегантиклинории Большого Кавказа и др. (рис. 7, 8).



9 (3) 2019

Рис. 6. Профиль микросейсмического зондирования Кавказа до глубины 60км. Фиксируется разуплотненное тело до глубины Мохо и глубже. Показаны положительные (темные) и отрицательные (светлые) отклонения скорости поперечных волн. [Рогожин и др., 2015]. / Fig. 6. Profiles of microseismic sounding of the Caucasus to a depth of 60 km. The decompressed body is fixed to the depth of Moho and deeper. Positive (dark) and negative (light) deviations of the shear wave velocity are shown. [Rogozhin et al., 2015].

Кавказский регион характеризуется сложным и сильно дифференцированным тепловым полем. Пониженные потоки соответствуют предгорным и межгорным прогибам, повышенные складчатым зонам. Среднее значение теплового потока для складчатой области Кавказа составляет 78 мВт/м².

Характер теплового поля Кавказского региона хорошо коррелируется с особенностями его геологического строения и истории развития. Зоны складкообразования и проявления молодого вулканизма выделяются высокими тепловыми потоками. Предгорным и межгорным прогибам соответствуют в основном низкие тепловые потоки.

В прогибах значительное влияние на характер теплового поля оказывает строение осадочного чехла и структура фундамента (рис. 7, 8).

4. Обратная задача геодинамики

Мантийный диапиризм и подъем мантийных плюмов выражают явление гравитационной неустойчивости на границе астеносфера-литосфера и особенно ярко проявляются в периоды тектоно-магматической активизации. Поднимающиеся астеносферные массы и связанные с ними потоки тепла являются ключом к пониманию процессов формирования и эволюции земной коры, а также процессов нефтегазоносности.

Движение астеносферы отражается в поверхностных геофизических полях – геотермическом, гравитационном, электромагнитном. Наличие расплавленных астеносферных масс подтверждается сейсмическими данными, в том числе сейсмотомографией.

Движение дневной поверхности над поднимающимся мантийным диапиром фиксируется сменой режимов осадконакопления и строением осадочного чехла. Подъем диапира отражается в рельефе дневной поверхности, строении фундамента и форме границ Мохо и Конрада.



Рис. 7. Карта теплового потока Северного Кавказа. М-б 1:5000000 [Моисеенко, Негров. 1993]). 1 – станции определения теплового потока: а – единичные, б – групповые; 2 – изолинии теплового потока, мВт/м²: а – достоверные, б – предполагаемые; 3 – границы структур; 4 – региональные разломы; 5 – Тырныаузская шовная зона; 6 – надвиги; 7 – вулкан Эльбрус; 8 – значения теплового потока, мВт/м². /

Fig. 7. Map of the heat flow of the North Caucasus. M-b 1: 5000000 [Moiseenko, Negrov, 1993]).
1 – stations for determining the heat flux: a – single, b – group; 2 – isolines of the heat flux, mW/m²: a – reliable, b – estimated; 3 – boundaries of structures; 4 – regional faults; 5 – Tyrnyauz suture zone; 6 – thrusts; 7 – volcano Elbrus; 8 – heat flow values, mW/m².



Рис. 8. Сейсмический разрез земной коры Приэльбрусья (составил А.Г. Гаркави, 1988).

1 – границы раздела в земной коре; 2 – зоны нарушений по сейсмическим данным; 3 – слой частичного плавления; 4 – тепловой поток; 5 – изотермы. /

Fig. 8. A seismic section of the crust of the Elbrus region (compiled by A. G. Garkavi, 1988). 1 – interface in the earth's crust; 2 - zones of violations according to seismic data; 3 - layer of partial

melting; 4 – *heat flow;* 5 – *isotherms.*

Анализ всех имеющихся геолого-геофизических данных позволяет построить термомеханическую модель эволюции литосферы над поднимающимся мантийным диапиром на основе модели многослойной высоковязкой несжимаемой жидкости. Анализ полученных решений показывает, что в зависимости от соотношения между определяющими параметрами задачи (вязкости, плотности и толщины слоев, формы диапира и скорости его подъема) на дневной поверхности могут формироваться структуры сводового поднятия или депрессии [Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002].

Если скорость подъема диапира достаточно велика или диапир поднялся близко к поверхности, то над ним формируется сводовое поднятие. Если скорость подъема невелика при достаточно толстой литосфере, то формируется структура депрессии. Глубина погружения фундамента осадочного бассейна определяется механическими, геотермическими и петрологическими факторами. При достаточной мантийной активности возможна дальнейшая смена режима прогибания на режим формирования сводового поднятия и даже излияния базальтов [Свалова, 2014].

Общая картина движений может осложняться наличием фоновых горизонтальных движений. При аналитическом решении задачи удается найти критические параметры, связывающие динамику мантийных движений с эволюцией рельефа поверхности. Построение законченной геодинамической и термомеханической модели дает возможность рассчитать поля температур и напряжений в процессе эволюции геологических структур и оценить параметры нефтегазогенерации (температурновременной индекс, окно нефтегазогенерации, термонапряжения) в динамике.

В этой связи особый интерес представляет решение обратной задачи геодинамики, когда по геолого-геофизическим данным на поверхности удается прогнозировать движение вещества на глубине.

Существует два стандартных метода решения обратных задач – метод регуляризации, когда на параметры решения накладываются дополнительные ограничения, и метод подбора, когда обратная задача решается методом решения многих прямых задач.

На основе использования асимптотических методов предлагается прямой метод решения обратной задачи геодинамики, когда использование надежных геолого-геофизических данных и скоростей на поверхности дает возможность однозначно прогнозировать движение вещества и распределение напряжений на глубине литосферы.

Рассмотрим слой высоковязкой несжимаемой жидкости, описывающей поведение вещества литосферы с помощью уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \overline{F} - \frac{1}{\rho} gradp + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v} \tag{1}$$

$$div\,\vec{v}\,=0\tag{2}$$

где \vec{v} – вектор скорости, F – сила тяжести, p – давление, r – плотность, μ – вязкость, t – время.

Пусть характерный размер моделируемых структур по латерали L значительно превосходит характерную толщину слоя h.

Введем безразмерные значения координат, скоростей и давления X, Y, Z, U, V, W, P:

$$x = LX, y = LY, z = hZ, u = u_0 U, v = u_0 V, w = u_0 (h/L) W, p = r_0 ghP.$$
(3)

Тогда используя уравнение неразрывности и приближенное уравнение Навье-Стокса для достаточно медленных движений в тонком слое можно получить в безразмерном виде для двумерного случая [Занемонец (Свалова) и др., 1974; Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002; Свалова, Шарков, 1991, 1992; Шарков, Свалова, 1991; Sharkov, Svalova, 2011; Свалова, 2014; Гончаров и др., 2015]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{X}} = \alpha \mu \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial \mathbf{Z}^2} \\ \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{Z}} = -\rho \end{cases}$$
(4)

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \tag{5}$$

$$\alpha = \frac{F}{R\left(\frac{h}{L}\right)^{3}}, F = \frac{u_{0}^{2}}{gL}, R = \frac{u_{0}L\rho_{0}}{\mu_{0}},$$
(6)

где P – безразмерное давление, U, W – безразмерные скорости, F – число Фруда, R – число Рейнольдса, r – плотность, μ – вязкость, ρ_0 , μ_0 , u_0 – характерный масштаб плотности, вязкости и скорости.

Пусть на верхней границе поле сил равно нулю (свободная поверхность). Также пусть задано поле скоростей U^* , W^* на верхней границе моделирования ς^* . Тогда можно найти распределение скоростей и давлений в слое:

$$\mathbf{P} = \rho(\boldsymbol{\varsigma}^* - \boldsymbol{Z}) \tag{7}$$

$$U = U^* + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \frac{\partial \varsigma^*}{\partial X} (\varsigma^* - Z)^2$$
(8)

$$W = W^* + \frac{\partial U^*}{\partial X} (\varsigma^* - Z) + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \left[\frac{\partial^2 \varsigma^*}{\partial X^2} \frac{1}{3} (\varsigma^* - Z)^3 + \left(\frac{\partial \varsigma^*}{\partial X} \right)^2 (\varsigma^* - Z)^2 \right]$$
(9)

Таким образом, по известным скоростям на поверхности определены скорости и давления на глубине, что дает возможность получить поля напряжений в слое. Полученное решение назовем решением первой обратной задачи геодинамики – нахождение скоростей, давлений и напряжений вещества на глубине по известным скоростям движения дневной поверхности.

На верхней границе должно также выполняться кинематическое условие свободной поверхности, означающее, что точки поверхности не покидают ее в процессе движения:

$$S\frac{\partial\varsigma^*}{\partial t} + U^*\frac{\partial\varsigma^*}{\partial X} - W^* = 0$$
⁽¹⁰⁾

$$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{u}_0 \mathbf{t}_0},\tag{11}$$

где S – число Струхаля. t_0 – характерный масштаб времени.

Аналогично можно рассмотреть нижнюю границу моделирования как поверхность, точки которой остаются на ней в процессе эволюции (условие непротекания). Тогда, подставляя скорости, получаем уравнение движения нижней границы с.:

$$S\frac{\partial\varsigma_{*}}{\partial t} - W^{*} + U^{*}\frac{\partial\varsigma_{*}}{\partial X}(\varsigma^{*} - \varsigma_{*}) + \frac{\rho}{2\alpha\mu}\left[\frac{\partial\varsigma_{*}}{\partial X}\frac{\partial\varsigma^{*}}{\partial X}(\varsigma^{*} - \varsigma_{*})^{2} - \frac{\partial^{2}\varsigma^{*}}{\partial X^{2}}\frac{1}{3}(\varsigma^{*} - \varsigma_{*})^{3} - \left(\frac{\partial\varsigma^{*}}{\partial X}\right)^{2}(\varsigma^{*} - \varsigma_{*})^{2}\right] = 0$$
(12)

Данное уравнение представляет собой прямое решение обратной задачи, когда рельеф дневной поверхности и скорости на ней определяют движение глубинных границ. Аналогичное уравнение может быть написано для любой вещественной границы на глубине, через которую отсутствует поток вещества. Назовем данное решение решением второй обратной задачи геодинамики – определение движения границы на глубине по известным скоростям поверхностных движений.

Таким образом, задавая движение дневной поверхности, мы получили скорости, давления, напряжения вещества на глубине и уравнение движения глубинных границ.

Некоторые выводы о структуре глубинных движений по известным скоростям и рельефу поверхности можно сделать, анализируя различные геологические структуры и обстановки и возможные поверхностные скорости.

Задача 1. Осадочный бассейн в условиях растяжения.

Дневная поверхность является вогнутой, т.е.:

$$\frac{\partial^2 \varsigma^*}{\partial X^2} > 0. \tag{13}$$

$$SgnU^* = SgnX \tag{14}$$

Анализ решения показывает, что U растет с глубиной и с gradV^{*}. W соответствует восходящему потоку на глубине.

Задача 2. Осадочный бассейн в условиях сжатия. Дневная поверхность является вогнутой, т.е.:

$$\frac{\partial^2 \varsigma^*}{\partial X^2} > 0. \tag{15}$$

$$SgnU^* = -SgnX. \tag{16}$$

Анализ решения показывает, что существует критическая глубина, где горизонтальное сжатие сменяется растяжением:

$$\varsigma_* = \varsigma^* - \sqrt{-\frac{U^*}{\frac{\rho}{2\alpha\mu}\frac{\partial\varsigma^*}{\partial X}}}$$
(17)

Вертикальная скорость W может быть положительной или отрицательной в зависимости от соотношения между параметрами задачи.

Задача 3. Ороген в условиях растяжения. Верхняя граница выпукла, т.е.:

$$\frac{\partial^2 \varsigma^*}{\partial X^2} < 0. \tag{18}$$

$$SgnU^* = SgnX. \tag{19}$$

Следовательно, существует критическая глубина, где растяжение сменяется сжатием:

$$\varsigma_* = \varsigma^* - \sqrt{-\frac{U^*}{\frac{\rho}{2\alpha\mu}\frac{\partial\varsigma^*}{\partial X}}}$$
(20)

Анализ величины W показывает возможный нисходящий поток в центре структуры на глубине. Если же растяжение на поверхности достаточно интенсивное, то на глубине возможен восходящий поток вещества.

Задача 4. Ороген в условиях сжатия. Верхняя граница выпукла, т.е.:

$$\frac{\partial^2 \varsigma^*}{\partial X^2} < 0. \tag{21}$$

$$SgnU^* = -SgnX. \tag{22}$$

В этом случае сжатие наблюдается во всем слое. Нисходящий поток вещества с большой вероятностью существует на глубине.

Следовательно, осадочный бассейн в условиях растяжения и ороген в условиях сжатия являются более стабильными и вероятными структурами, чем бассейн при сжатии и ороген при растяжении. Вывод представляется достаточно естественным, что говорит о корректности модели и возможности ее дальнейшего развития и применения.



Рис. 9. Схематический разрез Кавказского региона на основе механико-математического моделирования.

D – дневная поверхность, М – граница Мохо, А – поверхность астеносферы, К – кора, ML – мантийная литосфера, МК – малый Кавказ, БК – Большой Кавказ, ЗП – Закавказский прогиб. Стрелки – возможные направления движения вещества. /

Fig. 9. A schematic section of the Caucasus region based on mechanical and mathematical modeling. D is the day surface, M is the Moho boundary, A is the surface of the asthenosphere, K is the crust, ML is the mantle lithosphere, MK is the Lesser Caucasus, BC is the Greater Caucasus, and ZP is the Transcaucasian trough. Arrows – the possible direction of motion of the substance.



Рис. 10. Схематическая карта Кавказского региона. а) Предкавказский прогиб, b) осадочные бассейны, c) ороген, d) Скифская плита. Указано положение разреза на рисунке [Gee, Zeyen, 1996].





Рис. 11. Схематический разрез Кавказского региона. Положение разреза указано на рисунке 10 [Gee, Zeyen, 1996]. /

Fig. 11. A schematic section of the Caucasus region. The position of the section is shown in Figure 10 [Gee, Zeyen, 1996].



Рис. 12. Распределение кайнозойского вулканизма на территории Кавказского региона и сечение сейсмотомографического профилирования на рисунке 13 [Koulakov et al., 2012]. /
 Fig. 12. The distribution of Cenozoic volcanism in the Caucasus region and the cross section of seismotomographic profiling in Figure 13 [Koulakov et al., 2012].



Рис. 13. Вертикальное сейсмотомографическое сечение Кавказского региона по разрезу на Рис. 12 МК, БК – Малый и Большой Кавказ соответственно. ЗП – область Закавказского межгорного прогиба. Наверху рельеф над профилем [Koulakov et al., 2012]. /

Fig. 13. The vertical seismic tomographic section of the Caucasus region along the section in Fig. 12 MK, BK – Small and Big Caucasus, respectively. ZP is the region of the Transcaucasian intermountain trough. At the top there is a relief above the profile [Koulakov et al., 2012]. Так, на основе анализа полученных соотношений можно говорить о наличии нисходящих движений в литосфере и погружении подошвы литосферы под горными структурами, что может иметь место в случае Кавказа.

Таким образом, в регионе Кавказа на подошве литосферы должны существовать нисходящие потоки вещества и погружение литосферы (рис. 9).

5. Обсуждение и выводы

Таким образом, предложено и разработано решение обратной задачи геодинамики прямым методом. Решена первая обратная задача геодинамики – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности. Поставлена и решена вторая обратная задача геодинамики – определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности. Полученные решения могут использоваться для анализа глубинных геодинамических проблем, а совместно с геотермическим моделированием, геолого-геофизическими методами и сейсмотомографией могут служить надежным аппаратом изучения глубинной геодинамики геологических структур и прогноза нефтегазоносности.

Вместе с тем, коллизия литосферных плит определяется и коллизией глубинных астеносферных потоков. Плиты перемещаются за счет движений в астеносфере. Геодинамика зоны коллизии астеносферных потоков определяется соотношением плотности, вязкости и температуры слоев литосферы и астеносферы. Этими же соотношениями определяется, насколько интенсивно литосферная плита перекрывает подъем астеносферы и с какой скоростью астеносферный диапир поднимается в зоне коллизии, формируя структуру задугового спрединга или утолщения астеносферы и подъема литосферы. Сложная геодинамическая картина определяется соотношением геолого-геофизических параметров и внешними ограничивающими факторами для скоростей и движений на сферической поверхности Земли и в ее глубинах.

Интересно сравнить результаты механико-математического моделирования с данными геолого-геодинамической реконструкции и сейсмотомографии (рис. 10-13).

Следует понимать, что геофизика и сейсмотомография дают глубинный разрез в настоящий момент времени, в то время как механико-математическое моделирование позволяет изучать эволюцию структуры в динамике. Сравнительный анализ различных подходов и решений дает возможность с большей надежностью делать выводы о глубинных механизмах движений и их проявлении на поверхности Земли и обосновать наиболее вероятные причины формирования и эволюции различных геологических структур и процессов.

Литература

1. Гончаров М. А., Короновский Н. В., Свалова В. Б., Разницин Ю. Н. Вклад мантийного диапиризма в процесс формирования новообразованных впадин Средиземноморья и Карибского бассейна и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов. // Геотектоника. – 2015. – № 6. – С. 80-93.

2. Занемонец (Свалова) В. Б., Котелкин В. Д., Мясников В. П. О динамике литосферных движений. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1974. – №4 – С. 43-54.

3. Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. // Геотектоника. – 2015. – № 3. – С. 56-65.

4. Моисеенко У.И., Негров О.Б. Геотермические условия Северо-Кавказской сейсмоопасной зоны. // В кн.: Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 32-40.

5. Рогожин Е. А., Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Овсюченко А. Н., Андреева Н. В., Харазова Ю. В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данныхо глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36-49.

6. Свалова В.Б. Механико-математическое моделирование формирования и эволюции геологических структур в связи с глубинным мантийным диапиризмом. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2014. – № 3 (20). – С. 38-42.

7. Свалова В.Б., Шарков Е.В. Формирование и эволюция задуговых бассейнов Альпийского и Тихоокеанского поясов (сравнительный анализ). // Тихоокеанская геология. – 1991. – № 5. – С. 49-63.

8. Свалова В.Б., Шарков Е.В. Геодинамика Байкальской рифтовой зоны (петрологические и геомеханические аспекты). // Геология и геофизика. – 1992. – № 5. – С. 21-30.

9. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // Физика земли. – 2007. – № 7. – С. 31-45.

10. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.

11. Шарков Е.В., Свалова В.Б. Внутриконтинентальные моря как результат задугового спрединга при коллизии континентальных плит. // Доклады Академии наук СССР. – 1989. – Т. 308. № 3. – С. 685-688.

12. Шарков Е.В., Свалова В.Б. О возможности вовлечения континентальной литосферы в процесс субдукции при задуговом спрединге. // Изв. АН СССР, сер. геол. – 1991. – № 12. – С. 118-131.

13. Gee D.G., Zeyen H.J. (editors). EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. // Uppsala University. – 1996. – 138 pp.

14. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. // Solid Earth. – 2012. – No. 3. – Pp. 327-337.

15. Sharkov E., Svalova V. Geological-geomechanical simulation of the Late Cenozoicgeodynamics in the Alpine-Mediterranean mobile belt. // New Frontiers in Tectonic Research – General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs. INTECH, Croatia. – 2011. – Pp. 18-38.

16. Svalova V.B. Mechanical-mathematical models of the formation and evolution of sedimentary basins. // Sciences de la Terre, Ser. Inf. – 1992. – No. 31. – Pp. 201-208.

17. Svalova V.B. Mechanical-mathematical simulation of geological structures evolution. // Geoinformatics. – 1993. – Vol. 4 (3). – Pp. 153-160.

18. Svalova V.B. Thermomechanical modeling of geological structures formation and evolution on the base of geological-geophysical data. // Proceedings of the Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology IAMG'97, Barcelona, Spain. – 1997. – Part 2. – Pp. 1049-1055.

19. Svalova V. Mechanical-mathematical modeling for the Earth's deep and surface structures interaction. // Proceedings of International Conference IAMG, Berlin. -2002. -5 p.

20. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landsliderisk in mountain areas. // Geology of the South of Russia. – 2019. – No. 9 (2). – Pp. 109-127.

21. The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Comission. http://www. heatflow. und. edu/

References

1. Goncharov M.A., Koronovskii N.V., Svalova V.B., Raznitsin Yu.N. The contribution of mantle diapirism to the formation of newly formed basins of the Mediterranean and the Caribbean and the surrounding centrifugal-vergent folded-overlapped orogens. Geotectonics. 2015. No. 6. pp. 80–93. (In Russ.)

2. Zanemonets (Svalova) V.B., Kotelkin V.D., Myasnikov V.P. On the dynamics of lithospheric movements. Izv. USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth. 1974. No. 4. pp. 43–54. (In Russ.)

3. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the speeds of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. Geotectonics. 2015. No. 3. pp. 56–65. (In Russ.)

4. Moiseenko U.I., Negrov O.B. Geothermal conditions of the North Caucasus seismic hazard zone. In the book: Geothermy of seismic and aseismic zones. M. Nauka, 1993. pp. 32–40. (In Russ.)

5. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. The structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. Geotectonics. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)

6. Svalova V.B Mechano-mathematical modeling of the formation and evolution of geological structures in connection with deep mantle diapirism. Monitoring. Science and technology. 2014. No. 3 (20). pp. 38–42. (In Russ.)

7. Svalova V.B., Sharkov E.V. Formation and evolution of back-arc basins of the Alpine and Pacific belts (comparative analysis). Pacific geology. 1991. No. 5. pp. 49-63. (In Russ.)

8. Svalova V.B., Sharkov E.V. Geodynamics of the Baikal rift zone (petrological and geomechanical aspects). Geology and geophysics. 1992. No. 5. pp. 21-30. (In Russ.)

9. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. To the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. Physics of the earth. 2007. No. 7. pp. 31-45. (In Russ.)

10. Khain V.E., Lomize M.G. Geotectonics with the basics of geodynamics. M. KDU, 2005. 560 p. (In Russ.)

11. Sharkov E.V., Svalova V.B. Intracontinental seas as a result of back-arc spreading during the collision of continental plates. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1989. Vol. 308. No. 3. pp. 685-688. (In Russ.)

12. Sharkov E.V., Svalova V.B. On the possibility of involving the continental lithosphere in the subduction process during back-arc spreading. Izv. USSR Academy of Sciences, geol. ser. 1991. No. 12. pp. 118–131. (In Russ.)

13. Gee D.G., Zeven H.J. (editors). EUROPROBE 1996 - Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Uppsala University. 1996. 138 pp.

14. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. Solid Earth. 2012. No. 3. pp. 327–337.

15. Sharkov E., Svalova V. Geological-geomechanical simulation of the Late Cenozoicgeodynamics in the Alpine-Mediterranean mobile belt. New Frontiers in Tectonic Research - General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs. INTECH, Croatia. 2011. pp. 18-38.

16. Svalova V.B. Mechanical-mathematical models of the formation and evolution of sedimentary basins. Sciences de la Terre, Ser. Inf. 1992. No. 31. Pp. 201-208.

17. Svalova V.B. Mechanical-mathematical simulation of geological structures evolution. Geoinformatics. 1993. Vol. 4(3). pp. 153-160.

18. Svalova V.B. Thermomechanical modeling of geological structures formation and evolution on the base of geological-geophysical data. Proceedings of the Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology IAMG'97, Barcelona, Spain. 1997. Part 2. pp. 1049–1055.

19. Svalova V. Mechanical-mathematical modeling for the Earth's deep and surface structures interaction. Proceedings of International Conference IAMG, Berlin. 2002. 5 p.

20. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landsliderisk in mountain areas. Geology of the South of Russia. - 2019. No. 9(2). Pp. 109-127.

21. The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Comission. http://www.heatflow. und.edu/

94 Geology and Geophysics of Russian South

9 (3) 2019

—— ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА 📁

VДК 551.24:031.1 (479.24) DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36484</u>

Оригинальная статья

Динамика Саатлинской сверхглубокой GPS (SATG) – станции

И.Э. Казымов, к. г.-м. н.

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

Статья поступила: 6 сентября 2019, доработана: 16 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Изучение динамики движения и взаимодействия плит, а также реологии континентальной литосферы является одной из важных фундаментальных проблем активной геотектоники. Целью работы являлось изучение геодинамики Саатлинского региона (Азербайджан) и сопоставление результатов, полученных за периоды 2015-2017 гг. на Саатлинской сверхглубокой скважине. Причиной сравнения этих периодов является их различная продолжительность. Методы исследования: методы космической геодезии. Данные GPS станций позволяют вести контроль азимутальной направленности скважины, пространственное положение ствола, определить параметры горизонтального смещения тектонических блоков, причину как вертикального, так и горизонтального смещения скважины. Результаты работы. В статье представлена методика расчета скоростей современных горизонтальных смещений земной коры вдоль Саатлинского региона за период 2015-2017 гг. в целом так и за 2015, 2016, 2017 гг. в отдельности. Почти все GPS-станции (особенно их U-компонента) представляют не только линейные вариации, но также значительные нелинейные вариации в отношении сезонных сигналов (определяемых как годовые плюс полугодовые вариации). Линейные вариации могут быть хорошо объяснены как движение пластины, тогда как можно объяснить только часть нелинейных изменений. Методы измерения скоростей вертикальных и горизонтальных перемещений предусматривают изначально получение абсолютных значений горизонтальной компоненты запад-восток, север-юг точки измерения. Особенность метода GPS состоит в том, что технически и технологически система позволяет оценивать очень малые изменения координат в фазовом методе измерений, что достигается высокой точностью и стабильностью атомных часов системы. По данным программных пакетов GAMIT/GLOBK была вычислена скорость совместного сейсмического перемещения, связанного с сейсмическим событием. Результаты анализа показали, что восточный от станции SATG_GPS блок перемещается на северо-восток со средней скоростью примерно 3-14 мм/г, тогда как западный блок смещается тоже на северо-восток, но со скоростью около 11-15 мм/г. Таким образом, была получена схема смещения базовой станции SATG_GPS Саатлинского региона. Практическая значимость работы. Прогноз тектонических движений и сеймичности.

Ключевые слова: горизонтальные движения плит, геодинамика, GPS-станции, сверхглубокие скважины

Для цитирования: Казымов И.Э. Динамика Саатлинской сверхглубокой GPS (SATG) – станции. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 94-104. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36484.

= GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36484</u>

Original paper

Dynamics of the Saatli Superdeep GPS (SATG) – Station

I.E.Kazimov

National Academy of Sciences of Azerbaijan Republican Seismic Survey Center, 123 Guseyn Javid Str., Baku1001, Azerbaijan, e-mail: sabina.k@mail.ru

Received 6 September 2019; revised 16 September 2019; accepted 24 September 2019.

Abstract: Relevance. The study of the dynamics of movement and interaction of plates, as well as the rheology of the continental lithosphere, is one of the important fundamental problems of active geotectonics. Aim. The study of the Saatli region (Azerbaijan) geodynamics and the comparison of the results obtained for the periods 2015-2017 on the Saatli superdeep well. The reason for comparing these periods is their different duration. Research methods: methods of space geodesy. GPS stations' data allows monitoring the azimuthal direction of the well, the spatial position of the wellbore, determining the parameters of the horizontal displacement of tectonic blocks, the cause of both vertical and horizontal displacement of the well. Results. A methodology for calculating the velocities of modern horizontal displacements of the Earth's crust along the Saatli region for the period 2015-2017 as a whole and for 2015, 2016, 2017 separately is presented in the article. Almost all GPS stations (especially their U-component) represent not only linear variations, but also significant non-linear variations with respect to seasonal signals (defined as annual plus half-yearly variations). Linear variations can be well explained as the plate movement, while only a fraction of non-linear changes can be explained. The methods for measuring the velocities of vertical and horizontal movements initially provide obtaining the absolute values of the horizontal component west-east, north-south of the measurement point. The feature of the GPS method consists in the fact, that technically and technologically, the system allows evaluating very small changes in the coordinates in the phase measurement method, which is achieved by a high accuracy and stability of the atomic clock of the system. Using the GAMIT / GLOBK software packages, the joint seismic displacement velocity associated with the seismic event was calculated. The analysis showed that the east block from the SATG GPS station moves to the northeast at an average speed of about 3-14 mm / year, while the western block also moves to the northeast, but at a speed of about 11-15 mm / year. Thus, the bias scheme of the base station SATG_GPS of the Saatli region was obtained. Practical significance. Prediction of tectonic movements and seismicity.

Keywords: horizontal plate movements, geodynamics, GPS stations, superdeep well.

For citation: Kazimov I.E. Dynamics of the Saatli Superdeep GPS (SATG)-Station. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 94-104. (In Russ.) DOI: 10.23671/ VNC.2019.3.36484.

Введение

Саатлинская сверхглубокая скважина СГ-1 была спроектирована в период СССР в соответствии с программой сверхглубокого бурения, проводимой Министерством Геологии СССР. Проектная глубина СГ-1 была предусмотрена 15 км. Место расположения город Саатлы, в 10 км к югу от гравитационного максимума Саатлы – Кюрдамир, где глубина поверхности предполагаемого «базальтового слоя» консолидированной коры оценивалась в 6-7 км, по данным глубинного сейсмического зондирования (DSS)с применением отраженных и преломленных (дифрагированных)волн. Бурение началось в 1977 году, и по техническим причинам было остановлено в 1982 году при глубине забоя скважины 8324 м. (рис. 1).

Несмотря на то, что Саатлинская скважина не достигла проектной глубины 15 км, вскрытый ею разрез дал много нового для понимания глубинного строения Кавказа и истории его развития. Прежде всего удалось установить, что территория Куринской впадины в



Puc. 1. Саатлинская сверхглубокая скважина. / Fig. 1. Saatli superdeep well.

Таблица. 1. / Table 1.

Разрез прослеженный скважиной СГ-1. / The section traced by Well SG-1.

№	Породы / Rocks	Стратиграфический период / Stratigraphic period	Глубина / Depth						
1	галечники, гравелиты, суглинки, супеси, пес- чаники / Gravel, Gravelite, Loam, Sandy loam, Sandstone	I, гравелиты, суглинки, супеси, пес- Gravel, Gravelite, Loam, Sandy loam, Sandstone Четвертичный период / Quaternary period							
2	глины, песчаники / Clays, Sandstone	tone Абшеронский ярус / Absheron tier							
3	глины, алевролиты / Clays, Siltstones Aгчагылский ярус / Agchageldi tier								
4	глины, песчаники, алевролиты / Clays, Sandstone, Siltstones Балакенский ярус / Balaken tier								
5	глины, песчаники, карбонатные породы / Clays, Sandstone, Carbonate rock	Поздний миоцен, Сармат / Late Miocene, Sarmatian	50 м						
6	известняки с силлами базальтов / Limestones Ранний мел – Поздняя к with basalts forces Early Cretaceous-Late Jur		710 м						
7	базальты с долеритами / Basalts with dolerite	Средняя юра / Middle Jurassic	1310 м						
8	андезито-базальты и андезиты с микро-до- леритами / Andesite-basalts and andesites with micro-dolerites	Нижняя юра / Lower Jura	1950 м						
9	андезито-дациты, дациты, риодациты, плагио- риолиты с силлами микродолеритов / Andesite- dacites, dacites, riodicity, playability with sills of microdeletion		1524 м						
Общая толщина pa3pe3a / The total thickness of the section: 8324 м									

мезозое представляла собой море, на дне которого шли бурные вулканические процессы. Огромные массы вулканических продуктов образовали сначала подводные горы, которые затем поднялись над водой и превратились в цепь вулканических островов – островную дугу. Она протягивалась примерно с юга на север в том же направлении, в котором и до настоящего времени геофизики устанавливают крупную глубинную аномалию в строении земной коры. Данные по сверхглубоким скважинам дают уникальную информацию о строении континентальной коры (табл. 1). На сегодняшний день Саатлинская сверхглубокая скважина СГ-1 занимает 8 место в списке самых глубоких скважин мира [Самые глубокие скважины мира, 2015; Thatcher, 2004].

Геодинамика

Начиная с 2012-2017 гг. с целью исследования современных движений на территории Азербайджана отделом Геодинамика Республиканского центра сейсмологической службы была установлена геодезическая сеть GPS/ГЛОНАСС, непрерывно регистрирующая станции GPS-наблюдений. Регулярные наблюдения ведутся с 2013 г. Станции оснащены приемниками TrimbleNetR9 (24) L1/L2 GPS/GLONASS/Galileo, а так же антеннами Choke Ring (10) и Zephyr geodetic² (9).

Изучение динамики движения и взаимодействия плит (т.е. первичных сил, действующих на плиты), а также реологии континентальной литосферы является одной из важных фундаментальных проблем активной геотектоники [Wessel, Smith, 1991; www. unavco. org] В настоящее время в науках о Земле господствует концепция тектоники литосферных плит. Согласно представлениям этой концепции, формирование внутренней тектонической структуры подвижных поясов (типа Альпийско-Гималайского пояса) и подвижных сооружений определяется сближением литосферных плит. Применительно к Большому Кавказу эта точка зрения подразумевает в качестве источника его деформирования приближение в субмеридиональном направлении Аравийской литосферной плиты к смежной окраине восточноевропейской части Евразийской плиты. Сближение этих плит установлено в результате GPS измерений [Thatcher, 2004; www. masterok. livejournal. com]. Предполагается, что в результате этих горизонтальных смещений кавказский сегмент Альпийско-Гималайского подвижного пояса сжимается, слои осадочных и вулканических пород сминаются в складки, блоки основания испытывают разнонаправленные смещения, а верхние горизонты коры нарушаются взбросами и надвигами. Некоторые исследователи полагают, что воздействие северного дрейфа Аравийской плиты сказывается на распределении горизонтальных напряжений в пределах Евразийской плиты на расстояние до полутора – двух тысяч километров от южного края последней [Leick, 1944; Hofmann-Wellenhof et al., 1992-1994, 2001; Седов, 1972; Шебашевич и др., 1993; Teunissen, Kleusberg, 1998; Wright et al., 2004; www. unavco. org].

Методика исследований.

Временные вариации координат глобальной системы позиционирования (GPS) широко используются при изучении высокоточной геодезии и геодинамики, таких как создание и обслуживание наземных систем отсчета, а также для мониторинга деформации земной коры. Почти все GPS-станции (особенно их U-компонента) представляют не только линейные вариации, но также значительные нелинейные вариации в отношении сезонных сигналов (определяемых как годовые плюс полугодовые вариации), наложенные против приблизительно мощности полосный фон. Линейные вариации могут быть хорошо объяснены как движение пластины, тогда как можно объяснить только часть нелинейных изменений. Фактически, нелинейные вариации были в основном вызваны неопознанными внутренними ошибками, связанными с техникой GPS и внешними немоделированными геофизи-

9 (3) 2019

ческими эффектами. Более того, это станет препятствием для анализа временных рядов и препятствует разделению немоделированных геофизических эффектов от нелинейных изменений. В качестве одного из основных источников ошибок GPS-позиционирования ионосферные задержки играют очень важную роль в обработке данных. Поскольку трудно точно моделировать затухание ионосферы, для предотвращения эффектов ионосферных задержек практически во всех программах обработки GPS-данных всегда используется линейная комбинация без ионосферы (LC), включая GAMIT [Воробьев, 2012; Губин, 2010; Казымов, 2015; Кадыров и др., 20105].

В статье представлена методика расчета скоростей современных горизонтальных смещений земной коры Саатлинского региона за период 2015-2017 гг. как в целом, так и за 2015-2017 гг. в отдельности, полученные по результатам наблюдений на стации SATG_GPS (рис. 2) [Красноперов, 2015; http://ansol. su]. Технические характеристики Базовой GPS станции указаны в таблице 2. Скорости показаны в фиксированной системе отсчета Евразии, определяемой минимизацией движений для станций SATG_GPS, которые наблюдались и широко распределены по евразийской плите. Оценка скорости станции проводилась за период 3-хлетней эксплуатации (установленной в 2013 году).

Таблица 2. / Table 2.

	-			
GPS приемник Trimble NetR9 / GPS receiver Trimble NetR9	Антенна Zephyr Geodetic ² / Antenna Zephyr Geodetic ²			
Число каналов слежения / Number of tracking	Частоты: L1/L2/L5/G1/G2/OmniSTAR			
channels: 440	SBAS/E1/E2/E5ab/E6			
Объём памяти / Memory capacity: 8 GB (1 TB)	Питание / Power supply: постоянное напряжение /			
Максимальный темп записи / Maximum	constant voltage 3,3-12 V, ток до 100 mAh.			
recording rate: 50Hz	Схема подачи питания: 4-х точечная / Power			
Форматы файлов / File formats: T02, RINEX	supply circuit: 4-point			
v ² .11, RINEX v ³ .0, BINEX, Google Earth KMZ	Стаб. фазового центра / Stab. phase center: <2 mm.			
Поддержка интерфейсов / Interface support::	Коэффициент усиления / Gain: 50 дБ по частоте /			
Bluetooth®	50 dB in frequency			
Ethernet, RS232 и USB	L1, 50 дБ по частоте L2. / L1, 50 dB in frequency			
Одновременное слежение за спутниковыми	L2.			
сигналами / Simultaneous tracking satellite	Вибропрочность / Vibration resistance: стандарт			
signals: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Compass,	MIL-810-F,			
QZSS.	глава 514.5с-17 (уровень вибрации			
Габаритные размеры / Overall dimensions:	по каждой оси) / mil-810-F standard, Chapter 514.5			
25,6 cm ×13,0 cm ×5,5 cm ×	c-17 (vibration level on each axis).			
Bec / Weight: 1,75 kg	Габаритные размеры / Overall dimensions: ø34,3			
	$cm \times 7,9 cm.$			
	Bec / Weight: 1,36 kg.			
timle wat the second				

Базовые элементы SATG_GPS-станции. / The basic elements of a SATG_GPS station.

Геодезические координаты SATG_GPS станции были уточнены и обработаны на сервере службой обработки GPS AUSPOS (версия: AUSPOS 2.2) (рис. 3).



9 (3) 2019

Puc. 2. Базовая сверхглубокая SATG_GPS станция Саатлинского региона. / Fig. 2. Base super-deep SATG_GPS station of the Saatli region



Puc. 3. Карта с положением GPS_SATG станции. / Fig. 3. Map with GPS_SATG station position.

Служба APSPOS Online GPS Processing Service использует международные продукты GNSS (IGS) (конечные, быстрые, сверхбыстрые в зависимости от доступности) для вычисления точных координат в ITRF в любом месте Земли и GDA94 в Австралии. Услуга предназначена для обработки только двухфазных данных фазы GPS. [Милюков и др., 2015; AUSPOS-Online GPS; Herring et al., 2010]. При уточнении координат SATG_GPS станции в данном исследовании были добавлены данные 14 близкорасположенных опорных станций сети IGS.

Географическое расположение станции на основе координат рассчитанных на сервере службой обработки GPS AUSPOS показано на рисунке 4.



Рис. 4. Пространственное распределение опорных станций 14 GNSS (IGS) при обработке геодезических координат SATG_GPS. / Fig. 4. Spatial distribution of the geodetic coordinates of the SATG_GPS 14 GNSS (IGS) station and reference stations during processing

Кроме того были рассчитаны параметры орбитально-земной ориентации SATG_ GPS и атмосферных зенитных задержек от двухчастотной станции, показанные на рисунке 5.



Puc. 5. Параметры орбитальной-земной ориентации (Sky Plot) (a) и атмосферных зенитных задержек от двухчастотных GPS-станций (Phase and elevate angel) (b). / Fig. 5. Parameters of orbital-terrestrial orientation (Sky Plot) (a) and atmospheric zenith delays from dual-frequency GPS stations (Phase and elevate angel) (b).

Обработка GPS данных выполнялась пакетом программ GAMIT/ GLOBK (фильтр Калмана) 10.6 и TRACK образуют полный набор программ для анализа измерений GPS [McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006]. Программное обеспечение было разработано Массачусетским технологическим институтом (MIT), институтом океанографии Scripps и Гарвардским университетом.

Все параметры GAMIT настроены для региональной или локальной станций. Вычисленные временные ряды координат станций SATG, показаны на рис. (4,5). Оценки компонент скоростей и векторов горизонтальных движений геодезической сети GPS станций Азербайджана за 2015-2017 гг., приведены в таблице 3.

Таблица 3. / Table 3.

Расчет горизонтального вектора скорости на GPS_ SATG станции и Азимутального угла за 2015-2017 гг. / Calculation of the horizontal velocity vector at the GPS_ SATG station and the Azimuthal angle for 2015-2017.

Год / Year	VE mm/g	VN mm/g	E± mm/g	N± mm/g	H высота, mm/g / H Height, mm/g	±	AZM, °	V скорость, mm/g / V Speed, mm/g
2015	4,9	9,51	0,41	0,81	10,19	1,58	22,31	10,7
2016	6,62	9,79	0,38	0,40	-2,29	1,20	34,1	11,8
2017	8,29	11,19	0,51	0,53	11,98	1,68	36,5	14,7
2015-2017	3,98	0,06	11,79	0,07	-5,07	0,22	18,65	12,4

Исследование состоит из двух основных задач. Первая задача включала анализ наблюдений сети GPS в Азербайджане для измерения скорости движения и направления дви-



Рис. 6. Схема вектора горизонтального смещения базовой Саатлы GPS_SATG станции за период 2015-2017 гг. /

Fig. 6. Scheme of the horizontal displacement vector of the base Saatli GPS_SATG station for the period 2015-2017.



Рис. 7. Пространственное распределение скорости за 2015, 2016, 2017 годы по данным сети 24-х GPS станций РЦСС в зоне Саатлинского района. /

Fig. 7. Spatial distribution of velocity for 2015, 2016, 2017 according to a network of 24 GPS stations of the RCSS in the Saatli region.

жения для каждой станции GPS с использованием программных пакетов GAMIT/GLOBK [Conrad, 2004; Herring, 2003; McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Tapponnier et al., 2001]. Вторая задача – исследовать скорость совместного сейсмического перемещения, связанного с событием землетрясения, используя программу кинематического позиционирования TRACK. Результаты анализа показывают, что восточная сторона движется на северо-восток со средней скоростью примерно 3-14 мм/ г, тогда как западная сторона разлома движется на северо-восток со скоростью около 11-15 мм/г.

Таким образом, была получена схема изменения направления смещения базовой станции SATG_GPS Саатлинского региона (рис. 6, 7).

Выводы

Оценки скоростей, полученные в ходе проведенных геодезических работ, показывают, что есть общее небольшое сжатие в CB направлении Саатлинской скважины со скоростью порядка 10 мм/год. Данный результат подтверждает существующую точку зрения, что источником деформирования Саатлинского региона является приближение в субмеридиональном направлении Аравийской литосферной плиты к смежной окраине Восточно-Европейской части Евразийской литосферной плиты, что было установлено в результате предыдущих GPS измерений. Эта концепция сближения предполагает, что в результате кавказский сегмент Альпийско-Гималайского подвижного пояса сжимается, слои осадочных и вулканических пород сминаются в складки, блоки основания испытывают разнонаправленные смещения, а верхние горизонты коры нарушаются взбросами и надвигами. Для выявления более детальной геодинамической картины строения региона требуется развитие более плотной геодезической сети, позволяющей отслеживать не только крупномасштабные горизонтальные и вертикальные движения региона, но и реализовывать региональный уровень наблюдений.

Отметим что, Кавказские горы являются результатом продолжающегося столкновения между Аравийской и Евразийской плитами. Иранская плита, сжимаемая между Аравийской и Евразийской плитами, также кажется, играет роль, когда евразийская пластина вращается по часовой стрелке к ней.

Литература

1. Воробьева А.А. Дистанционное зондирование земли. / Учебно-методическое пособие. – СПБ: СПБу ИТМО, 2012. – С. 13.

2. Губин В. Н. Спутниковые технологии в геодинамике. // Монография под ред. В. Н. Губина. – Минск: Минсктиппроект, 2010. – 87 с.

3. Кадыров Ф.А., Мамедов С.К., Сафаров Р.Т. Исследование современной геодинамической ситуации и опасности землетрясений деформации земной коры территории Азербайджана по 5-летним GPS-данным. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 156-162.

4. Казымов И.Э. Геодинамика Абшеронского полуострова. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 163-166.

5. Красноперов Р.И. Анализ сейсмотектонических движений земной коры по данным наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем. // диссертация... кандидата физико-математических наук. – М. – 2015. – 150 с.

6. Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS-наблюдениям. // Геотектоника. – 2015. – № 3. – С. 56-65.

7. Самые глубокие скважины мира. 18 марта 2015. https://masterok. livejournal. com/2272055. html

8. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том I (изд. второе, исправленное и дополненное). – М.: Наука, 1972. – 536 с.

9. Техническое описание сетей референцных станций. // http://ansol. su/geo/g-bnets/ page,1,83-tehnicheskoe-opisanie-setey-referencnyh-stanciy. html

10. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П. Иванцевич Н.В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

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

12. Conrad C. P. and LithgowBertelloni C. The tem poral evolution of plate driving forces: Importance of «slab suction" versus "slab pull" during the Cenozoic. // J. Geophys. Res. – 2004. – Vol. 109. Is. B10407.

13. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. // Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. – 2010. – 48 p.

14. Herring T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.1 Internal Memorandum. // Massachusetts Institute of Technology. – Cambridge. – 2003.

15. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J. GPS Theory and practice (fifth, revised edition). // Springer. Wien, New-York. 1992, 1993, 1994, and 2001. – 383 p.

16. Leick A. GPS satellite surveying (second edition) Department of Surveying Engineering. // University of Main. Orono, Main AWiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, inc. New-York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore. – 1994. – 560 p.

17. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksüz M. N., Veis G. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. Is. B3. – Pp. 5695-5719.

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. Is. B05411.

19. Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. // Science. – 2001. – Vol. 294. Is. 5547. – Pp. 1671-1677.

20. Teunissen P.J. G., Kleusberg A. GPS for Geodesy. // Springer. - 1998. - 650 p.

21. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation // International Geology Review. – 2003. – Vol. 45. – Pp. 191-212.

22. Wright T. J., Parsons B., England P.C., Fielding E. J. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet. // Science. – 2004. – Vol. 305. Is. 5681. – Pp. 236-239.

23. http://www.unavco.org/software/visualization/GPS-Velocity-Viewer/GPS-Velocity-Viewer.html

9 (3) 2019

References

1. Vorob'eva A.A. Remote sensing of the earth. Teaching aid. St. Petersburg: St Petersburg University ITMO, 2012. 13 p. (In Russ.)

2. Gubin V.N. Satellite technologies in geodynamics. Monograph ed. V.N. Gubina. Minsk, Minsktipproekt, 2010. 87 p. (In Russ.)

3. 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.)

4. 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.)

5. Krasnoperov R.I. Analysis of seismotectonic movements of the earth's crust according to observations of global navigation satellite systems. Dissertation ... candidate of physical and mathematical sciences. M. 2015. 150 p. (In Russ.)

6. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the modern movements speeds of the North Caucasus from GPS observations. Geotectonics. 2015. No. 3. pp. 56–65. (In Russ.)

7. The deepest wells in the world. March 18, 2015. https://masterok.livejournal.com/2272055.html (In Russ.)

8. Sedov L.I. Continuum mechanics. Vol. I (Second edition, revised and corrected). M . Nauka, 1972. 536 p. (In Russ.)

9. Technical description of reference station networks. http://ansol.su/geo/g-bnets/page, 1,83-tehnicheskoe-opisanie-setey-referencnyh-stanciy.html (In Russ.)

10. Shebshaevich V.S., Dmitriev P.P. Ivantsevich N.V. et al. Network satellite radio navigation systems. M. Radio and communications, 1993. 408 p. (In Russ.)

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

12. Conrad C.P. and LithgowBertelloni C. The tem poral evolution of plate driving forces: Importance of "slab suction" versus "slab pull" during the Cenozoic. J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. Issue B10407.

13. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 2010. 48 p.

14. Herring T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.1 Internal Memorandum. // Massachusetts Institute of Technology. – Cambridge. – 2003.

15. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J. GPS Theory and practice (fifth, revised edition). Springer. Wien, New-York. 1992, 1993, 1994, and 2001. 383 p.

16. Leick A. GPS satellite surveying (second edition) Department of Surveying Engineering. University of Main. Orono, Main AWiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, inc. New-York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore. 1994. 560 p.

17. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksüz M.N., Veis G. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. Is. B3. pp. 5695–5719.

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. Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. Science. 2001. Vol. 294. Issue 5547. pp. 1671–1677.

20. Teunissen P.J.G., Kleusberg A. GPS for Geodesy. Springer. 1998. 650 p.

21. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. International Geology Review. 2003. Vol. 45. pp. 191–212.

22. Wright T.J., Parsons B., England P.C., Fielding E.J. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet. Science. 2004. Vol. 305. Issue 5681. pp. 236–239.

23. http://www.unavco.org/software/visualization/GPS-Velocity-Viewer/GPS-Velocity-Viewer.html

= ГЕОФИЗИКА =

VДК 550.344 DOI: <u>10.23671/VNC.2019.3.36475</u>

Оригинальная статья

Особенности Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг., роевая сейсмичность и поле поглощения S-волн

О.И. Аптикаева (D, к.ф.-м.н.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: aptikaevaoi@mail.ru

Статья поступила: 20 июня 2019, доработана: 5 августа 2019, одобрена в печать: 6 августа 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Движение Аравийской плиты считается основной причиной интенсивной сейсмической активности района озера Ван. Район двух землетрясений с катастрофическими последствиями, которые произошли в течение относительно короткого промежутка времени, представляют для сейсмологов особый интерес. Очаги Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг. располагались на расстоянии около 40 км, при этом разные сейсмические ситуации, предшествовавшие этим двум землетрясениям, по видимому, предполагают разные условия их возникновения. Цель работы – анализ пространственных вариаций поля поглощения поперечных волн в районе очагов Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг. и их связи с сейсмичностью. Метод исследования – метод короткопериодной коды, когда по набору огибающих коды для многих землетрясений строится распределение поля поглощения в верхней мантии. Результаты работы. В районе озера Ван прослеживаются такие же, как и в других сейсмоактивных зонах, особенности структуры поля поглощения поперечных волн в мантии. Выделяются блоки слабого поглощения изометричной формы, в которых поглощение уменьшается в направлении от границ к центральным областям блоков, где добротность QS достигает 300 и даже 700. Среди зон сильного поглощения наиболее заметна широкая зона севернее 39 с.ш., где QS~80-110. Кроме того, выделены небольшой протяженности линейные зоны сильного поглощения, ориентированные в направлениях ЮЗ-СВ и ЮВ-СЗ. Эпицентры сильнейших землетрясений района, в том числе и землетрясений 1976 и 2011 гг., как правило, приурочены к границам добротных блоков и ослабленных зон. Сейсмическая ситуация, предшествовавшая землетрясению 1976 г., отличалась от таковой перед землетрясением 2011 г. В первом случае, за год до землетрясения на северо-востоке от очага будущего толчка сформировалась сейсмическая брешь. Во втором случае слабые землетрясения в области очага будущего землетрясения не прекращались в течение предшествовавшего главному событию года. За несколько месяцев до главного толчка на северо-западе от области очага имела место роевая серия землетрясений, которая ассоциируется с ослабленной низкодобротной зоной. Гипоцентры землетрясений, составляющих роевую серию, образуют одномерный объем изометричный в плане и вытянутый по вертикали (глубины очагов ~3–30 км). Предполагается, что рои землетрясений, приуроченные к одномерным объемам, связаны с каналами миграции глубинных флюидов повышенной проводимости. Такие объекты можно интерпретировать как локальные сейсмогенные источники. Практическая значимость работы заключается в оценке сейсмической опасности исследуемого района.

Ключевые слова: кода-волны, добротность, поле поглощения S-волн.

Для цитирования: Аптикаева О.И. Особенности Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг., роевая сейсмичность и поле поглощения S-волн. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9(3): 105-118. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36475.

9 (3) 2019

= GEOPHYSICS =

DOI: <u>10.23671/VNC.2019.3.36475</u>

Original paper

Features of the 1976 and 2011 Van earthquakes, swarm seismicity and S-wave attenuation field

O.I. Aptikaeva

Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123995, Russian Federation, e-mail: aptikaevaoi@mail.ru

Received 20 June 2019; revised 5 August 2019; accepted 6 August 2019

Abstract: Relevance. The movement of the Arabian Plate is considered as the main reason for the intense seismic activity of the Lake Van region. The area of two earthquakes with catastrophic consequences (that occurred over a relatively short period of time) is of a particular interest to seismologists. The foci of the Van earthquakes of 1976 and 2011 located at a distance of about 40 km, while different seismic situations that preceded these two earthquakes, apparently suggest different conditions for their occurrence. Aim. The analysis of spatial variations in the shear wave absorption field in the region of the foci of the Van earthquakes of 1976 and 2011 and their connection with seismicity. Methods. The short-period code method, which supposes the construction of the distribution of the absorption field in the upper mantle using a set of envelopes for many earthquakes. Results. In the area of the Lake Van the same features of the structure of the transverse wave's absorption field in the mantle are observed as in other seismically active zones. Isometric shape blocks of weak absorption are distinguished, in which the absorption decreases in the direction from the boundaries to the central regions of the blocks, where the quality factor QS reaches 300 and even 700. Among the zones of strong absorption, the most noticeable is a wide zone north of 39 N, where QS ~ 80-110. In addition, linear zones of strong absorption, oriented in the directions SW-NE and SW-NW, are distinguished for a small extent. The epicenters of the strongest earthquakes in the region, including the earthquakes of 1976 and 2011, are usually confined to the boundaries of solid blocks and weakened zones. The seismic situation, preceded the earthquake of 1976, differed from that before the earthquake of 2011. In the first case, a seismic gap was formed a year before the earthquake in the northeast of the center of the future shock. In the second case, weak earthquakes in the area of the source of the future earthquake did not stop during the year preceding the main event. A few months before the main shock, an earthquake swarm occurred in the northwest of the outbreak area, which is associated with a weakened low-Q zone. The hypocenters of the earthquakes that make up the swarm series form a one-dimensional volume which is isometric in plan and elongated vertically (focal depths ~ 3-30 km). It is assumed that earthquake swarms confined to one-dimensional volumes are associated with migration channels of deep conductive fluids. Such objects can be interpreted as local seismogenic sources. Practical significance. The assessment of seismic hazard of the studied area.

Keywords: coda waves, Q-factor, S-wave attenuation field.

For citation: Aptikaeva O.I. Features of the 1976 and 2011 Van earthquakes, swarm seismicity and S-wave attenuation field. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 105-118. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36475.

Введение

Турция, как тектонически активный район, расположена в окружении трех главных плит: Африканской, Евразийской и Аравийской. Согласно исследованиям GPS [Barka, Reilinger, 1997; McClusky et al., 2000], Аравийская плита движется на север-северо-запад относительно Евразийской со скоростью около 25 мм/год и со скоростью 10 мм/год она приближается к Кавказу. Более мелкие тектонические элементы: Турецкая, Иранская, Черноморская и Южно-Каспийская плиты движутся симметрично относительно района озера Ван на восток и запад, как будто расталкиваемые Аравийской плитой. Движение Аравийской плиты считается основной причиной интенсивной сейсмической активности района озера Ван. За период с 1111 по 2013 гг. в районе озера Ван произошло 19 землетрясений с магнитудой М>6,0, в том числе четыре землетрясения с магнитудой М≥7,0 за инструментальный период, начиная с 1900 г.: 28.05.1903 (М=7,0), 06.05.1930 (М=7,3), 24.11.1976 (М=7,5) и 23.10.2011 (М=7,1) [Специализированный каталог...]. По двум последним из нихсуществуют не только макросейсмические, но и инструментальные данные.

Очаг землетрясения и эпицентральная зона землетрясения 24 ноября 1976 г. располагались в северо-восточной части озера Ван, на южном склоне хребта Аладага. Район землетрясения характеризуется высокой сейсмической активностью, при этом, землетрясение 24 ноября 1976 г. – наиболее крупное сеймическое событиене только рассматриваемого района, но и всей Малой Азии. По официальным данным около 200 населенных пунктов были полностью уничтожены или сильно разрушены [Баграмян и др., 1980]. По данным NEIC механизм очага этого землетрясения – правосторонний сдвиг. Движение осуществлялось по Чалдыранскому разлому, который к моменту землетрясения еще не был выявлен. Максимальные смещения вдоль разлома достигали 4 м, уменьшаясь к восточному концу разлома, где в среднем сдвиг был порядка 2 м [Saroglu, Erdogan, 1983]. Еще одно разрушительное землетрясение Ванского района, эпицентр которого находился в г. Ван, - землетрясение 23 октября 2011 года. [Elliott et al., 2013]. Подземные толчки ощущались за сотни километров [Землетрясения..., 2017]. Механизм очага этого землетрясения определен как взброс со сдвиговой компонентой. Согласно [Саргсян и др., 2017], землетрясения в очаговой зоне Ванского землетрясения наблюдались задолго до главного толчка, с начала 2011 года. За главным толчком последовал интенсивный афтершоковый период.

Еще одно разрушительное землетрясение Ванского района, эпицентр которого находился в г. Ван, – землетрясение 23 октября 2011 года. [Elliott et al., 2013]. Подземные толчки ощущались за сотни километров [Землетрясения..., 2017]. Механизм очага этого землетрясения определен как взброс со сдвиговой компонентой. Согласно [Саргсян и др., 2017], землетрясения в очаговой зоне Ванского землетрясения наблюдались задолго до главного толчка, с начала 2011 года. За главным толчком последовал интенсивный афтершоковый период.

Район двух землетрясений с катастрофическими последствиями, которые произошли в течение относительно короткого промежутка времени, представляют для сейсмологов особый интерес. Очаги Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг. располагались на расстоянии около 40 км, при этом разные сейсмические ситуации, предшествовавшие этим двум землетрясениям, по-видимому, предполагают разные условия их возникновения. В предлагаемой работе приводятся результаты анализа пространственных вариаций поля поглощения поперечных волн в районе очагов Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг. и их связи с сейсмичностью.

Материалы и методы

Вариации поля поглощения поперечных волн оценивались методом короткопериодной коды. В работе проанализированы огибающие коды 210 землетрясений М>4,0. При этом использовались трехкомпонентные цифровые велосиграммы, записанные 13 станциями, подведомственными Обсерватории Кандили (Kandilli Observatory Seismic Array (KOERI; KO), Стамбул, Турция, http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/), и станциями KIV и GNI сети IRIS, за период с 1989 по 2018 гг. (рис. 1). Эпицентральные расстояния составляли 10–600 км. Кроме того, привлекались каталоги Обсерватории Кандили (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/), каталоги NEIC (https://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/ neic.php), калоги ФИЦ УГС РАН (http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl), Каталог землетрясений Кавказа (http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus), а также «Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации» [Специализированный каталог...].

В основе работ по изучению пространственно-временных неоднородностей поля поглощения в сейсмически активных районах [Аптикаева, Копничев, 1991], лежат экспери-


Рис. 1. Схема эпицентров землетрясений (1) и расположение регистрирующих станций (2); на взрезке – огибающие коды афтершока землетрясения 2011 г. на частоте 1 Гц по записям нескольких станций. Пояснения в тексте. /

Fig. 1. Layout of the earthquake epicenters (1) and recording stations (2). Inset: coda waves envelope of the aftershock earthquake 2011 recorded by several station at a frequency of 1 Hz (see explanations in the text)

ментальные данные, свидетельствующие о том, что определяющее влияние на формирование сейсмического волнового поля оказывает структура поля поглощения, и что кода местных землетрясений, в основном, сформирована поперечными волнами, отраженными от многочисленных слабых субгоризонтальных границ в земной коре и верхней мантии [Аптикаева, Копничев, 1991, 1992].

Согласно этой модели, на достаточно больших временах кода-волны сравнительно круто пересекают низы коры и верхи мантии и несут информацию о строении среды в области между эпицентром и станцией. Существование в этой области зон повышенного или пониженного поглощения S-волн отражается на характеристиках коды, приводя соответственно к заметному увеличению или уменьшению ее наклона. Таким образом, огибающие коды состоят из участков, соответствующих большему или меньшему затуханию, которые могут быть описаны выражением, имеющим вид:

$$A(t) \sim \exp\left(-\frac{\pi t}{Q_s T}\right) / t$$

где A(t) – амплитуда коды в окрестностях времени t; Q_s – эффективная добротность; T – период колебаний.

Эффективная добротность оценивалась по огибающим короткопериодной коды (в том числе и коды Lg [Каазик и др., 1990]), в интервале частот 1-1,6 Гц, на временах от t-t₀= $2t_s$ (t_0 – время в очаге, t_s – время вступления S-волны) до момента достижения амплитудой колебаний уровня микросейсмического фона.

На врезке рисунка 1 в качестве примера приведены огибающие коды афтершока землетрясения 2011 г., записанного несколькими станциями, расположенными в разных азимутах от эпицентра и на разных эпицентральных расстояниях (до станций VANB, AGRB, CUKN, VRTB они составляют соответственно 21, 103, 162, 176 км). Как видно, на временах t-t₀>2t_s наклон огибающих коды постоянен и одинаков для всех станций, исключением является интервал t-t₀=17–28 с огибающей коды VANB (пологая ее часть). В рамках выбранной нами модели этот интервал соответствует глубинам 30–50 км. Эффективная добротность, рассчитанная по пологой части огибающей коды на частоте ~1 Гц, составляет порядка 800. На больших глубинах значение добротности по всем четырем огибающим коды существенно ниже Q_S~100.

Из приведенного примера ясно, что по огибающим коды землетрясений, записанных удаленными от очага станциями, можно оценить добротность на глубинах, соответствующих верхней мантии (мощность коры в данном районе изменяется от 40 до 50 км [Vanacore et al., 2013; Duman et al., 2016].

Конкретные значения эффективной добротности приписывались эпицентрам событий. Таким образом, по имеющемуся набору огибающих коды для многих эпицентров землетрясений строилось распределение поля поглощения поперечных волн в верхней мантии.

Сильнейшие землетрясения района озера Ван на фоне поля поглощения S-волн.

Как следует из рисунка 1, распределение по площади эпицентров землетрясений неравномерно. Такие области, как очаговая зона землетрясения 2011 г., представлены достаточным количеством событий, тогда как в других – эпицентры отсутствуют, поэтому приведенную на рисунке 2 схему нельзя считать окончательной, она в деталях может видоизменяться по мере поступления новых данных. Тем не менее, общие, с другими сейсмоактивными зонами, черты здесь прослеживаются. Прежде всего, в границах рассматриваемого района выделяются блоки слабого поглощения, изометричной в плане формы, в которых поглощение уменьшается в направлении от границ к центральным областям блоков, где добротность достигает 300 и даже 700. Среди зон сильного поглощения, обычно линейно вытянутых, наиболее заметна широкая зона (севернее 39° с.ш.), здесь Q_{s} ~80–110. И только на юге изучаемого района отмечены более низкие значения добротности Q_{s} =60.

Как видно из рисунка 2, эпицентры сильнейших землетрясений, в том числе и землетрясений 1976 и 2011 гг., как правило, приурочены к границам добротных блоков. Единичные случаи, как например, землетрясение 1903 г., когда эпицентр оказался внутри блока, можно объяснить тем, что разлом, по которому произошла эта подвижка и, который по [Barka, Reilinger, 1997] простирается с северо-востока на юго-запад, на данном этапе исследований в поле поглощения не проявился.

Отметим, что схема, приведенная на рисунке 2, построена без учета афтершоков землетрясения 2011 г. Распределение эффективной добротности в пределах афтершоковой области (по 50 афтершокам) приведено на врезке рисунка 2. Можно заметить, что после землетрясения добротность в очаговой зоне варьирует от 80 до 220, при медианном значении 100. Эпицентральная область землетрясения 2011 г. представляет собой относительно однородный объем, добротность которого $Q_s \sim 100$, с тремя добротными включениями ($Q_s \sim 180-220$) и двумя секущими его зонами более сильного поглощения ($Q_s \sim 80$), которые практически совпадают с аналогичными низкодобротными зонами ($Q_s \sim 90$) на схеме (рис. 2).



Рис. 2. Сильнейшие землетрясения в границах изучаемого района на фоне поля поглощения S-волн.
1 – изолинии эффективной добротности (без учета огибающих коды афтершоков землетрясения 2011 г.); 2 – землетрясения с M>6.0 по каталогу [Специализированный каталог...], номера соответствуют номерам в таблице. На врезке – распределение эффективной добротности в эпицентральной области землетрясения 2011 г. по его афтершокам (пояснения в тексте). / Fig. 2. Strongest earthquakes within the study area against the background of the S-waves attenuation field. 1 – quality factor isolines (excluding coda waves envelope of the aftershocks earthquake 2011); 2 – earthquake epicenters with M> 6.0 [Specialized catalog...], the numbers correspond to numbers in the table. Inset: quality factor distribution in the earthquake 2011ерісеntral region by its aftershocks (see explanations in the text).

Сейсмическая активность в очаговых областях землетрясений 1976 и 2011 гг.

Согласно каталогу [Каталог землетрясений Кавказа...] сейсмическая ситуация перед землетрясением 1976 г. выглядела следующим образом (рис. 3). В течение 11 месяцев до сильного события на северо-востоке от очаговой области будущего землетрясения сформировалась обширная область затишья. Примерно за месяц до сильного события (1, 20 и 21 ноября) произошли три землетрясения K=9, которые обозначили (если судить по афтершоковой области) размеры очага главного толчка (см. рис. 3). Общее количество афтершоков превысило 230. Они, по большей части, относятся к ослабленной зоне, добротность которой $Q_s=90$ (см. рис. 2), и границе добротного блока. В пределах района, показанного на рисунке 3, выделена также некая область, характеризующаяся не только повышенной сейсмической активностью в предшествующий землетрясению 1976 г. период, но и появляющимися время от времени сейсмическими роями, например, роем землетрясений K=9-10 в августе 1975 г. [Каталог землетрясений Кавказа...].

Согласно каталогу Обсерватории Кандили (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/ earthquake-catalog/) сейсмическая ситуация перед землетрясением 2011 г. существенно отличалась от описанной выше (рис. 4). С начала 2011 г. до сильного события очаговая область будущего землетрясения не переставала генерировать землетрясения с магнитудой $m\sim2,0-3,0$. Афтершоки сильного землетрясения локализованы очень компактно (см. врезку рисунка 4) в перекрестье двух линейных ослабленных зон с добротностью $Q_s=90$ и на границах небольших добротных блоков, размеры которых в плане составляют 5–10 км.

Механизмы многих афтершоков землетрясения 2011 г., так же, как и главного толчка, по данным NEIC (https://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php) определены как взбросы со сдвиговой компонентой.

Таблица 1. / Table 1.

Параметры землетрясений с M>6,0 по Специализированному каталогу землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации [Специализированный каталог...]. / Earthquakes parameters with M> 6.0 from the Specialized catalog of earthquakes for problems of general seismic zoning of the Russian territory Federation [Specialized catalog...]

		Координаты / Coordinates		/ Coordinates	Магнитуда	
N⁰	Дата / Date	Время / Time	Широта /	Долгота /	$M_{\rm LH}$ / Magnitude	
			Latitude	Longitude	M_{LH}	
1	00.00.1111	00:00:00	38.50	43.40	6,5	
2	00.00.1208	00:00:00	38.70	42.50	6,7	
3	27.06.1275	00:00:00	38.00	42.00	6,8	
4	00.00.1319	00:00:00	39.80	43.50	7,4	
5	31.03.1648	00:00:00	38.30	43.50	6,7	
6	01.08.1670	00:00:00	38.00	42.00	6,6	
7	14.04.1696	00:00:00	39.10	43.90	7,0	
8	08.03.1715	06:00:00	38.40	43.90	6,6	
9	00.00.1834	00:00:00	39.70	43.70	6,0	
10	00.00.1850	00:00:00	39.90	43.30	6,2	
11	23.04.1868	03:30:00	40.00	42.50	6,0	
12	17.03.1871	00:00:00	38.00	43.00	6,8	
13	07.06.1881	00:00:00	38.60	42.80	6,3	
14	03.04.1891	00:00:00	39.10	42.50	6,0	
15	28.04.1903	23:39:00	39.30	42.30	7,0	
16	06.05.1930	22:34:18	37.50 (37.98)	44.70 (44.48)	7,3 (7,6)	
17	24.03.1936	19:46:22	39.00	42.00	6,0	
18	24.11.1976	12:22:18	39.10	44.00	7,5	
19	23.10.2011	10:41:23	38.72	43.51	7,1	
В скобках – параметры землетрясения по [Duman et al., 2016] / In brackets – earthquake parameters						
by[Duman et al., 2016]						

Примечательно, что 22-23 февраля 2011 г. в выделенной на рисунке 4 области, обозначенной как «локализация роя», зарегистрирована сейсмическая серия из более 40 событий с m=2,5–4,5 и глубиной h=3–28 км.

Роевая сейсмичность района исследований

Для выявления серий слабых землетрясений, сконцентрированных в пространстве и во времени, анализировался каталог (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/) за 2004–2018 гг., при этом, отбирались события с магнитудой m>2,5 в границах изучаемого района. На рисунке 5, показано положение наиболее заметных из выделенных серий, а на рисунке 6, а, б, *в* – распределение событий каждой из них на временной оси.

Магнитуды серии слабых событий 2004 г. (28 февраля – 6 марта) варьируют от 2,8 до 4,2. События локализованы в низкодобротной (ослабленной) зоне. Самое сильное событие m=4,2 произошло 3 марта, т.е. внутри серии. Глубины очагов событий из этой серии варьируют от 5 до 13 км, и только одно землетрясение в конце нее произошло на глубине 27 км.



Рис. 3. Сейсмическая ситуация, предшествующаяземлетрясению 1976 г. (с 1 января по 21 ноября), и положение его афтершоков по [Каталог землетрясений Кавказа...]; 1 – эпицентр землетрясения 24.11.1976, 2 – события за период 01.01–21.11.1976, 3 – афтершоки землетрясения 1976 г., 4 – границы зоны затишья, 5 – локализация роя 02–21.08.1975 (К=9-10), 6 – ослабленные зоны, 7 – добротные блоки /

Fig. 3. Seismic situation prior to the earthquake 1976 (from January 1 to November 21), and the position of its aftershocks [Catalog of Caucasus earthquakes...]; 1 – earthquake epicenter 24.11.1976, 2 – events during the period 01.01–21.11.1976, 3 – aftershocks of earthquake 1976, 4 – boundary of seismic gap, 5 – swarm position 02–21.08.1975 (K=9-10), 6 – weakened zones, 7 – blocks having high Q-factor

По соотношению магнитуд главного события этой серии и последовавших за ним, ее можно отнести к последовательности форшоки-главный толчок-афтершоки.

Три серии 2005–2006 гг. (25 января – 12 февраля 2005 г., 29 мая – 8 июня 2005 г. и 3–20 июня 2006 г.) локализованы в одном месте (рис.5). Первая, самая многочисленная из них, серия включает события с магнитудами m=2,6–4,5, их глубины варьируют от 3 до 32 км. Отнесем рассматриваемую серию к роевой, характерной чертой которой является большой интервал глубин очагов, составляющих ее событий. Серия предшествовала двум относительно сильным землетрясениям 14 и 23 марта 2005 г. с магнитудами 4,6 и 4,7. Положение эпицентров этих землетрясений совпадает с местом локализации серии 2004 г., описанной выше.

Следует отметить, что, несмотря на в целом высокую сейсмическую активность района, за период 2004–2011 гг. выявлено только две роевые серии, представленные несколькими десятками событий – описанная выше серия 25 января – 12 февраля 2005 г. и серия 22 февраля – 10 марта 2011 г. (более 40 событий с m=2,5–4,5 и глубиной h=3–28км). Обе роевые серии ассоциируются с ослабленными зонами, приуроченными к небольшим разломам, которые можно отнести к широким разломным поясам: складчатому надвиговому поясу Загрос-Битлис и Северо-Анатолийскиму разломому.



Рис. 4. Сейсмическая ситуация, предшествующая землетрясению 2011 г. (с 1 января по 23 октября), и его афтершоки (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/), 1 – эпицентр землетрясения 23.10.2011 г., 2 – события за период 01.01–12.10.2011, 3 – локализация роя 22-23.02.2011. На врезке афтершоки землетрясения 2011 г. Остальные обозначения – на рисунке 3. / Fig. 4. Seismic situation prior to the earthquake 2011 (from January 1 to October 23), and the position of its aftershocks (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2 / earthquake-catalog /), 1 - earthquake epicenter 23.10.2011, 2 – events during the period 01.01–23.10.2011, 3 – swarm position 22-23.02.2011. Inset: aftershocks of the 2011 earthquake. Other symbols as fig. 3

Обращает на себя внимание изометричность областей локализации роевых серий в плане и вытянутость по вертикали (глубины очагов ~3-30 км). Подобные структуры в тектонически активных зонах, в том числе и на территории Турции, описаны в литературе [Шевченко и др., 2014, 2017; Аптикаева, Аптикаев, 2019]. Часто они интерпретируются как локальные источники деформаций (за счет проникновения в пределы верхней коры глубинных флюидов, привносящих дополнительный минеральный материал, что обусловливает субгоризонтальные напряжения распора). Такие сейсмогенные области, как правило, совпадают с ослабленными зонами сильного поглощения S-волн [Аптикаева, 2012, а, б]. На это указывают и механизмы землетрясений (взбросы), эпицентры которых расположены, например, в области локализации роя 2011 г. (№17 на рисунке 7). Отметим, что механизмы многих афтершоков землетрясения 2011 г., как и главного толчка, по данным NEIC определены как взбросы со сдвиговой компонентой, при том, что большинство землетрясений в этом районе – сдвиги (рис. 7).

Как отмечается в работе [Шевченко и др., 2017], интенсивная локализованная сейсмичность, приуроченная к одномерным объемам разной формы и пространственного положения, вероятнее всего, связана с каналами повышенной проводимости, по которым,



Рис. 5. Положение роев землетрясений изучаемого района. Кружками показаны эпицентры событий: 2004–2011 гг. – по каталогу (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/) и 1945 г. – по каталогу [Специализированный каталог...]. /

Fig. 5. Position of earthquake swarms within the study area. The circles are the event epicenters: 2004–2011 (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/) and 1945 [Specialized catalog...].



Рис. 6. Временные вариации сейсмичности в пределах каждой из трех выделенных на рисунке 5 зон. /

Fig. 6. Temporary variations of seismicity within each of the three zones shown in Fig. 5



 Рис. 7. Механизмы очагов землетрясений из эпицентральных зон землетрясений 1976 и 2011 гг. по [Tan et al., 2008; https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/], справа – их параметры. /
 Fig. 7. Focal mechanisms of earthquakes from the epicentral zones of earthquakes 1976 and 2011 [Tan et al., 2008; https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/], on the right - their parameters

мигрируют глубинные флюиды. Выявленные одномерные объемы, по описанным выше признакам, по-видимому, могут быть связаны с такими каналами миграции.

Учитывая, что вслед за интенсивной локализованной сейсмичностью могут возникать крупные сейсмические события, такие как землетрясение 2011 г., или в течение короткого времени – несколько землетрясений меньшей силы, как в 2005 г., такие объемы можно интерпретировать как локальные сейсмогенные источники.

Уместно упомянуть еще об одной серии землетрясений в изучаемом районе – серии 1945 г. Она продолжалась с июля по декабрь, магнитуды событий M_{LH}=4,6-5,8, эпицентр максимального толчка с M_{LH}=5,8 находился в пределах очаговой области землетрясения 2011 г. (см. рис. 5). Интересно, что в результате этой серии землетрясений имели место крупномасштабные разрушения в районе оз. Ван. Последним перед этой серией событием, оставившим после себя подобные разрушения, было землетрясение 1648 г. с магнитудой M_{LH}=6,7 (см. №5 в табл. 1). По-видимому, эту серию можно поставить в один ряд с сильнейшими событиями в районе оз. Ван. Тогда периодичность возникновения таких событий (1945, 1976, 2011 гг.) совпадает с периодом вариаций скорости вращения Земли (~65–70 лет). При этом события 1945 и 2011 гг. произошли на максимуме скорости вращения Земли, а землетрясения 1976 г. – на минимуме. Очевидно, механизмы очагов землетрясений 1976 и 2011 гг. (соответственно сдвиг и взброс) отвечают напряженному состоянию, свойственному каждой из этих двух ситуаций.

Заключение

В работе рассмотрено положение очагов сильнейших землетрясений и роевой сейсмичности в районе озера Ван на фоне поля поглощения поперечных волн. Поле поглощения получено методом короткопериодной коды, когда по набору огибающих коды для многих эпицентров землетрясений строится распределение поля поглощения в верхней мантии. Более подробно рассмотрена сейсмическая ситуация, связанная с возникновением землетрясений 1976 и 2011 гг.

Полученная структура поля поглощения не является окончательной. Она, сохраняя основные черты, может видоизменяться по мере поступления новых данных.

В районе озера Ван прослеживаются общие, с другими сейсмоактивными зонами, особенности структуры поля поглощения поперечных волн в мантии. Выделяются блоки слабого поглощения, изометричные в плане, в которых поглощение уменьшается в направлении от границ к центральным областям блоков, где добротность достигает 300 и даже 700. Среди зон сильного поглощения наиболее заметна широкая зона севернее 39 с.ш., где Q_S~80–110. Кроме того, выделены линейные зоны сильного поглощения небольшой протяженности, ориентированные в направлениях ЮЗ-СВ и ЮВ-СЗ.

Эпицентры сильнейших землетрясений района, в том числе и землетрясений 1976 и 2011 гг., как правило, приурочены к границам добротных блоков.

Эпицентральная область землетрясения 2011 г. представляет собой объем, добротность которого $Q_s \sim 100$, осложненный тремя добротными включениями ($Q_s \sim 180-220$) и двумя секущими зонами более сильного поглощения ($Q_s \sim 80$).

Сейсмическая ситуация, предшествовавшая землетрясению 1976 г., отличалась от таковой перед землетрясением 2011 г. В первом случае, по крайней мере, за год до землетрясения на северо-востоке от очага будущего толчка сформировалась зона затишья. Во втором случае – слабые землетрясения в области очага будущего землетрясения не прекращались в течение года, предшествовавшего главному событию.

За период 2004–2011 гг. выявлено две роевые серии. Одна из них (22 февраля – 10 марта 2011 г.), представленная более чем 40 событиями с m=2,5–4,5 и глубиной h=3–28 км, произошла на северо-западе от области очага землетрясения 2011 г.

Обе роевые серии в той или иной степени ассоциируются с ослабленными зонами. Они либо приурочены к зонам сильного поглощения S-волн (рои 2005-2006 гг.), либо локализованы на границе блока и ослабленной зоны (рой 2011 г.). Гипоцентры роев образуют одномерные объемы (изометричные в плане и вытянутые по вертикали, глубины очагов ~3–30 км).

Как отмечается в работе [Шевченко и др., 2017], интенсивная локализованная сейсмичность, приуроченная к одномерным объемам разной формы и пространственного положения, вероятнее всего, связана с каналами повышенной проводимости, по которым, мигрируют глубинные флюиды. Выявленные одномерные объемы, по описанным выше признакам, по-видимому, могут быть связаны с такими каналами миграции.

Учитывая, что вслед за интенсивной локализованной сейсмичностью могут возникать крупные сейсмические события, такие как землетрясение 2011 г., или за короткое время – несколько землетрясений меньшей силы, как в 2005 г., такие объемы можно интерпретировать как локальные сейсмогенные источники. Другими словами, сейсмическая активность в районе озера Ван в результате дрейфа Аравийской плиты в направлении плиты Евразийской, по-видимому, сочетается с воздействием местных локальных сейсмогенных источников.

Литература

1. Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф. Тонкая структура литосферы и астеносферы Гармского района и ее связь с сейсмичностью. // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 317. №3. – С. 326–330.

2. Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф. Детальное картирование литосферы и астеносферы Гармского района по поглощению поперечных волн. // Вулканология и сейсмология. – 1992. – №5-6. – С. 101–118.

3. Аптикаева О.И. Вариации блоковой структуры и сейсмичности Гармского района на фоне неравномерности вращения Земли. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012а. – №4. – С. 55–65.

4. Аптикаева О.И. Особенности циклических вариации поля поглощения S-волн в ослабленных зонах и блоках. // Геофизические исследования. – 2012б. – Т. 13. №3. – С. 35–44.

5. Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф. Поле поглощения S-волн в ближнем районе площадок АЭС по данным сейсмического мониторинга (на примере АЭС «Аккую», Турция). // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20. №2. – С. 56–72.

6. Баграмян А.Х., Геодакян Э.Г., Папалашвили В.Г. Землетрясение 24 ноября в районе озера Ван. // Землетрясения в СССР в 1976 г. – М.: Наука, 1980. – С. 16–18.

7. Землетрясения Северной Евразии. 2011 год. – Обнинск: ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – 540 с.

8. Каазик П.Б., Копничев Ю.Ф., Нерсесов И.Л., Рахматуллин М.Х. Анализ тонкой структуры короткопериодных сейсмических полей по группе станций. // Физика Земли. – 1990. – №4. – С. 38–49.

9. Каталог землетрясений Кавказа. / Составитель А.А. Годзиковская/ http://zeus.wdcb.ru/wdcb/ sep/caucasus/

10. Саргсян Г.В., Абгарян Г.Р., Мугнецян Э.А., Геворгян А.А. АРМЕНИЯ. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 63–69.

11. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. / Ред. Уломов В.И., Медведева Н.С. // http://seismos-u.ifz.ru/ documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf

12. Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плейттектоническая геодинамики некоторых подвижных поясов и сооружений. – М.: Геос, 2017. – С. 610.

13. Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Е. Современная геодинамика Средиземноморской-Малокавказской части Альпийско-Индонезийского подвижного пояса. // Физика Земли. – 2014. – №1. – С. 40–58.

14. Barka A., Reilinger R. Active Tectonics of Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. // Annali Di Geofisica. – 1997. – Vol. X2. No.3. – Pp. 587–610.

15. Duman T.Y., Can T., Emre O., Kadirioglu F.T., Basturk N.B., Kılıc T., Arslan S., Ozalp S., Kartal R.F., Kalafat D., Karakaya F., Azak T.E., Ozel N.M., Ergintav S., Akkar S., Altınok Y., Tekin S., Cingoz A., Kurt A.I. Seismotectonic database of Turkey // Bull Earthquake. – 2016. – Vol. 16. Issue 8. – Pp. 3277–3316.

16. Elliott J., Copley A., Holley R., Scharer K., Parsons B. The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2013. – Vol. 118. – Pp. 1619–1637.

17. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksoz M.N., Veis G. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. No. B3. – Pp. 5695–5719.

18. Şaroğlu F., Erdoğan R. Çaldıran Fayı'nındepremsonrasıhareketiileilgiligözlemler (Observations on post seismic slip along Çaldıran Fault). // Yeryuvarıveİnsan. – 1983. – No.8. – Pp. 10-11.

19. Tan O., Tapirdamaz M.C., Yoruk A. The Earthquake Catalogues for Turkey // Turkish J. Earth Sci. – 2008. – Vol. 17. – Pp. 405–418.

20. Vanacore E.A., Taymaz T., Saygin E. Moho structure of the Anatolian Plate from receiver function analysis. // Geophys. J. Int. – 2013. – Vol. 193. – Pp. 329–337.

References

1. Aptikaeva O.I., Kopnichev Yu.F. Fine structure of the lithosphere and asthenosphere in the Garm area and its relationship to seismicity, Dokl.Akad. Nauk.SSSR, 1991, Vol. 317, No. 3. pp. 326–330. (In Russ.)

2. Aptikaeva O.I. Kopnichev Yu.F. Detailed mapping of the lithosphere and asthenosphere of the Garm region by transverse-waveattenuation, Volcanology and seismology, 1992, No. 5-6. pp. 101–118. (In Russ.)

3. Aptikaeva O.I. Variations in block structure and seismicity of the Garm Research Area in the background of nonuniform rotation of the Earth, Vopr. Inzh. Seismol., 2012a, Vol. 39, No. 4. pp. 55–65. (In Russ.)

4. Aptikaeva O.I. Cyclic variations characteristics of the s-waves attenuation field in the fault zones and blocks, Geophysical research, 2012b, Vol. 13, No. 3. pp. 35–44. (In Russ.)

5. Aptikaeva O.I., Aptikaev S.F. S-waves attenuation field in the near region of NPP sites by seismic monitoring data (example on the Akkuyu NPP, Turkey), Geophysical research, 2019, Vol. 20, No. 2. pp. 56–72. (In Russ.)

6. Bagramyan A.Kh., Geodakyan E.G., Papalashvili V.G. The earthquake on 24 November near Lake Van, Earthquakes in the USSR in 1976, Moscow: Nauka, 1980. pp. 16–18. (In Russ.)

7. Earthquakes of the Northern Eurasia, 2011. Obninsk: GS RAS, 2017. 540 p. (In Russ.)

8. Kaazik P.B. and Kopnichev Yu.F. Numerical Modeling of the SnWave Group and Coda in an Earth with Varying Velocity and Attenuation, Vulkanol. Seismol, 1990, No. 6. pp. 74–87. (In Russ.)

9. Catalog of Caucasus earthquakes, Compiled by A.A. Godzikovskaya, http://zeus.wdcb.ru/wdcb/ sep/caucasus/ (In Russ.)

10. Sargsyan G.V., Abgaryan G.R., Mughnetsyan E.A., Gevorgyan A.A. ARMENIA, Earthquakes of the Northern Eurasia, 2011.Obninsk: GS RAS, 2017. pp. 63–69. (In Russ.)

11. Specialized catalog of earthquakes for problems of general seismic zoning of the Russian territory Federation / Red. Ulomov V.I., Medvedeva N.S. http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf. (In Russ.)

12. Shevchenko, V. I., Lukk A. A., Prilepin, M. T., Reilinger, R. E., Present-Day Geodynamics of the Mediterranean–Lesser Caucasus Part of the Alpine–Indonesian Mobile Belt, Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2014, V. 50, No.1. pp. 40–58. (In Russ.)

13. Shevchenko, V.I., Lukk, A.A., Guseva, T.V. Autonomous and plateau geodynamics of some mobile belts and structures, M.: GEOS, 2017, 612 p. (In Russ.)

14. Barka A. and Reilinger R. Active Tectonics of Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data, Annali Di Geofisica, 1997, Vol. X2, No. 3. pp. 587–610.

9. Duman T.Y., Can T., Emre O., Kadirioglu F.T., Basturk N.B., Kılıc T., Arslan S., Ozalp S., Kartal R.F., Kalafat D., Karakaya F., Azak T.E., Ozel N.M., Ergintav S., Akkar S., Altınok Y., Tekin S., Cingoz A., Kurt A.I. Seismotectonic database of Turkey, Bull. Earthquake Eng., DOI 10.1007/s10518-016-9965-9

11. Elliott, J., Copley, A., Holley, R., Scharer, K., Parsons, B., The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake, J. Geophys. Res. Solid Earth, 2013, Vol. 118. pp. 1619–1637.

13. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksoz M.N., and Veis G. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, J. Geophys. Res. 2000, Vol. 105, No. B3. pp. 5695–5719.

15. Şaroğlu F., Erdoğan R. Observations on post seismic slip along Çaldıran Fault. Yeryuvarıve İnsan, 1983, No. 8 pp.10–11. (in Turkish).

19. Tan O., Tapirdamaz M.C., Yoruk A. The Earthquake Catalogues for Turkey, Turkish J. Earth Sci., 2008, Vol. 17. pp. 405–418.

20. Vanacore E.A., Taymaz T., Saygin E. Moho structure of the Anatolian Plate from receiver function analysis, Geophys. J. Int. 2013, Vol. 193. pp. 329–337.

= ГЕОФИЗИКА =

VДK 550.34.01

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36476

Обзорная статья

Сейсмическая защита АЭС, проблемы и перспективы

Ф.О. Аракелян ¹2², к.ф.-м.н., И.П. Башилов¹, д.т.н., Ю.Н. Зубко², А.В. Николаев¹, д.ф.-м.н., проф., Д.Г. Левченко³, д.т.н.

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, Большая Грузинская ул., 10, e-mail: nikavs1@gmai.com;

²ООО «Атомсейсмоизыскания», Россия, 125040, Москва, ул. Скаковая, 32/2; ³Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36

Статья поступила: 6 сентября 2019, доработана: 23 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Атомная энергетика в настоящее время вносит существенный вклад в общий объем производимой и потребляемой энергии ряда развитых и развивающихся стран и, в то же время несет повышенную потенциальную опасность в случае аварийных ситуаций на АЭС. Эта опасность имеет социальный характер и связана с возможным радиационным заражением прилегающих к АЭС территорий. В связи с этим безопасности АЭС уделяется особое внимание. Это касается как выбора места расположения АЭС, так и защиты энергетических блоков от опасных внешних воздействий. К таким природным воздействиям в первую очередь относятся геодинамические явления: землетрясения, цунами, сейши, подвижки на активных тектонических разломах, а также геологические проявления: карст, оползни, наводнения и др. Объект исследования системы повышения безопасности объектов атомной энергетики при сейсмических воздействиях. Методы исследования. Обзор современного состояния в области сейсмической защиты АЭС. Результаты работы. Рассмотрено состояние и перспективы развития атомной энергетики в связи с сейсмической и другими природно-техногенными опасностями. Анализирован опыт эксплуатации АЭС, статистика аварий на АЭС, их причины. Наиболее опасными признаны АЭС Азии, где отмечается повышенная сейсмичность. Благодаря усилиям по повышению безопасности АЭС, сделан вывод о снижении сейсмической опасности в связи с глубокой автоматизацией и передачей основных управляющих функций АЭС программному комплексу, совершенствованием алгоритмов принятия решений в случае землетрясения и других чрезвычайных ситуаций. Одна из главных целей глубоко эшелонированной защиты состоит в блокировании опасностей человеческих ошибок и сочетания отказов оборудования и ошибок операторов и распорядителей. Системы безопасности должны включаться автоматически и на некоторое время блокировать действия оператора АЭС. Эффективной защитой энергоблоков, построенных в последние десятилетия, являются герметичные оболочки (контейменты) и размещение над реактором емкости с большим количеством раствора бора, который выливается на реактор при аварии и нейтрализует радиоактивность в случае ее появления. Более детальный анализ сейсмотектонической ситуации площадок действующих АЭС мира привел к необходимости повышения ускорения безопасного останова в ряде АЭС. При проектировании АЭС недостаточно учитывать магнитуду и интенсивность предполагаемых землетрясений, для инженерных расчетов необходимо использовать конкретные параметры колебаний. Среди них важнейшее место занимает ускорение грунта, по которому можно с максимальной уверенностью судить о потенциальных нагрузках на сооружения и оборудование в зоне землетрясения. Приведена модернизированная система сейсмической защиты (ССЗ-1М) энергоблоков отличающаяся надёжностью, отсутствием ложных срабатываний, стабильностью параметров во времени, защитой от внешних несанкционированных воздействий. Практическая значимость работы заключается в повышение безопасности объектов атомной энергетики в условиях повышенной сейсмической опасности.

Ключевые слова: АЭС, землетрясение, природные и техногенные опасности и риски, сети сейсмических наблюдений.

Благодарности: Авторы выражают благодарность А.В. Шутикову за постоянный интерес к проблеме и помощь конструктивными советами и делами.

Для цитирования: Аракелян Ф.О., Башилов И.П., Зубко Ю.Н., Николаев А.В., Левченко Д.Г. Сейсмическая защита АЭС, проблемы и перспективы. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 119-138. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36476.

= GEOPHYSICS =

DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36476</u>

Review

Seismic protection of nuclear power plants, problems and prospects

F.O. Arakelyan¹, I.P. Bashilov¹, Yu.N. Zubko², A.V. Nikolaev¹, D.G. Levchenko³

¹Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya

Str., Moscow 123995, Russian Federation, email: nikavs1@gmai.com;

²Atomseismoizyskania LLC, 32/2 Skakovaya Str., Moscow 125040,

Russian Federation;

³Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy Str., Moscow 117997, Russian Federation

Received 4 August 2019; revised 23 September 2019; accepted 24 September 2019.

Abstract: Relevance. Currently nuclear power makes a significant contribution to the total amount of energy produced and consumed by a number of developed and developing countries and, at the same time, carries an increased potential danger in case of emergency situations at nuclear power plants. This danger has a social character and is associated with possible radiation contamination of adjacent territories. In this regard, special attention is paid to the safety of nuclear power plants (NPP). It is referred both to the choice of the location of the nuclear power plant and to the protection of energy blocks from dangerous external effects. Such natural impacts primarily include geodynamic phenomena: earthquakes, tsunamis, seiches, shifts on active tectonic faults, as well as geological effects: karst, landslides, floods, etc. The object of study is a system for improving the nuclear facilities` safety during seismic impacts. Methods. Survey work of the current state in the field of seismic protection of nuclear power plants. Results. The state and prospects of the development of nuclear energy associated with seismic and other natural and technological hazards are considered. The experience of NPP operating, statistics on accidents at NPP and their causes are analyzed. Nuclear power plants of Asia (where the increased seismicity is observed) are recognized as the most dangerous. As a result of the efforts on safety improving of nuclear power plants, it is concluded that seismic hazard is reduced due to the deep automation and transfer of the main control functions of the nuclear power plant to the software complex, improvement of decision-making algorithms in case of an earthquake and other emergency situations. One of the main goals of the defense in depth is to block the risks of human errors and combination of equipment failures and the errors of operators and managers. Safety systems should turn on automatically and block the actions of the NPP operator for a while. Sealed shells (containers) and placement of containers with a large amount of boron solution over the reactor, which is poured onto the reactor in case of an accident and neutralizes radioactivity, are effective protection for power units built in recent decades. A more detailed analysis of the seismotectonic situation of the sites of existing nuclear power plants in the world has led to the necessity of the increasing speed of safe shutdown in a number of nuclear power plants. During the process of NPP designing, it is not enough to take into account the magnitude and intensity of the probable earthquakes; it is necessary for engineering calculations to use specific vibration parameters. Among them, soil acceleration takes the most important place, which allows estimating the potential loads on structures and equipment in the earthquake zone with maximum certainty. The modernized seismic protection system (SSZ-1M) of power units is characterized by reliability, the absence of false alarms, the stability of parameters in time, and protection against external unauthorized influences. Practical significance. The increase of the nuclear facilities` safety under the conditions of the increased seismic hazard.

Keywords: nuclear power plants, earthquake, natural and technological hazards and risks, seismic observation networks.

Acknowledgments: The authors are grateful to A.V. Shutikov for his constant interest in the problem and help with constructive advice and actions.

For citation: Arakelyan F.O., Bashilov I.P., Zubko Yu.N., Nikolaev A.V., Levchenko D.G. Seismic protection of nuclear power plants, problems and prospects. Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South. 2019.9 (3): 119-138. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36476.

Введение

Атомная энергетика в настоящее время вносит существенный вклад в общий объем производимой и потребляемой энергии ряда развитых и развивающихся стран (США, Франция, Япония, Россия и др.). Это связано с известными преимуществами данной отрасли энергопроизводства: атомная энергия относительно дешевая, электростанции при соблюдении условий безопасности экологически чистые, не требуют непрерывного пополнения ресурсов, отличаются высокой степенью автоматизации и роботизации.

Вместе с тем необходимо отметить, что атомная энергетика несет повышенную потенциальную опасность в случае аварийных ситуаций на АЭС. Эта опасность имеет социальный характер и связана с возможным радиационным заражением прилегающих к АЭС территорий. В связи с этим безопасности АЭС уделяется особое внимание. Это касается как выбора места расположения АЭС, так и защиты энергетических блоков от опасных внешних воздействий. К таким природным воздействиям в первую очередь относятся геодинамические явления: землетрясения, цунами, сейши, подвижки на активных тектонических разломах, а также геологические проявления: карст, оползни, наводнения и др.

Рассмотрим кратко особенности атомной энергетики ряда развитых стран. Атомная энергетика США является крупнейшей в мире по вырабатываемой энергии. По данным за 2017 год, в США работают 99 ядерных реакторов суммарной мощностью 99,6 ГВт [Andrews et al., 2012; Forni et al., 2009; Nuclear & Uranium, 2019], которые вырабатывают 20,05% электроэнергии в стране (средний КИУМ за 15 лет более 90%). Почти все действующие АЭС были построены в период 1967-1990 годов, новые проекты АЭС были запущены лишь в 2013 году [Нормы проектирования, 2001; Nuclear Power in the USA, 2019]. По состоянию на март 2018 в стране продолжается строительство 2-х новых реакторов, общей мощностью 2,5 ГВт.

Сейчас атомная индустрия США переживает не лучшие времена. Ядерный сектор до сих пор ощущает отголоски двух крупных аварий 1979 и 1986 годов. Первая произошла на американской АЭС Три-Майл-Айленд: после этого в США не выдали ни одной лицензии на строительство АЭС до 2012 года. Вторая крупная авария произошла на Чернобыльской АЭС в СССР. Преодолеть негативную волну этих катастроф удалось только в начале XXI века, когда в мире начался новый подъем и разворачивание планов по строительству атомных электростанций.

Эксперты заговорили об «атомном ренессансе», но в этот раз основным вызовом стала не столько ядерная безопасность, сколько способность поставщиков атомной технологии осуществлять сложные, длительные и дорогие проекты по сооружению новых АЭС в срок и в рамках бюджета. С этим вызовом справиться не удалось: против ядерной энергетики играли повышение требований к безопасности (а значит, неминуемое удорожание проектов в сфере мирного атома) и конкурентное давление со стороны других источников электро-энергии (дешевый газ и возобновляемые источники).

Атомная энергетика Франции обеспечивает около 72% всей вырабатываемой в этой стране энергии. По состоянию на март 2018 года, Франция имеет 58 действующих промышленных ядерных реакторов суммарной мощностью 63,1 ГВт. По количеству вырабатываемой атомными электростанциями энергии Франция занимает второе место в мире, а по доле атомной энергетики – первое место. Франция является крупнейшим экспортёром электроэнергии в мире. Обладает технологиями по производству реакторов, производству и утилизации топлива. Международный экспериментальный термоядерный реактор строится именно во Франции.

Уран во Франции не добывается, однако французские компании имеют ряд долгосрочных контрактов на рынке урана. Франция импортирует ежегодно 12,400 тонн концентрата диоксида урана (10,500 тонн урана) для производства электричества. Большая часть поступает от канадского филиала Areva (4500 тонн/год) и Нигерии (3200 тонн/год). Также импорт идёт из Австралии, Казахстана и России, в основном по долгосрочным контрактам. Обогащение урана для собственных нужд производится целиком в метрополии.

В 2015 году правительство Франции решило сократить долю электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, с нынешних 75% до 50% к 2025 году. И хотя президент Макрон заявил о пересмотре данного решения в этом году с возможным продлением сроков его реализации, страна с самой высокой долей атомной энергетики в мире продолжает активно обсуждать различные сценарии сокращения этой доли в своем энергобалансе.

Атомная энергетика Японии с конца двадцатого века была главным национальным приоритетом. Атомные станции Японии до марта 2011 г. вырабатывали до 30% общей производимой энергии, это 19 АЭС с 54 рабочими реакторами. По таким показателям Япония занимала третье место в мире. Однако, с самого начала выражалась обеспокоенность по поводу способности атомных станций Японии выдерживать высокую сейсмическую активность в стране.

После Фукусимской катастрофы в марте 2011 года работа всех японских АЭС была постепенно приостановлена. Появились планы, согласно которым все АЭС Японии должны быть закрыты до 2030 года. Но вскоре стало понятно, что экономика Японии не выдержит без ядерной энергетики. Поэтому сейчас АЭС Японии движутся к повышению уровней безопасности для того, чтобы со временем открыть как можно больше электростанций. Начиная с 2015 года работа некоторых реакторов была восстановлена. В 2017 г. 40 ядерных реакторов формально классифицируются МАГАТЭ и правительством Японии как действующие, однако только 5 из них генерировали электроэнергию, остальные были временно остановлены.

Армянская атомная электростанция занимает особое место среди АЭС, построенных на постсоветском пространстве. Это была первая сейсмостойкая АЭС построенная в СССР в районе с высокой сейсмической активностью (9 баллов по шкале MSK-64). После Спитакского землетрясения (7 декабря 1988 г.), с учетом катастрофических последствий этого землетрясения правительство Армении приняло решение приостановить работу Армянской АЭС. I блок был остановлен 25 февраля 1989 г., а II блок 18 марта 1989 г. Во время Спитакского землетрясения Армянская АЭС работала в штатном режиме, оборудование, трубопроводы, здания и сооружения не пострадали, так как интенсивность сейсмических воздействий на площадке составляла около 6 баллов по шкале MSK-64. Впервые в мировой практике после 6,5 лет консервации 5 ноября 1995 г. II блок Армянской АЭС был запущен в рабочий режим с мощностью до 92% от номинальной.

Многие нормативные акты по сейсмостойкости конструкций, оборудования и антисейсмические защитные системы (СИАЗ), гидроамортизации, инженерной сейсмометрии и пр. впервые были разработаны и внедрены на Армянской АЭС.

Перезапуск Армянской АЭС обеспечил выход из беспрецедентной транспортной и энергетической блокады независимой Армении.

Атомная энергетика России к началу 2017 г. состояла из 10 АЭС с 35 действующими энергоблоками общей мощностью около 28 ГВт, которые вырабатывали до 19% от всей производимой в стране электроэнергии. В последние годы наблюдался значительный рост энергии, вырабатываемой АЭС России: 2012 г. – 177 млрд кВтч, 2016 г. – 196 млрд кВтч, 2017 г. – 203 млрд кВтч. На территории России имеются значительные асейсмичные регионы, пригодные для размещения АЭС. В разработках проекта Энергетической стратегии России на период до 2030 г. предусмотрено дальнейшее увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях до 4 раз. В настоящее время в России ведется строительство 10 энергоблоков на действующих в стране АЭС и 11 атомных станций строится за рубежом в Китае, Индии, Турции, Иране и др. Ведется разработка уникальной плавучей АЭС для обслуживания северных и восточных районов России. Следует отметить, что Рос-

сия обладает технологией полного цикла атомной энергетики: от добычи урановых руд до выработки электроэнергии и утилизации отходов. Имеются значительные разведанные запасы руд, а также запасы ядерного топлива в оружейном виде. Кратко рассмотрим общее состояние атомной энергетики к настоящему времени. В 31 стране мира в настоящее время эксплуатируется 191 атомная электростанция с 449 энергоблоками общей электрической мощностью около 390 ГВт [Operational & Long-Term Shutdown Reactors, 2019]. В стадии строительства находится 56 энергоблоков, 166 энергоблоков закрыты [The Database on Nuclear Power Reactors, 2019]. Закрываются блоки в основном из-за окончания срока эксплуатации, иногда, из-за аварий, по соображениям потенциальной безопасности, или по политическим соображениям.

На рисунке 1 приведено распределение АЭС по странам и континентам. В основном атомные станции сосредоточены в странах с развитой экономикой и относительно низким уровнем сейсмичности. Исключение составляет Япония, где имеется высокая сейсмичность и малые возможности выбора площадок для строительства АЭС. Это накладывает особые требования к обеспечению их безопасности.



Puc. 1. Размещение атомных электростанций в мире. / Fig. 1. Location of nuclear power plants in the world.

Общее количество действующих блоков АЭС с конца 1980-х годов и по настоящее время вышло в мире на устойчивый уровень (рис. 2). Вновь вводимые в строй блоки компенсируют закрывающиеся. Причины ограничения роста количества АЭС можно объяснить недостатком площади асейсмичных территорий, строгими экологическими требованиями, а также отсутствием потребности роста энергетики в ряде стран, их технической отсталостью в развитии высоких технологий.

Динамику развития атомной энергетики можно проследить по вводу в строй новых энергоблоков (рис. 3).

Устойчивый рост можно наблюдать до середины 80-х годов. Ряд аварий на АЭС: американской Три-Майл-Айленд в 1979 г., крупнейшей Чернобыльской АЭС в 1986 г. очень сильно ударил по престижу атомных электростанций. В результате было остановлено строительство ряда крупных АЭС, пересматривалась вся стратегия развития атомной энергетики. В течение последующих пяти лет наблюдался резкий спад количества вводимых энергоблоков. Затем ситуация начала постепенно стабилизироваться и с 2010 г. наблюдается



Puc. 2. Количество действующих энергоблоков атомных электростанций в мире. / Fig. 2. The number of operating units of nuclear power plants in the world.



Рис. 3. Ввод в строй новых энергоблоков АЭС в мире. / Fig. 3. Putting in operation of new nuclear power units in the world.

определенный рост в этой области. Это было связано с разработкой новых существенно более строгих мер по обеспечению безопасности АЭС. Катастрофическая авария на Фукусимской АЭС в Японии не остановила ввод в строй новых энергоблоков в мире, хотя значительно притормозила развитие атомной энергетики в этой стране.

9 (3) 2019

На рисунке 4 приведено распределение по странам количества строящихся энергоблоков АЭС в мире. Здесь лидируют развивающиеся страны: Китай, Россия, Индия.



Puc. 4. Pacnpedeлeнue строящихся энергоблоков АЭС по странам. / Fig. 4. Distribution of nuclear power plants` units under construction over countries.

В связи с авариями на ряде АЭС и глобальной сменой приоритетов энергетической политики в сторону возобновляемых источников энергии (ветра, солнца, гейзеров и т.п.) многие из технически развитых стран (США, Япония, Германия) заявляли о снижении роли атомной энергетики в собственных энергетических планах. Казалось бы, проблемы конкурентов – хорошая новость для «Росатома». Однако специфика атомной отрасли всегда состояла в том, что узкий круг стран-поставщиков ядерных технологий не только конкурировал между собой, но и способствовал развитию мирового рынка. США, Франция, Россия, Япония, Южная Корея, Канада и Китай сотрудничают друг с другом в области совершенствования технологий, усиления ядерной безопасности и развития ядерной инфраструктуры в странах-новичках.

Общие требования к безопасности АЭС

Основной опасностью при эксплуатации реакторов АЭС является их перегрев, который может привести к плавлению ядерного топлива, тепловому взрыву и физическому разрушению теплообменных контуров, в которых содержится большое количество радиоактивной воды. Все эти негативные процессы имели место при катастрофе на АЭС Фукусима-1 в Японии. Во всех случаях основной ущерб возникает не из-за взрыва, а вследствие выброса радиоактивного материала в атмосферу или воду.

В связи с этим основные задачи систем безопасности АЭС при аварии состоят в следующем: остановка цепной реакции, охлаждение реактора и предотвращение выхода радиоактивных веществ за пределы блока. Следует подчеркнуть, что одна из главных целей глубоко эшелонированной защиты состоит в блокировании опасностей человеческих ошибок и сочетания отказов оборудования и ошибок операторов и распорядителей. Преднамеренное отключение систем безопасности персоналом 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС стало одной из основных причин превращения штатной аварийной ситуации в крупнейшую за всю историю атомной энергетики катастрофу. Поэтому, если какие-либо параметры работы реактора выходят за пределы норм, системы безопасности должны включаться автоматически и на некоторое время блокировать действия оператора АЭС.

Анализ аварий на АЭС показывает, что основной их причиной являются ошибочные действия операторов (табл. 1).

Таблица 1. / Table 1.

Дата аварии / Date of accident	Mесто аварии / Accident scene	Причина / Cause	Последствия / Effects
1952 г., 12 декабря / 1952, December 12	Чолк-Ривер (США) / Chalk River (USA)	Ошибка персонала / Staff error	Зараж. акватор. и атмосф. / water and atmosphere contamination
1969 г.,? / 1969,?	Св. Лаврент (Франция) / St. Lawrence (France)	Ошибка персонала / Staff error	Взрыв реактора, заражен. / Reactor explosion, infection
1975 г., 22 марта / 1975, March 22	Браунз Ферри (США) / Browns Ferry (USA)	Ошибка персонала / Staff error	Остановка на 1 год / Stop at 1 year
1979 г., 28 марта / 1979, March 28	Три-Майл-Айленд (США) / Three Mile Island (USA)	Ошибка персонала / Staff error	Эвакуац. 200 тыс. чел. / Evacuation of 200 thousand people
1986 г., 25 апреля / 1986, April 25	Чернобыль (СССР) / Chernobyl (USSR)	Ошибка персонала / Staff error	Консервация АЭС / NPP conservation
1999 г., 30 сентября / 1999, September 30	Токаймура (Япония) / Tokaimura (Japan)	Ошибка персонала / Staff error	Облучение 439 человек / Irradiation 439 people
2004 г., 9 августа / 2004, August 9	«Михама» (Япония) / Mihama (Japan)	Ошибка персонала / Staff error	Были пострадавшие / Affected
2011 г., 11 марта / 2011, March 11	«Фукусима» (Япония) / Fukushima (Japan)	Сейсмич. события / Seismic events	Ликвидация АЭС / NPP liquidation

Перечень ряда аварий на АЭС за последние 60 лет. /

List of a number of accidents at nuclear power plants over the past 60 years.

Системы безопасности должны удовлетворять высоким требованиям по качеству при их изготовлении, монтаже и эксплуатации и выполнять свои функции при любых механических, химических и природных повреждениях, связанных с возникновением аварийной ситуации.

Практически все энергоблоки, строившиеся последние несколько десятилетий, защищены прочными герметичными оболочками (контайментами). Их применение необходимо для защиты в случае внутренней аварии с разрывом крупных трубопроводов и потерей теплоносителя, а также в случае внешних воздействий: землетрясений, цунами, ураганов, смерчей, падений самолётов, взрывов, ракетных ударов и т. д. [Nuclear containments, 2001; Swarup et al., 1992].

Такая оболочка представляет собой массивное сооружение особой конструкции, в котором располагается основное оборудование реакторной установки. Эта конструкция является наиболее характерным в архитектурном плане и важнейшим с точки зрения безопасности зданием атомных электростанций, последним физическим барьером на пути распространения радиоактивных материалов и ионизирующих излучений [Кайоль и др., 1994; Paul, 2005]. В качестве примера новейших разработок в этой области в России можно привести так называемую «ловушку расплава», которую планируют установить на строящейся ЛАЭС-2 с реактором ВВЭР-1200 III+ поколения (в рамках проект АЭС-2006). Устройство локализации расплава активной зоны – это специальная ёмкость, которая расположена под активной зоной реактора. В случае аварии с расплавлением активной зоны высокорадиоактивный топливный расплав стечёт вниз и самолокализуется, что сократит масштабы аварии в силу отсутствия контакта радиоактивного топлива и окружающей среды [Баутин, 2012]

Другой активной мерой защиты является размещение над реактором емкости с большим количеством раствора бора, который выливается на реактор при аварии и нейтрализует радиоактивность в случае ее появления (Баутин). Для снижения давления пара внутри защитной оболочки установлена спринклерная система, которая из-под купола блока разбрызгивает раствор бора и других веществ, препятствующих распространению радиоактивности. Там же ставятся рекомбинаторы водорода, не позволяющие этому газу скапливаться и исключающие возможность взрыва.

География сейсмических угроз для АЭС

При проектировании АЭС производится тщательный выбор строительной площадки в соответствии с весьма жесткими требованиями. В расчет берется уровень сейсмичности максимального расчетного землетрясения (МРЗ), которое может произойти, например, с вероятностью 1 раз в 10 тысяч лет и не более 8 баллов по шкале сейсмической интенсивности. Исходя из этого прогноза осуществляется выполнение соответствующих расчетов для строительных конструкций, проектирование всех трубопроводов и оборудования. На рисунке 5 приведена карта оценки глобальной сейсмической опасности, разработанная по международной программе GSHAP в 1999 г. (Global Seismic Hazard Assessment Program).



Рис. 5. Карта оценки глобальной сейсмической опасности (разработана по программе GSHAP, 1999 г.).

Большинство крупных землетрясений происходят в земных глубинах, на краях тектонических плит. Под воздействием силы, которая давит на их края, они резко меняют положение, проламывают горную породу и сдвигают участки земной тверди. Накопившаяся энергия высвобождается. /

Fig. 5. Assessment map of the global seismic hazard (developed by the GSHAP program, 1999). Most major earthquakes occur in the depths of the earth, at the edges of tectonic plates. Under the influence of the force that presses the edges, they sharply change their position, break through the rock and shift sections of the earth's solid. The accumulated energy is released Из карты следует, что наименее опасные районы для строительства АЭС в экономически развитых и развивающихся странах расположены на большей части территории России, в восточной части Канады, на северо-востоке США, в отдельных частях Индии и Китая. Обширные безопасные области в центральной Африке, на востоке Южной Америки и в Гренландии практически не используются из-за слабого экономического развития.

Из сравнения этой карты с картой размещения АЭС (рис. 1) следует, что, в общем, соблюдается принцип выбора малоопасных районов строительства атомных станций. Вместе с тем, около сотни ядерных энергоблоков в мире расположены в регионах, где возможны сильные землетрясения. Однако в пределах сейсмически активного региона нередко встречаются территории с меньшей интенсивностью землетрясений, которые и выбирают для строительства АЭС, если в более спокойных регионах это невозможно. В большинстве случаев локализация площадок осуществлялась таким образом, чтобы избежать активных разломов. Но иногда более поздние исследования выявляли неизвестные раньше разломы, и это приводило к существенному (в разы и на десятки процентов) повышению планки сейсмической опасности для данной площадки – как на стадии проекта, так и для действующих станций. Яркими примерами служат блоки американской АЭС «Дьябло-Каньон» (ускорение безопасного останова было пересмотрено на стадии проекта с 0,2 g до 0,75 g), японских АЭС «Касивадзаки-Карива» (с 0,46 g до 2,35 g для ряда действующих блоков), «Онагава» (с 0,54 g до 0,59 g), «Фукусима-1» до аварии и закрытия (с 0,38 g до 0,61 g), «Цуруга» (с 0,54 g до 0,81 g) и другие.

В Европе к наиболее сейсмически активным регионам с атомными станциями относятся юго-восток и отдельные районы востока Франции (тут находятся действующие АЭС «Фессенхайм», «Трикастен», «Круа», «Сент-Альбан», площадка «Маркуль» и другие объекты отрасли), восточные и северо-восточные районы Испании (АЭС «Кофрентес», «Ванделлос», «Аско», «Гаронья»), западные районы Швейцарии («Мюлеберг»), запад Словакии («Моховце», «Богунице»), восточные области Румынии («Чернавода»), Словения («Кршко»). В перечисленных районах Франции, Испании, Швейцарии, Словакии возможны землетрясения с периодом повторяемости около 500 лет с ускорением грунта 0,1-0,2 g, в Румынии и Словении – 0,2-0,25 g. В частности, по оценке ЕС, в Румынии с повторяемостью 1 раз в 50 лет (сопоставимой со сроком службы станции) возможны землетрясения магнитудой свыше 7,4, которые могут затронуть район размещения АЭС «Чернавода». В названных странах землетрясения, имеющие меньшую повторяемость, могут быть сильнее.

В США сейсмическая угроза признана значимой для десятков энергоблоков, хотя уровень риска сильно различается. Две действующие атомные станции расположены в штатах, входящих в пятерку наиболее сейсмически активных: «Коламбия» в штате Вашингтон и «Дьябло-Каньон» в штате Калифорния (до недавнего времени в последнем регионе действовала еще одна АЭС – «Сан-Онофре»). В районе, где расположена «Дьябло-Каньон», с периодичностью примерно раз в <500 лет возможны землетрясения с ускорением грунта 0,5-0,7 g; те же параметры для «Коламбии» – 0,1-0,2 g, поскольку АЭС расположена в геодинамически более спокойной, восточной части штата. Ряд атомных станций Востока США также находятся в сейсмически достаточно активных районах, в частности «Ви-Си-Саммер» и «Робинсон» (до 0,3-0,4 g раз в <500 лет).

Большинство прочих АЭС, как считается, подвержены меньшему риску, хотя и в их районах возможны события с 0,1-0,3 g при том же уровне вероятности. И одно из таких событий недавно имело место: в августе 2011 года произошел автоматический останов АЭС «Норд Анна» в штате Виргиния из-за землетрясения магнитудой 5,8, в ходе которого максимальное ускорение грунта в районе площадки достигало ~ 0,25 g. Наиболее сейсмоустойчивая действующая АЭС в США – «Дьябло-Каньон»: она рассчитана на максимальное ускорение грунта в работу до автоматического останова при 0,4 g (хотя

СУЗ выставлена на более раннее срабатывание защиты). На втором месте – закрытая АЭС «Сан-Онофре», для которой максимальное ускорение для уровня SL-2 составляло 0,67 g.

9 (3) 2019

Высокая сейсмическая активность характерна для регионов размещения действующих атомных станций в Азии. Так, на территории современного Ирана на протяжении последних 100 лет произошло множество сильных землетрясений магнитудой до 7,8. По всей стране встречаются районы, где раз в <500 лет вероятны землетрясения с ускорением грунта в 0,45-0,5 g, а в отдельных областях – до 1 g и выше. В районе размещения АЭС «Бушер» землетрясения с такой повторяемостью достигают 0,3 g и более.

Сейсмической активностью отличается и Пакистан. В средней части страны проходит граница Индийской литосферной плиты, изобилующая активными разломами. Только за последнюю сотню лет в Пакистане произошел целый ряд сильных землетрясений магнитудой до 8,0, в том числе с очагами в Аравийском море около побережья Пакистана. В областях, где размещаются атомные станции «Карачи» и «Чашма», вероятны с повторяемостью 1 раз в <500 лет землетрясения с ускорением 0,15-0,3 g и выше.

К числу наименее спокойных сейсмичных районов планеты относится Тайвань, где расположены три действующие и одна строящаяся АЭС с двумя реакторами каждая. За последние 100 лет на острове зафиксировано около двух десятков землетрясений магнитудой 6,0-8,0. На всей территории Тайваня, сравнимого по площади со средней областью в центре Европейской части России, имеются районы, где раз в <500 лет вероятны землетрясения с 0,5 g и выше.

В Китае высокой сейсмической активностью отличаются многие материковые провинции (где нет ни одной АЭС и пока приостановлено утверждение планов их строительства), а также отдельные прибрежные территории, прежде всего вокруг Ляодунского залива, в провинциях Чжецзян и Фуцзянь. Строящиеся атомные станции, расположенные в этих регионах («Саньмэнь», «Хайян», «Хунъянхэ» и другие) размещены с учетом локализации активных разломов.

Япония расположена в сейсмоактивном районе, где разрушительные землетрясения, которые часто приводят к цунами, происходят несколько раз в столетие. В связи с этим была выражена озабоченность по поводу конкретных рисков строительства и эксплуатации атомных электростанций в Японии. На заседании G8 по ядерной безопасности, состоявшимся в Токио в 2008 году, эксперты МАГАТЭ предупредили, что сильное землетрясение с магнитудой выше 7,0 может создать «серьёзные проблемы» для Японских атомных электростанций [IAEA warned Japan over nuclear quake risk: WikiLeaks, 2011. Однако агентство по ядерной и промышленной безопасности Японии, считало, что станции настолько хорошо спроектированы, что «такая ситуация практически невозможна»^[6]. На сегодняшний день, наиболее серьёзный инцидент, связанный с сейсмической активностью, произошёл на станции «Фукусима-1» после землетрясения и цунами 2011 года.

Общие вопросы обеспечения сейсмостойкости АЭС

Существует ряд общих принципов обеспечения сейсмостойкости АЭС, используемых в том или ином виде в различных странах. Как правило, идут от общего к частному: от сейсмического районирования, позволяющего выбрать потенциальный регион размещения, к микрорайонированию и тщательному исследованию собственно площадки и ее частей. Это дает исходный материал для определения возможных нагрузок на элементы АЭС и, соответственно, основных требований к этим элементам при их проектировании.

В рекомендациях МАГАТЭ и нормах целого ряда стран принято разделять сейсмичность, по крайней мере, на два уровня, определяемых всегда индивидуально для конкретной площадки. Первый (уровень Seismic Level-1 или SL-1 в терминологии МАГАТЭ, он же иногда обозначается как S-1) соответствует более вероятному – например, один раз в несколько сотен или тысяч лет, – и менее сильному землетрясению, после которого станция может продолжить работу, как правило, после обследования, но без дорогостоящих восстановительных работ. Теоретически реакторы в ряде случаев могут функционировать при землетрясении первого уровня, но на практике в системах автоматического останова выставляются более низкие значения (обычно в диапазоне 0,1-0,2 g). Кроме того, стандартами ряда стран допускается выход из строя некоторых видов оборудования, не критичного для безопасности.

Второй уровень (SL-2) соответствует менее вероятному землетрясению – например, раз в 10 тыс. лет или реже, – в ходе которого должны гарантированно сохранять работоспособность и функционировать системы, обеспечивающие безопасность станции. Этот уровень часто называют «землетрясением безопасного останова», имея в виду, что при более сильном сейсмическом событии безопасность гарантирована не на 100%. Однако работоспособность другого оборудования, от которого зависит генерация электроэнергии, может быть нарушена, и станция не сможет продолжить функционирование после останова без длительных проверочных и восстановительных работ. К такому оборудованию нередко относят и машинный зал.

Уровни S-1 и S-2 индивидуальны, они могут различаться для разных стран и отдельных АЭС вероятностью и интенсивностью землетрясения, а также заданной реакцией СУЗ на достижение уровня S-1: если для одной станции, построенной, скажем, в 1970-е годы в сейсмически спокойном районе, колебания в 0,125 g превышают планку S-2, то в проекты некоторых АЭС (в Японии, США) заложена техническая возможность работы реактора до останова, например, при 0,3-0,4 g, считающихся экстремальным запроектным землетрясением для большинства других станций.

Нормами ряда государств (США, Великобритании и некоторых других) также предусмотрена возможность анализа «запредельных» сейсмических рисков – гипотетического землетрясения наибольшей интенсивности, в результате которого критически важное для безопасности оборудование сохранит работоспособность с установленной высокой (свыше 90-95%) вероятностью. При этом прочие системы АЭС рассматриваются по остаточному принципу. Этот уровень может превышать S-2 на десятки процентов.

Многоуровневый подход требует разделения элементов АЭС на категории с точки зрения важности функций. Абсолютным приоритетом (первая категория) признаются функции безопасности, включая оборудование неядерной части, ответственное за автономное энергоснабжение, и другие.

Из полученных данных о сейсмике площадки выводятся индикаторы ускорения, включая наиболее наглядный интегрированный показатель – максимальное ускорение грунта. Эти данные становятся отправными для проектных расчетов, и прежде всего для расчетов взаимодействия строений с грунтом, зависящего от характеристик самого грунта (предпочтительны более твердые породы и прочные, необводненные грунты), особенностей геологического основания под осадочными породами, на которых в большинстве случаев покоится станция, а также отклика на колебания элементов зданий, сооружений и оборудования. Последний зависит от множества факторов, таких, как конфигурация зданий, их высота и этажность (на более высоких уровнях амплитуда и нагрузки увеличиваются), собственная частота колебаний конструкций, определяющая возможные резонансы и параметры их затухания, прочностные характеристики материалов и так далее. При проектировании АЭС строятся трехмерные модели колебаний с учетом их распределения по векторам и частоте, модуль и диапазон которой обычно составляет первые несколько десятков герц.

Магнитуда и интенсивность землетрясений, которые могут затронуть данный район, позволяют понять, на какую сейсмику рассчитывать станцию и стоит ли ее строить здесь вообще (если такой выбор имеется; например, при размещении АЭС российских проектов принято избегать районов с возможной интенсивностью выше 9 баллов по MSK). Однако параметры землетрясений, зафиксированных в новейшей истории человечества, для этого не годятся: научные знания о Земле и теория вероятности свидетельствуют о том, что катаклизмы последних сотен лет – как правило, не самые сильные из возможных в данном районе. Необходимо учитывать редкие события, выходящие за рамки исторического периода развития человечества. При этом во многих странах принято устанавливать определенный лимит «редкости», оставляя за рамками рассмотрения катаклизмы, вероятность которых в данном районе признается ничтожной. Эти лимиты устанавливаются на уровне вероятности, например, один раз в тысячу или десять тысяч лет, иногда больше. Таким образом, для размещения АЭС используются карты (готовые – для районирования и специально созданные – для микрорайонирования) не фактически зафиксированных сейсмических событий, а землетрясений, возможных в данном районе с определенной установленной вероятностью. При этом за основу берутся геодинамические и статистические факторы.

Сейсмические явления могут вызываться как глобальными причинами (движение тектонических плит, деформация Земной коры в зонах спрединга или коллизий, вулканические проявления), так и носить местный характер (карстовые явления, оползни). При проектировании АЭС обычно выбирают районы для их размещения с низкой сейсмичностью. По этой причине до последнего времени вопросам защиты АЭС от сейсмических воздействий не уделялось должного внимания. В таблице 1 приведены данные о крупных авариях на АЭС за последние годы с указанием причин. В основном аварии происходили из-за ошибок персонала. Однако после аварии на АЭС Фукусима (2011 год, Япония), вызванной катастрофическим морским землетрясением, сопровождавшимся цунами, вопросам сейсмической безопасности АЭС стали уделять особое внимание. На большинстве АЭС были развернуты системы сейсмического мониторинга и сейсмической защиты, т. е. аврального предупреждения об опасных подвижках земной поверхности [Антоновская и др., 2001; Гатинский и др., 2011].

После определения сейсмических рисков на самом общем уровне следует стадия детального районирования и микрорайонирования, которые позволят локализовать площадку. Современные стандарты требуют ее размещения в пределах однородного, не нарушенного разломами блока земной коры: размещение на разломе опасно не только интенсивными колебаниями, но и смещениями грунта под строениями и сооружениями станции. Однако в прошлые десятилетия этому принципу следовали далеко не всегда (из-за недооценки рисков либо недостаточных геологических знаний), отчего мир получил целый ряд АЭС, расположенных в опасной близости от разломов, например, в Японии и США.

Помимо сейсмики важными параметрами исследования района площадки являются его геологическое строение, гидрология и преобладающие грунты – все это в совокупности тем или иным образом «преломляет» землетрясение, усиливая или ослабляя его воздействие на инфраструктуру. В идеале, который заложен в стандарты ряда стран, включая Россию, такие исследования масштабируются до уровня даже не всей площадки, а отдельных участков, строений и сооружений атомной станции, для которых может быть определена разная сейсмичность. Сейсмичность площадки отражает наибольший показатель для мест размещения строений и сооружений, важных для обеспечения безопасности станции.

При проектировании АЭС недостаточно учитывать магнитуду и интенсивность предполагаемых землетрясений, поскольку эти характеристики являются слишком обобщенными. Для инженерных расчетов используются конкретные параметры колебаний. Среди них важнейшее место занимает ускорение грунта, по которому можно с максимальной уверенностью судить о потенциальных нагрузках на сооружения и оборудование в зоне землетрясения. Поскольку землетрясение сопровождается колебаниями разных параметров, используется понятие «максимальное ускорение грунта», соответствующее наибольшему значению ускорения.

Помимо модуля, важен и вектор колебаний грунта. Любое землетрясение вызывает колебания точки грунта в разных плоскостях, но вертикальные, как правило, менее разрушительны. К примеру, знаменитое катастрофическое землетрясение в Ташкенте, разрушившее город в апреле 1966 года, сопровождалось относительно небольшим числом человеческих жертв именно из-за преобладания вертикальных колебаний. Если в краткой характеристике сейсмоустойчивости АЭС указывается одна цифра для максимального ускорения грунта, то нередко речь идет о наиболее критичной горизонтальной составляющей (хотя для отдельных элементов вертикальные не менее опасны). Между тем определение ускорения грунта – лишь отправная точка для расчетов необходимой сейсмостойкости. Ведь важны не только и не столько колебания самого грунта, сколько отклик на них элементов зданий, сооружений и оборудования АЭС.

Системы сейсмического контроля и сейсмической защиты для АЭС

Все атомные электростанции европейской части России расположены в пределах Северо-Евразийской литосферной плиты со слабым проявлением сейсмичности и современных тектонических подвижек. В связи с этим, в проектах построенных ранее АЭС не предусматривались специальные меры сейсмического контроля и сейсмической защиты. Однако по результатам анализа воздействия аномальных природных явлений на безопасность АЭС, который был проведен после катастрофических событий на АЭС Фукусима-1 (2011 г., Япония), было принято решение об оснащении всех российских АЭС системами сейсмического мониторинга и сейсмической защиты.

Система сейсмической защиты АЭС

В 2012-2015 годах в ООО «Атомсейсмоизыскания» была разработана, внедрена и пущена в опытную эксплуатацию модернизированная система сейсмической защиты (ССЗ-1М) энергоблоков Смоленской АЭС. Работы выполнялись по заданию АО «Концерн Росэнергоатом». При проектировании был учтён опыт создания и эксплуатации отечественных и зарубежных подобных систем. При этом основное внимание было направлено на надёжность, отсутствие ложных срабатываний, стабильность параметров во времени, защиту от внешних несанкционированных воздействий, оперативную ремонтопригодность [Radeva, 2010; Carlos, Tianjian, 2015; Аракелян и др., 1988, 2017; Аракелян, 2009; Сейсмичность..., 2005; Карты..., 2000].

Следует отметить, что сейсмическая активность в Смоленской области, как и на всей территории Центрально-Европейской платформы России, носит весьма умеренный характер. Вероятность превышения сотрясения в 5 баллов по шкале MSK-64 составляет 0.5% в течение 50 лет при периоде повторяемости 10 тысяч лет [Сейсмичность..., 2005; Карты..., 2000]. Однако, согласно особым нормам, проектирование АЭС производится с учетом двух уровней сейсмичности (а не одного, как для обычных сооружений), а именно: – проектное землетрясение (ПЗ) с повторяемостью 1 раз в 1000 лет; – максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) с повторяемостью 1 раз в 1000 лет. Система сейсмической защиты должна быть спроектирована на воздействие максимального расчетного землетрясения с пиковым ускорением грунта не ниже 0,1g (7 баллов по шкале MSK-64).

Новую систему сейсмической защиты CC3-1M отличает применение современного технического и программного обеспечения, привязка к реальному времени с помощью спутниковой системы ГЛОНАС, оперативная доступность для контроля всех параметров, диагностика возможных неисправностей, архивирование действий оператора и долговременное хранение накопленной информации, подача световой и звуковой сигнализации. Для исключения несанкционированного воздействия на аппаратуру CC3-1M извне, внутренняя коммуникационная сеть системы не выходит в Интернет.

Основными требованиями к системе сейсмической защиты являются:

– Надежное выделение сейсмических событий, опасных для работы АЭС.

133

- Возможность автоматического включения систем защиты реактора.

9 (3) 2019

- Обеспечение своевременного оповещения операторов,
- Уменьшение до минимума вероятности ложных тревог,
- Исключение несанкционированного доступа к системе,
- Регулярный автоматический контроль работоспособности.

Под технической надежностью понимается сохранение работоспособности системы при существенных изменениях внешних условий (температуры, напряжения питания и др.), стабильность параметров элементов во времени, возможность периодической проверки работоспособности аппаратуры без прерывания ее функционирования. Под методической надежностью следует понимать обеспечение уверенного обнаружения критического явления и безусловного оповещения операторов станции, а также регистрация этого явления для последующего анализа результатов его воздействия. Сюда можно отнести выбор места установки датчиков по отношению к охраняемому объекту, выбор и обоснование уровня порогов срабатывания. Организационная надежность подразумевает комплекс мер по безопасному размещению аппаратуры, исключению возможности несанкционированного доступа, регулярного контроля работоспособности.

Работа системы сейсмической защиты ССЗ-1М основана на мажоритарном принципе совпадения сигналов существенных сейсмических событий, зарегистрированных в районе АЭС, в пространстве и во времени (рис. 6). Этот принцип реализуется путем разноса датчиков сейсмических сигналов на определенное расстояние вокруг охраняемого блока АЭС и применением схемы совпадений с определенным временным интервалом. Такой принцип работы предохраняет систему от ложных срабатываний за счет местных помех (транспорт, грузоподъемные операции и др.) и сохраняет чувствительность к сигналам от удаленных сейсмических источников достаточной интенсивности.



Рис. 6. Принцип организации системы сейсмической защиты ССЗ-1М для АЭС в России. Fig. 6. The principle of organization of the SSZ-1M seismic protection system for nuclear power plants in Russia.

Система состоит из шести сейсмических групп – по две группы на каждый энергоблок АЭС. Группа содержит три независимых сейсмоизмерительных тракта, датчики которых разнесены по поверхности на расстояния до 500 м вокруг соответствующего блока. В каждом тракте измеряются три компоненты сейсмического сигнала, вычисляется вектор ускорения и сравнивается с установленным порогом. Сигналы, превышающие порог, поступают на схему совпадений с алгоритмом срабатывания два изтрех. Такая схема исключает возникновение ложного сигнала тревоги при локальном воздействии на один из трактов.

9 (3) 2019

Система сейсмического контроля площадок АЭС

Требования к структуре и функционированию региональной сети сейсмического контроля для атомных электростанций имеют существенные особенности, а именно:

 Регистрируются ускорения, а не скорости смещения грунта, в отличие от большинства обычных сейсмологических сетей.

– Сейсмоприемники располагаются на постаменте в непосредственной близости от основных объектов АЭС на свободной поверхности, на средних и скальных грунтах.

 При этом выбор мест расположения аппаратуры и способы ее установки должны минимизировать влияние помех от производственных объектов, транспортных путей, природных источников помех.

 Осуществляется максимальная автоматизация процесса регистрации для уменьшения влияния человеческого фактора на результаты оценки сейсмической опасности.

 Обеспечивается высокая степень технической и организационной надежности всей системы регистрации сигналов, передачи информации в пункт сбора и ее оперативной оценки, и дальнейшего анализа.

Сейсмический контроль на свободной поверхности площадок действующих АЭС выполняется на специально выбранных опорных пунктах регистрации ускорения грунта на 9 площадках действующих АЭС РФ (кроме Билибинской). Постаменты для регистрации сейсмических сигналов опираются на средние грунты, ниже уровня сезонного замерзания и защищены от помех и микросейсм. На рисунке 7. показана структура и схема функционирования региональной сети сейсмологического контроля и регистрации ускорения грунта на площадках АЭС РФ.



Рис. 7. Структура и схема функционирования региональной сети сейсмологического контроля и регистрации ускорения грунта на площадках АЭС РФ. /

Fig. 7. The structure and functioning scheme of the regional network of seismological monitoring and registration of soil acceleration at the NPPs of the Russian Federation.

Опорные пункты на площадках АЭС обеспечивают сейсмический контроль и регистрацию ускорения грунта от локальных, местных и далеких землетрясений по району размещения АЭС.

– Акселерографы способны регистрировать более широкий динамический диапазон колебаний грунта в используемом диапазоне частот 0,02-50 Гц, при пороге чувствительности к ускорениям до 0,001g. При этом лучше регистрируются вступления импульсных воздействий. В сейсмологии сильных движений грунта ключевыми параметрами являются пиковые ускорения и длительность главной фазы сотрясения, которые определяются по записям акселерограмм.

В расчетах сейсмостойкости или сейсмической реакции сооружений непосредственно используются акселерограммы колебаний грунта. Частотный состав колебаний в записях акселерограмм и собственных колебаний крупных сооружений в основном достаточно близки друг другу. Записи ускорений служат основой при разработке реальных акселерограмм для проектных рассчетов сейсмостойкости.

— Погрешности, связанные с оцифровкой записей акселерограмм, легче устраняются при числовой обработке. Устанавливается исходное нулевое значение запуска акселерограмм и в последующих расчетах скоростей и смещений корректировки уже не требуются. Записи акселерограмм достаточно легко подвергаются гармоническому анализу и обработке. Специально для нужд проектировщиков существуют современные вычислительные средства по корректировке, фильтрации, конвертации, нормированию и масштабированию этих записей.

В соответствии с принятыми решениями регистрация акселерограмм на площадках АЭС должна проводиться непрерывно с передачей данных по телеметрическим каналам в центр сбора и обработки информации. Системы контроля и регистрации должны быть построены с максимальным использованием однотипной сертифицированной отечественной аппаратуры.

Пункты наблюдения размещаются в специальных металлических утеплённых контейнерах (рис. 8 и 9), установленных на бетонных фундаментах. К контейнеру подводится напряжение 220 В, которое поступает на аппаратуру через блок бесперебойного питания (ББП). Корпус контейнера заземлен. Пункт регистрации оснащен системой связи по интерактивному телеметрическому каналу.



Puc. 8. Контейнер пункта сейсмического контроля Смоленской АЭС. / Fig. 8. The container of the seismic control point of Smolensk NPP



Puc. 9. Внутренний вид пункта сейсмического контроля Смоленской АЭС. / Fig. 9. The internal view of the seismic control point of Smolensk NPP

Заключение

Атомная энергетика вносит существенный вклад не только в общий объем производимой и потребляемой энергии, но и в развитие наукоемких технологий, общий интеллектуальный потенциал России.

В настоящее время происходит не только дальнейший рост строительства объектов атомной энергетики, но и особо ответственных объектов – химических заводов, плотин, и других. Несмотря на то, что последние годы наблюдается общее увеличение сейсмической активности, безопасность эксплуатации АЭС постоянно растет. Это во многом связано с

тем что внедряются новые методы автоматического управления АЭС, расширяются функции принятия управленческих решений, требующих быстрого и правильного реагирования, полнее контролируется сейсмичность площадок АЭС. Используются новые материалы при строительстве, снижается вероятность разрушения, это эквивалентно снижению сейсмических ускорений при сильных землетрясениях.

Принимая во внимание постоянное улучшение физико-механических свойств строительных материалов, приходим к выводу, что уже в близком будущем антисейсмическое строительство решит те задачи, которые сейчас требуют усиления и наращивания систем контроля сейсмичности.

Стечение природных катаклизмов на территории расположения АЭС в России, которые могут повлечь за собой аварию, сопоставимую с аварией на станции «Фукусима-1», невозможно. В настоящее время все российские АЭС находятся в зонах низкой сейсмоопасности. В европейской части русской платформы, которая считается устойчивым массивом, землетрясения либо не происходят вовсе, либо происходят, но с небольшой интенсивностью (не более 5-6 баллов по шкале MSK-64). Однако, вследствие высокой социальной ответственности было принято решение оснастить все АЭС России системами сейсмического контроля и сейсмической защиты.

В 2012-2015 годах в ООО «Атомсейсмоизыскания» была разработана, внедрена и пущена в опытную эксплуатацию система сейсмической защиты энергоблоков Смоленской АЭС, которая успешно прошла этап опытной эксплуатации без существенных замечаний.

В 2011-2013 годах была создана региональная сеть сейсмического контроля площадок действующих АЭС. При проектировании был учтён опыт создания и эксплуатации отечественных и зарубежных подобных систем.

Основные аварии на атомных станциях происходили за счет ошибочных действий персонала (Три-Майл-Айленд, США, Чернобыльская АЭС, СССР и др.). Поэтому при разработке систем сейсмической защиты для Российских АЭС существенное внимание уделялось вопросам автоматизации процессов измерений сейсмичности и выработки решений на остановку работы реакторов с минимальным участием операторов. За последние 16 лет на российских АЭС не зафиксировано ни одного серьезного нарушения безопасности, классифицируемого выше первого уровня по Международной шкале ИНЕС.

Литература

1. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Рогожин Е.А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения. // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51. № 1. – С. 5-15.

2. Аракелян Ф.О. Методика и результаты исследований сейсмической опасности площадок АЭС. – Ереван: Егея, 2009. – 108 с.

3. Аракелян Ф.О., Зубко Ю.Н., Левченко Д.Г. Особенности создания и эксплуатации системы сейсмической защиты для АЭС. // Сейсмические приборы. – 2017. – Т. 53. № 3. – С. 20-30.

 Аракелян Ф.О., Мнацаканян В.Л., Акопян Г.А. Экспериментальные исследования по сейсмозащите сооружений АЭС. // В сб. Экспресс-информация «Энергетика электрификация». Сер. Сооружения атомных электростанций. Вып. 9. – 1988. – С. 11-74.

5. Баутин А.В. Безопасность атомных электростанций: от Чернобыля до Фукусима – 1. // Материалы двадцать первой научно-технической конференции «Системы безопасности – 2012». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – С. 42-46.

6. Гатинский Ю. Г., Рундквист Д. В., Владова Г. Л., Прохорова Т. В. Анализ геодинамики и сейсмичности в районах расположения главнейших электростанцийевропейской части России и ближайшего зарубежья. // Пространство и время. – 2011. – Вып. 4. – С. 196-204.

7. Кайоль А., Щапю К., Щоссидон Ф., Кюра Б., Дюонг П., Пелль П., Рище Ф., Воронин Л. М., Засорин Р. Е., Иванов Е. С., Козенюк А. А., Куваев Ю. Н., Филимонцев Ю. Н. Безопасность атомных станций. – Париж: EDF-EPN-DSN, 1994. – 256 с.

8. Карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. – М. – 2000.

9. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций: НП-031-01. // Ростехнадзор РФ. – 2001.

10. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. / Отв. ред. Уломов В.И. // ИФЗ РАН. Т. 1-3. – 1993. – 490 с.

11. Andrews A., Folger P. Nuclear Power Plant Design and Seismic Safety Considerations. // Energy and Natural Resources Policy. – 2012 January 12. – Pp. 20-23.

12. Carlos Medel-Vera, Tianjian Ji. Seismic protection technology for nuclear power plants: a systematic review. // Jour. Nucl. Sc. Techn. – 2015. – V. 52. Is. 5. – Pp. 607-632.

13. Forni M. et al. Seismic Isolation of the Iris Nuclear Plant. // Proc. of the 2009 ASME pressure Vessel and Piping Conference. Prague. Czech Republic. July 26-30.

14. IAEA warned Japan over nuclear quake risk: WikiLeaks. March 17, 2011 [Electronic resource]. / https://phys. org/news/2011-03-iaea-japan-nuclear-quake-wikileaks. html

15. Nuclear containments. / State-of-art report prepared by Task Group Containment Structures. – Stuttgart: Federation international du beton, 2001. – Pp. 100.

16. Nuclear & Uranium. August 29, 2019 [Electronic resource]. / https://www. eia. gov/nuclear/generation/

17. Nuclear Power in the USA. August, 2019 [Electronic resource]. / https://www. world-nuclear. org/ information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power. aspx

18. Operational & Long-Term Shutdown Reactors. 2019 [Electronic resource]. / https://pris. iaea. org/ PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry. aspx

19. Paul Ih-fei Liu. Energy, technology, and the environment. – New York: ASME, 2005. – 275 p.

20. Radeva S. Multiple-model structural control for seismic protection of nuclear power plant. // Nuclear. Engineering and Design. – 2010. – V. 240. Is. 4. – Pp. 891-898.

21. Swarup R., Mishra S. N., Jauhari V. P. Environmental Science And Technology. – New Delhi: Mital publications, 1992. – 329 p.

22. The Database on Nuclear Power Reactors. 2019 [Electronic resource]. / https://pris. iaea. org/pris/

References

1. Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K., Rogozhin E.A. Seismic monitoring of industrial facilities: problems and solutions. Seismic instruments. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 5–15. (In Russ.)

2. Arakelyan F.O. Methodology and the results of seismic hazard studies of NPP sites. Yerevan: Egeya, 2009. 108 p. (In Russ.)

3. Arakelyan F.O., Zubko Yu.N., Levchenko D.G. Features of the creation and operation of a seismic protection system for nuclear power plants. Seismic instruments. 2017. Vol. 53. No. 3. pp. 20–30. (In Russ.)

4. Arakelyan F.O., Mnatsakanyan V.L., Akopyan G.A. Experimental studies on seismic protection of NPP facilities. In the collection Express information "Power Electrification". Ser. The construction of nuclear power plants. 1988. Vol. 9. pp. 11–74. (In Russ.)

5. Bautin A.V. Safety of nuclear power plants: from Chernobyl to Fukushima – 1. Materials of the twenty-first scientific and technical conference "Security Systems – 2012". M.: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2012. pp. 42–46. (In Russ.)

6. Gatinsky Yu.G., Rundkvist D.V., Vladova G.L., Prokhorova T.V. Analysis of geodynamics and seismicity in the areas where the most important power plants are located in the European part of Russia and the neighboring countries. Space and time. 2011. Issue 4. pp. 196–204. (In Russ.)

7. Kajol' A., Shchapyu K., Shchossidon F., Kyura B., Dyuong P., Pell' P., Rishche F., Voronin L.M., Zasorin R.E., Ivanov E.S., Kozenyuk A.A., Kuvaev Yu.N., Filimoncev Yu.N. Nuclear Safety. Paris: EDF-EPN-DSN. 1994. 256 p. (In Russ.)

8. Maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Moscow, 2000. (In Russ.)

9. Design norms for earthquake-resistant nuclear power plants: DN-031-01. Rostekhnadzor of the Russian Federation. 2001. (In Russ.)

10. Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia. Ans. ed. Ulomov V.I. IFZ RAS. Vol. 1-3. 1993. 490 p. (In Russ.)

11. Andrews A., Folger P. Nuclear Power Plant Design and Seismic Safety Considerations. Energy and Natural Resources Policy. 2012 January 12. pp. 20–23.

12. Carlos Medel-Vera, Tianjian Ji. Seismic protection technology for nuclear power plants: a systematic review. Jour. Nucl. Sc. Techn. 2015. Vol. 52. Issue 5. pp. 607–632.

13. Forni M. et al. Seismic Isolation of the Iris Nuclear Plant. Proc. of the 2009 ASME pressure Vessel and Piping Conference. Prague. Czech Republic. July 26-30.

14. IAEA warned Japan over nuclear quake risk: WikiLeaks. March 17, 2011 [Electronic resource]. https://phys.org/news/2011-03-iaea-japan-nuclear-quake-wikileaks.html

15. Nuclear containments. State-of-art report prepared by Task Group Containment Structures. Stuttgart: Federation international du beton, 2001. pp. 100.

16. Nuclear & Uranium. August 29, 2019 [Electronic resource]. https://www.eia.gov/nuclear/generation/

17. Nuclear Power in the USA. August, 2019 [Electronic resource]. https://www.world-nuclear.org/ information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx

18. Operational & Long-Term Shutdown Reactors. 2019 [Electronic resource]. https://pris.iaea.org/ PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx

19. Paul Ih-fei Liu. Energy, technology, and the environment. New York: ASME, 2005. 275 p.

20. Radeva S. Multiple-model structural control for seismic protection of nuclear power plant. Nuclear. Engineering and Design. 2010. Vol. 240. Issue 4. pp. 891–898.

21. Swarup R., Mishra S.N., Jauhari V.P. Environmental Science And Technology. New Delhi:Mital publications, 1992. 329 p.

22. The Database on Nuclear Power Reactors. 2019 [Electronic resource]. https://pris.iaea.org/pris/

===== ГЕОФИЗИКА =

VДК 550.34.063, 550.344.56, 550.347.29, 550.347.62 DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36482</u>

Оригинальная статья

Об оценке результатов метода микросейсмического зондирования при их геологической интерпретации

А.В. Горбатиков 问, к.ф.-м.н., А.А. Цуканов 问², к.ф.-м.н.

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: avgor70@mail.ru;

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634055, г.

Томск, просп. Академический, 2/4,

e-mail: a.a.tsukanov@yandex. ru

Статья поступила: 6 июня 2019, доработана: 19 июля 2019, одобрена в печать: 20 июля 2019

Аннотация: Актуальность работы. Метод микросейсмического зондирования (ММЗ) стал широко применятся при глубинных исследованиях. В ходе полевых исследований авторы получили ряд результатов, которые вновь ставят вопрос о необходимости более тщательных исследований свойств ММЗ, связанных с вопросом о его разрешении по вертикали и интерпретации субгоризонтальных структур. Объектом исследования является геологическая среда. Цель работы – анализ результатов двумерного численного решения прямой задачи рассеяния фундаментальной моды Рэлея на двух скоростных неоднородностях, расположенных друг под другом. Метод исследования – математическое моделирование взаимодействия упругих сейсмических волн с произвольными неоднородностями среды в линейно-упругом изотропном полупространстве со свободной поверхностью. Данная модель позволила проанализировать некоторые случаи использования метода микросейсмического зондирования (ММЗ) в условиях сложно построенных сред. С использованием численной модели, построенной из первых принципов в прямом моделировании получены оценки вертикальной разрешающей способности метода микросейсмического зондирования. Результаты работы. Рассмотрены случаи ряда конкретных геометрических размеров и ряда упругих параметров включений, со значениями, близкими к встречающимся в природных условиях. Выработаны и сформулированы простые практические приемы, с помощью которых можно оценивать вертикальное разрешение объектов при интерпретации разрезов микросейсмического зондирования по экспериментально полученным разрезам. Оценка вертикальной разрешающей способности ММЗ на синтетических данных состоит в том, что, если расстояние между центрами двух малых по сравнению с глубиной залегания неоднородностей, расположенных друг над другом, составляет 36-41 % (или более) от длины фундаментальной моды волны Рэлея, равной $\lambda_R = H_{center} / 0,4$, где $H_{center} - глубина середины между центрами$ неоднородностей, то изображения этих неоднородностей будут разрешены в поле случайных волн Рэлея. То есть, для разрешимости по ММЗ расстояние по вертикали между центрами малых неоднородностей должно составлять Н_{септег} или более. Практическое значение работы. Выработанные приемы использованы для оценки разрешения горизонтально залегающих слоев в разрезах, полученных в ходе изучения зоны сочленения Таманского полуострова и Крыма при геологической интерпретации результатов микросейсмических исследований.

Ключевые слова: метод микросейсмического зондирования, вертикальное разрешение, микросейсмическое поле, волны Рэлея, компьютерное моделирование.

Благодарности: Параллельные расчеты выполнены в 2016 г. на высокопроизводительном кластере «Ломоносов-1» Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова [Sadovnichy et al., 2013].

Работы выполнены при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-6823.2015.5 «Экспериментальные и численные исследования влияния неоднородности среды на параметры поля поверхностных волн».

Для цитирования: Горбатиков А. В., Цуканов А. А. Об оценке результатов метода микросейсмического зондирования при их геологической интерпретации. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 139-150. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36482.

GEOPHYSICS =

DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36482</u>

Original paper

About the evaluation of the results of the microseismic sounding method in their geological interpretation

A.V. Gorbatikov 🕑 , A.A. Tsukanov D²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1
 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123995, Russian Federation, e-mail: avgor70@mail. ru;
 ² Institute of Strength Physics and Materials Sciens Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk 634055, Russian Federation, e-mail: a. a. tsukanov@yandex. ru

Received 6 June 2019; revised 19 July 2019; accepted 20 July 2019.

Abstract: Relevance. The microseismic sounding method (MSM) has become widely used in deep investigations. In the course of field studies, the authors obtained a number of the results that face again an issue of the necessity for more curious research of the MSM properties associated with the question of its vertical resolution and interpretation of subhorizontal structures. The object of the study is the geological environment. **Aim.** To analyze the results of a two-dimensional numerical solution of the direct problem of scattering of the fundamental Rayleigh mode from two velocity inhomogeneities located one under other. Methods. Mathematical modeling of the interaction of elastic seismic waves with arbitrary medium inhomogeneities in a linearly elastic isotropic half-space with a free surface. This model made it possible to analyze some cases of using the microseismic sounding method (MSM) under the conditions of complexly constructed media. The estimates of the vertical resolution of the microseismic sounding method are obtained using a numerical model constructed from the first principles in a direct modeling. Results. The article considers the cases of a number of specific geometric dimensions and a number of elastic parameters of inclusions with the values close to those encountered in natural conditions. Simple practical methods have been developed and formulated; it is possible with their help to evaluate the vertical resolution of objects in interpreting microseismic sounding sections from experimentally obtained sections. An estimation of the vertical resolution of the MSM on synthetic data consists in the fact that if the distance between the centers of two small inhomogeneities located one above the other, as compared with the depth, is 36–41% (or more) of the fundamental Rayleigh wave mode length equal to $\lambda_{\rm R}$ = H_{center} / 0.4, where H_{center} is the depth of the middle between the centers of inhomogeneities, then the images of these inhomogeneities will be resolved in the field of random Rayleigh waves. That is, for solvability by MSM, the vertical distance between the centers of small inhomogeneities should be H_{center} or more. Practical significance. The developed techniques were used to assess the resolution of horizontally occurring layers in the sections obtained during the study of the Taman Peninsula and Crimea junction zone during a geological interpretation of the results of microseismic studies.

Keywords: method of micriseismic sounding, vertical resolution, microseismic field, Rayleigh waves, computer numerical simulation.

Acknowledgments: Parallel calculations were performed in 2016 on the high-performance cluster "Lomonosov-1" of the Scientific and Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University [Sadovnichy et al., 2013].

The work was supported by the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of sciences No. MK-6823.2015.5 "Experimental and numerical studies of the influence of medium heterogeneity on the parameters of the surface wave field".

For citation: Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A. About the evaluation of the results of the microseismic sounding method in their geological interpretation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019.9 (3): 139-150. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36482.

Введение

Предложенный ранее [Горбатиков и др., 2008] метод микросейсмического зондирования (ММЗ) исходит из допущения, во многих случаях обоснованного, что основной вклад в энергию вертикальной компоненты естественного микросейсмического поля осуществляется за счет фундаментальных мод волн Рэлея. Вклад высших мод предполагается существенно меньшим и рассматривается как источник шума для метода. Первоначально ММЗ был сформулирован как феноменологический метод. Основой для него явились экспериментальные наблюдения, что скоростные включения с увеличенными скоростями сейсмических волн по отношению к вмещающим породам вызывают уменьшение амплитуд микросейсмических волн над ними [Gorbatikov et al., 2004], и наоборот, включения с пониженными скоростями вызывают повышение амплитуд. Позже это явление было изучено более тщательно в серии работ по численному моделированию [Горбатиков, Цуканов, 2011; Цуканов, Горбатиков 2015]. Появились модификации применения метода [Жостков и др., 2015]. Также появились работы, где механизм образования полезного информативного сигнала в ММЗ объясняется на основе аналитического решения прямой задачи [Яновская, 2017].

Распространёнными в мире методами, родственными ММЗ, являются: 1) модификации метода поверхностно-волновой томографии на основе оценки фазовой части функции Грина по кросс-корреляционной функции [Snieder, 2004; Shapiro, Campillo, 2004; Sabra et al., 2005; Shapiro et al., 2005; Королева и др., 2009], 2) модификации метода пространственной корреляции (SPAC-методы) [Aki, 1957; Malagnini et al., 1993; Chouet et al., 1998; Ohori et al., 2002; Zhang et al., 2004; Chaves-Garcia et al., 2005; Okada 2006]; 3) модификации метода отношения компонент (H/V-методы) [Nakamura, 1989; Panou et al., 2004; Tanimoto, Alvizuri, 2006] и др.

При всем разнообразии технологий реализации (применение сейсмических групп или отдельных точечных измерений) перечисленные подходы объединены тем, что используемая в них модель формирования микросейсмического поля базируется на представлении об обязательной выдержанной локальной слоистости среды. Соответственно, горизонтальное разрешение этих методов составляет величину 3-5 λ_R , где λ_R – длина волны фундаментальной моды Рэлея, взаимодействующая с неоднородностью.

Модель формирования микросейсмического поля в ММЗ не исходит из обязательной выдержанной по горизонтали слоистости среды. В этой связи, а также в связи с поверхностной природой источников микросейсм [Монахов, 1977; Табулевич, 1986, Bard, 1999; Bromirski, 2001] считается, что основной вклад в микросейсмическое поле (его вертикальную компоненту) вносится фундаментальными модами Рэлея, а наличие высших мод минимально. Информативным параметром (полезным сигналом) в ММЗ является степень искажения амплитудного поля при взаимодействии со скоростными неоднородностями. Фазовая информация не используется. Форма и глубина залегания неоднородности оценивается исходя из распределения искажений исходного поля на поверхности и частоте, на которой эти искажения проявляются. В [Горбатиков, Цуканов, 2011] показано, что существует критическая частота f волны Рэлея, для которой искажения от неоднородности, залегающей на глубине Н под точкой наблюдения максимальны по сравнению с искажениями от этой же неоднородности на соседних частотах спектра, то есть в спектре на этой частоте образуется локальный экстремум. Эта частота f связана с глубиной H и соответствующей скоростью фундаментальной моды волны Рэлея V_R (f) через соотношение: $H \approx 0.4 \cdot V_R$ (f)/ $f=0.4 \cdot \lambda_R$ (f), что подтверждается модельными расчетами и исследованиями геологических объектов различного масштаба и генезиса. Данное соотношение используется в ММЗ для оценки глубины залегания неизвестной неоднородности, формирующей амплитудные искажения (которые мы можем наблюдать) на частоте f. Такая оценка глубины производится из предположения, что в микросейсмическом поле f однозначно связана с λ_R (f) – длиной волны фундаментальной моды Рэлея.



Расстояние вдоль профиля №1 (Керченский берег), км / Distance along profile №1 (Kerch coast), km

Рис. 1. Разрезы по методу микросейсмического зондирования, полученные вдоль двух профилей по Таманскому и Керченскому берегам в исследованиях 2014 года. Карта-схема расположения профилей приведена в правом верхнем углу рисунка. /

Fig. 1. Vertical sections by the method of microseismic sounding, obtained along two profiles at Taman and Kerch banks in 2014 studies. The schematic map of profiles is shown in the upper right corner of the figure.

Согласно численным экспериментам [Горбатиков, Цуканов, 2011], разрешающая способность метода при восстановлении изображения по горизонтали оценивается как $(0,25-0,3) \lambda_R$, где $\lambda_R - эффективная длина зондирующей волны Рэлея для глубины залегания неоднородностей. Оценка разрешения по вертикали составляет величину <math>(0,3-0,5) \lambda_R$, где $\lambda_R - эффективная длина волны для средней глубины неоднородности. Обе оценки были сделаны по анализу чувствительности формы амплитудной реакции к размеру восстанавливаемого скоростного включения, что не является достаточно строгим результатом. При этом было показано, что обнаружить присутствие изолированной малой неоднородности возможно, даже если ее размеры меньше длины волны в 10 и более раз.$

Способом получения более точной оценки вертикальной разрешающей способности MM3 было бы проведение серии экспериментов с двумя неоднородностями, расположенными друг под другом на разных глубинах.

Разрешение ММЗ по горизонтали изучалось в исследовании [Цуканов, Горбатиков, 2015] на модели из двух рядом стоящих включений. Первоначальная оценка того, что два малых по сравнению с длиной волны включения формируют по ММЗ два различных изображения, если расстояние между их центрами составляет четверть эффективной зондирующей волны Рэлея, было подтверждено. Кроме того, было установлено, что этот вывод

применим к таким средам и включениям, коэффициент Пуассона в которых приближается к нормальному значению 0,25. В случае, если коэффициент Пуассона во включении приближается к нулю, то появляется кажущийся эффект «сверхразрешения». Это означает, что два малых тела формируют по MM3 раздельные изображения, даже когда они расположены на значительных глубинах, где ожидалось бы слияние двух изображений в одно, и для них эффективная длина волны велика.

В ходе полевых исследований авторы получили ряд результатов, которые вновь ставят вопрос о необходимости более тщательных исследований свойств MM3, связанных с вопросом о его разрешении по вертикали. В 2014 году были проведены комплексные геолого-геофизические исследования зоны сочленения Таманского полуострова и Крыма. Были получены разрезы вдоль четырех региональных профилей по методу MM3. Основной результат с точки зрения тектоники региона состоял в обнаружении и позиционировании в исследуемом районе глубинного крупного тектонического разлома субдолготного простирания, данные о котором не встречались нигде в ранних исследованиях. Предварительные результаты опубликованы в [Рогожин и др., 2015].

Однако, продолжающаяся работа по геологической интерпретации полученных разрезов (рис. 1) ставит ряд вопросов. В частности, согласование между собой результатов профилирования по MM3 и недавних результатов геолого-морфологического исследования палеодеформаций на Керченском побережье Крыма требует однозначного ответа на вопрос о том, как между собой соотносятся субгоризонтальные структуры, проявившиеся в разрезах MM3. Можно ли считать, например, выделенные низкоскоростные слои A и Б, В и Г на рисунке 1 различными горизонтами, или они являются недостаточно уверенным картированием одной и той же структуры.

С ответом на этот вопрос будет связана дальнейшая геологическая интерпретация полученных результатов. Эта конкретная проблема сделала необходимым провести специальный цикл модельных исследований разрешающей способности ММЗ по вертикали. Описание результатов этого исследования приводится в настоящей статье.

Постановка и проведение моделирования

Численное решение прямой задачи метода микросейсмического зондирования производилось с использованием параллельного программного комплекса полноволнового моделирования взаимодействия упругих сейсмических волн с произвольными неоднородностями среды в линейно-упругом изотропном полупространстве со свободной поверхностью. Математическая модель, численная схема и ее параллельная реализация подробно описана в работе [Горбатиков, Цуканов, 2011].

Для исследования механизмов формирования «изображения» неоднородности в амплитудной реакции поля поверхностных микросейсмических волн с целью определения вертикального разрешения ММЗ, достаточно ограничиться двумерной постановкой численного эксперимента с двумя заглубленными друг под другом неоднородностями (рис. 2). Такая постановка в достаточной мере моделирует экспериментальную ситуацию, описанную выше. Поскольку из результатов съемки (рис. 1) видно, что вблизи поверхности мы имеем дело с горизонтальными обширными слоями, то моделирование в двумерной постановке вполне оправдано.

Механические свойства модельной среды были выбраны из соображений приближения к средним значениям скоростей сейсмических волн в исследуемом районе (Керчь, Крым, Россия). При плотности материала среды 2,5 г/см³ и значениях упругих модулей Ламе $\lambda = \mu = 22,5$ ГПа, скорости продольной и поперечной сейсмических волн составляли V_P = 5196,15 м/с, V_S = 3000,00 м/с, соответственно. Фазовая скорость основной моды волны Рэлея при этих условиях, определенная с помощью аналитических функций Малишевско-


Рис. 2. Постановка численного эксперимента. Модельная среда с двумя неоднородностями, расположенными одна над другой, облучалась 128 гармоническими источниками основной моды волны Рэлея с левой границы расчетной области. Регистрация вертикальной компоненты синтетического поверхностно-волнового поля производилась на поверхности в некоторой области над неоднородностями. Длина модельного профиля составляла 60 км. Пояснения в тексте. /
Fig. 2. Formulation of the numerical experiment. The model medium with two inhomogeneities located one above the other was irradiated by 128 harmonic sources of the fundamental mode of the Rayleigh wave from the left boundary of the computational domain. Registration of the vertical component of the synthetic surface-wave field was carried out on the surface in a certain region over inhomogeneities. The length of the model profile was 60 km. Explanations are given in the text.

го [Malischewski, 2000], $V_R = 2758, 21 \text{ м/с}$. Коэффициент Пуассона и плотность материала среды во всем модельном полупространстве были зафиксированы. Значение коэффициента Пуассона составляло 0,25.

Неоднородности задавались в форме простого прямоугольника с идентичными размерами по горизонтали L = 10 км. Материал внутренней области прямоугольника имел отличные от вмещающей среды значения упругих модулей Ламэ. Вертикальный размер, положение и скоростной контраст верхней неоднородности были зафиксированы в течение всего цикла компьютерного моделирования и составлялиd₁ = 1,5 км, h₁ = 1 км, h₂ = 2,5 км, K₁ = 0,95, соответственно. Здесь и далее скоростной контраст К определяется как отношение между значениями скорости Р- или S- сейсмической волны в теле неоднородности, и скоростью соответствующей волны во вмещающей среде. Ввиду того, что значение коэффициента Пуассона и плотности всюду постоянны, для однозначной параметризации механических свойств материала неоднородности достаточно одного значения скоростного контраста.

Вертикальное положение и вертикальный размер нижней неоднородности варьировались. Рассматривались также варианты с различным скоростным контрастом нижней неоднородности $K_2 = 0.8$; 0.9; 0.95.

Была проведена серия из шести расчетов для 128 частот облучающей волны Рэлея f_i в полосе 0.043÷5.517 Гц, при этом частоты выбирались так, что длины волн основной моды рэлеевской волны равномерно заполняли диапазон значений λ_R (f_i) = 0,5, ..., 64 км с шагом 0,5 км. Облучение модельного полупространства производилось с левой границы расчетной области x = 0 гармоническим излучателем фундаментальной моды волны Рэлея (рис.

2). При этом на линии источников задавалось аналитическое решение для смещений в рэлеевской волне для однородного полупространства [Viktorov, 1967]. Результат в терминах интенсивности (квадратов амплитуд) усреднялся с симметричным *x* относительно вертикальной оси, проходящей через центр заданной неоднородности для того, чтобы промоделировать происходящее в природе облучение объекта со всех сторон.

Полный размер моделируемой области составлял 140×100 км. Расчетная сетка содержала 1,4 млн ячеек с шагом h = 100 м, одинаковым по обеим осям. Длина модельного профиля составляла 60 км с шагом 100 м. Продолжительность каждого расчета составляла 10550 временных шагов, что при шаге интегрирования по времени $\tau = 4,8$ мс, удовлетворяющем условиям сходимости явной схемы [Калиткин, 1978], соответствует продолжительности времени регистрации T = 50 с. Такая длина синтетических сейсмограмм обеспечивала запись двух периодов самой низкочастотной волны из рабочего диапазона и около 275 периодов высокочастотной. Ввиду регулярности источника (в отличие от естественного микросейсмического поля) полученные таким образом 50-секундные синтетические данные позволяли провести процедуру инверсии MM3 без значительного по времени накапливания сигнала.

Обсуждение и результаты

Результаты серии численных экспериментов представлены на рисунке 3. Видно, что, когда положение горизонтальных границ второй модельной неоднородности находится в пределах $h_3 = 6.9$ км, $h_4 = 9.12$ км (рис. 3a, б), в поле интенсивности наблюдаются две раздельные аномалии. При этом расстояние между центрами модельных неоднородностей составляет $\Delta = 5,75 \div 8,75$ км, а толщина зазора $\delta = 3,5 \div 6,5$ км. Это соответствует относительным значениям $\Delta/\lambda_{\rm R} = 0,44\div0,50, \delta/\lambda_{\rm R} = 0,27\div0,37$, где $\lambda_{\rm R} = 11,6\div17,5$ км – эффективная длина волны для глубины средней точки между центрами неоднородностей. В случае, когда $h_3 = 4$ км, $h_4 = 7 \,\mathrm{km}$ (рис. 3в) верхняя неоднородность оказывается в зоне влияния более контрастной нижней неоднородности. Это влияние связано с формированием второстепенной аномалии противоположного знака по отношению к основной аномалии, проявляющейся в области коротких длин волн (над неоднородностью), что обсуждалось ранее в [Горбатиков, Цуканов, 2011]. Изображения неоднородностей при этом разрешены, хотя изображение верхней неоднородности, имеет искаженную форму и пониженный контраст. Для тех же геометрических параметров $h_3 = 4 \text{ км}, h_4 = 7 \text{ км}$ (рис. 3в) дополнительно был выполнен расчет с одинаковыми скоростными свойствами обоих включений K₁ = K₂ = 0,95, в этом случае изображения также разрешены, наблюдается узкая перемычка пониженной интенсивности между амплитудными аномалиями. При таких условиях форма, размер и относительная интенсивность изображения верхней неоднородности близки к вариантам параметров, соответствующих рисунку 3 (а, б). Если параметры модельных неоднородностей задаются как $h_3 = 3,5$ км, $h_4 = 5,0.6,5$ км (рис. 3а, б), то их изображения не могут быть разрешены в поле волн Рэлея. Наблюдается единая амплитудная аномалия. При этом значения безразмерных параметров $\Delta/\lambda_{\rm R}=0.29\div0.39$ и $\delta/\lambda_R = 0,12$. Таким образом, на пределе разрешения, из рассмотренных случаев, находится конфигурация, представленная на рисунке 3 (в, г) с Δ =3,35 км между центрами неоднородностей и мощностью зазора $\delta = 1,5$ км, что при значениях коэффициента глубинной привязки $0,35\div0,40$ соответствует относительным значениям $\Delta/\lambda_{\rm R}=0,36\div0,41$ и $\delta/\lambda_{\rm R}=0,15\div0,17$, где эффективная длина волны для средней глубины $\lambda_R = 9,1 \div 10,4$ км.

В рассмотренных условиях оценка вертикальной разрешающей способности ММЗ на синтетических данных состоит в том, что, если расстояние между центрами двух малых по сравнению с глубиной залегания неоднородностей, расположенных друг над другом, составляет 36-41% (или более) от длины фундаментальной моды волны Рэлея, равной $\lambda_{\rm R}$ =H_{center}/ 0,4, где H_{center} глубина середины между центрами неоднородностей, то изображе-





Fig. 3. The result of applying the MMS to synthetic seismograms obtained for six variants of different depths h^3 , h4 and velocity contrast K2 of the lower heterogeneity. The color scale corresponds to the intensity of the vertical component in relative units. In the configurations of inhomogeneities (a), (b), two separated anomalies are observed. In case (b), the upper inhomogeneity turns out to be in the zone of the "inverse effect" more contrasting than the lower inhomogeneity, while the inhomogeneities are resolved; (c) – identical configuration, but the contrast of the lower heterogeneity is equal to the contrast of the upper K2 = K1, in this case also the heterogeneities are resolved, there is a narrow bridge of reduced intensity between the anomalies. The interposition of inhomogeneities (d), (e) does not allow them to be resolved in the field of Rayleigh waves, only one generalized anomaly can be observed.

ния этих неоднородностей будут разрешены в поле случайных волн Рэлея. Иными словами, расстояние по вертикали между центрами малых неоднородностей должно составлять H_{center} или более.

Аналогично, оценку можно сформулировать для случая крупных по сравнению с глубиной залегания неоднородностей, если известен зазор между ними. Чтобы изображения были разрешены зазор должен составлять более 15-17% от $\lambda_{\rm R} = {\rm H}_{\rm center}/0,4$. Здесь ${\rm H}_{\rm center}$ глубина средней точки между встречными гранями крупных неоднородностей.

Пользуясь полученной оценкой, становится возможным ответить на вопрос относительно интерпретации экспериментального разреза на рисунке 1. А именно, тела «А» и «Б», «В» и «Г», «Д» и «Е» являются разрешенными отдельными структурами, а не артефактами процедур измерений и обработки.

Действительно, например, на рис. 1глубина центра слоя «А» составляет примерно 0,5 км. Глубина центра слоя «Б» составляет 2 км. Глубина центра между ними, соответственно, равна 1,25 км. А расстояние между центрами равно 1,5 км. Значит, можно считать, что выделяемые в эксперименте по ММЗ слои «А» и «Б» являются различными структурами, что необходимо принимать во внимание при геологической интерпретации данного разреза.

Заключение

Получены оценки вертикальной разрешающей способности MM3 с использованием математической модели, построенной из первых принципов, в прямом моделировании двух залегающих друг под другом неоднородностей, что является новым практически важным результатом. Рассмотрены случаи конкретных геометрических размеров и упругих параметров, со значениями, близкими к встречающимся в природных условиях. Получены простые практические приемы, с помощью которых можно оценивать разрешенность объектов в разрезах по MM3. Представляется, что эти оценки и приемы применимы в подавляющем большинстве практических случаев применения MM3 в реальных полевых условиях. Однако, данные результаты не могут быть безусловно обобщены на любой произвольный случай. Необходимо дополнительное исследование для слоистой структуры среды. Также необходимо рассмотреть более широкий класс объектов с точки зрения скоростных свойств, размеров и формы. Особую актуальность имеет проверка разрешающей способности метода в физическом моделировании с двумя неоднородностями, хотя такой эксперимент характеризуется значительной сложностью технической реализации.

Литература

1. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм. // Физика Земли. – 2008. – № 7. – С. 66-84.

2. Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования. // Физика Земли. – 2011. – № 4. – С. 96-112.

3. Жостков Р. А., Преснов Д. А., Собисевич А. Л. Развитие метода микросейсмического зондирования. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 2. Вып. 26. – С. 11-19.

4. Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

5. Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С. Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли. // Физика Земли. – 2009. – № 5. – С. 3-14.

6. Монахов Ф.И. Низкочастотный сейсмический шум Земли. – М.: Наука. 1977. – 96 с.

7. Рогожин Е. А., Горбатиков А. В., Овсюченко А. Н. Активные разломы и глубинное строение Керченского пролива. // Геология и геофизика юга России. – 2015. – № 1. – С. 63-66.

8. Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. – Новосибирск: Наука, 1986. – 151 с. 9. Цуканов А.А., Горбатиков А.В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений. // Физика Земли. – 2015. – №4. – С. 94.

10. Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования. // Физика Земли. – 2017. – № 6. – С. 18-23.

11. Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. // Bull. Earthq. Res. Inst. - 1957. - V. 35. - Pp. 415-456.

12. Bard P. Microtremor measurements: A Tool for the Effect Estimation? / In: The Effects of Surface Geology on Seismic motion-recent progress and new horizon on ESG study, edited by: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., and Sasatani, T. – Balkema, Rotterdam. – 1999. – No. 3. – Pp. 1251-1279.

13. Bromirski P.D. Vibrations from the "Perfect Storm". // Geochem., Geophys., Geosyst. – 2001. – Vol. 2. Paper Number 2000GC000119.

14. Chavez-Garcia F. J., Rodriguez M., Stephenson W. R. An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2005. – V. 95. – Pp. 277-293.

15. Chouet B., De Luca G., Milina G., Dawson P., Martini M., Scarpa R. Shallow velocity structure of Stromboli Volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor. // Bull. Seism. Soc. Am. – 1998. – V. 88. – Pp. 653-666.

16. Gorbatikov A. V., Kalinina A. V., Volkov V. A., Arnoso J., Vieira R. and Velez E. Results of Analysis the Data of Microseismic Survey at Lanzarote Island, Canary, Spain. // Pure appl. geophys. – 2004. – Vol. 161. – Pp. 1561-1578.

17. Malagnini L., Rovelli A., Hough S.E., Seeber L. Site amplification estimates in the Garigliano Valley, Central Italy, based on dense array measurements of ambient noise. // Bull. Seism. Soc. Am. – 1993. – V. 83. – Pp. 1744-1755.

18. Malischewsky P.G. Comment to «A new formula for the velocity of Rayleigh waves» by D. Nkemzi [Wave Motion 26 (1997) 199-205]. // Wave Motion. – 2000. – № 31 (1). –Pp. 93-96.

19. Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – V. 30. No. 1. – Pp. 25-33.

20. Ohori M., Nobata A., Wakamatsu K. A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor analysis. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2002. – V. 92. – Pp. 2323-2332.

21. Okada H. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method. // Exploration Geophysics. – 2006. – V. 37. – Pp. 73-85.

22. Panou A.A., Theodulidis N., Hatzidimitriou P.M., Papazachos C.B., Stylianidis K. Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio for assessing site effects in urban environments: the case of Thessaloniki city (Northern Greece). // Bull. Geol. Soc. of Greece. 2004. Vol. XXXVI. Proc. 10th International Congress. – Thessaloniki. – April 2004. – Pp. 1467-1476.

23. Sabra K. G., Gerstoft P., Roux P., Kuperman W.A., Fehler M. C. Extracting time-domain Greens function estimates from ambient seismic noise // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L03310.

24. Sadovnichy V., Tikhonravov A., VoevodinVl., Opanasenko V. «Lomonosov»: Supercomputing at Moscow State University // In Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale (Chapman & Hall/CRC Computational Science). – Boca Raton: USA, CRC Press, 2013. – Pp. 283-307.

25. Shapiro N.M., Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L07614.

26. Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H. Highresolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science. 2005. Vol. 307. pp. 1615–1618.

27. Snieder R. Extracting the Green's Function from Correlation of Coda Waves: A Derivation Based on Stationary Phase. Phys. Rev. 2004. Vol. 69. pp. 046610-1-046610-8.

28. Tanimoto T., Alvizuri C. Inversion of the HZ ratio of microseisms for S-wave velocity in the crust. Geophys. J. Int. – 2006. Vol. 165. pp. 323–335.

29. Viktorov I.A. Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications. New York: Plenum Press, 1967. 154 p.

30. Zhang S.H., Chan L.S., Xia J. The selection of field acquisition parameters for dispersion images from multichannel surface wave data. Pure. Appl. Geophys. 2004. Vol. 161. pp. 185–201.

References

1. Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E. Patterns of microseismic field formation under the influence of local geological heterogeneities and sounding of the medium using microseisms. Physics of the Earth. 2008. No. 7. pp. 66–84. (In Russ.)

2. Gorbatikov A. V., Tsukanov A. A. Modeling of Rayleigh waves near scattering velocity inhomogeneities. Investigation of the possibilities of microseismic sounding. Physics of the Earth. 2011. No. 4. pp. 96–112. (In Russ.)

3. Zhostkov R.A., Presnov D.A., Sobisevich A.L. Development of microseismic sounding method. Bulletin of KRAUNZ. Earth sciences. 2015. No. 2. Vol. 26. pp. 11–19. (In Russ.)

4. Kalitkin N.N. Numerical methods. M. Nauka, 1978. 512 p. (In Russ.)

5. Koroleva T.Yu., Yanovskaya T.B., Patrusheva S.S. Using seismic noise to determine the structure of the Earth's upper stratum. Physics of the Earth. 2009. No. 5. pp. 3-14. (In Russ.)

6. Monakhov F.I. Earth's low frequency seismic noise. M. Nauka. 1977. 96 p. (In Russ.)

7. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Ovsyuchenko A.N. Active faults and the deep structure of the Kerch Strait. Geology and geophysics of the south of Russia. 2015. No. 1. pp. 63–66. (In Russ.)

8. Tabulevich V.N. Multi-method research of microseismic vibrations. Novosibirsk. Nauka, 1986. 151 p. (In Russ.)

9. Tsukanov A.A., Gorbatikov A.V. Microseismic sounding method: the influence of anomalous Poisson's ratio and estimation of the magnitude of non-linear distortions. Physics of the Earth. 2015. No. 4. 94 p. (In Russ.)

10. Yanovskaya T.B. To the theory of microseismic sounding. Physics of the Earth. 2017. No. 6. pp. 18–23. (In Russ.)

11. Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bull. Earthq. Res. Inst. 1957. Vol. 35. pp. 415–456.

12. Bard P. Microtremor measurements: A Tool for the Effect Estimation? In: The Effects of Surface Geology on Seismic motion-recent progress and new horizon on ESG study. 1999. No. 3. pp. 1251–1279.

13. Bromirski P.D. Vibrations from the "Perfect Storm". Geochem., Geophys., Geosyst. 2001. Vol. 2. Paper Number 2000GC000119.

14. Chavez-Garcia F.J., Rodriguez M., Stephenson W.R. An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise. Bull. Seism. Soc. Am. 2005. Vol. 95. pp. 277–293.

15. Chouet B., De Luca G., Milina G., Dawson P., Martini M., Scarpa R. Shallow velocity structure of Stromboli Volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor. Bull. Seism. Soc. Am. 1998. Vol. 88. pp. 653–666.

16. Gorbatikov A.V., Kalinina A.V., Volkov V.A., Arnoso J., Vieira R. and Velez E. Results of Analysis the Data of Microseismic Survey at Lanzarote Island, Canary, Spain. Pure appl. geophys. 2004. Vol. 161. pp. 1561–1578.

17. Malagnini L., Rovelli A., Hough S.E., Seeber L. Site amplification estimates in the Garigliano Valley, Central Italy, based on dense array measurements of ambient noise. Bull. Seism. Soc. Am. 1993. Vol. 83. pp. 1744–1755.

18. Malischewsky P.G. Comment to «A new formula for the velocity of Rayleigh waves» by D. Nkemzi [Wave Motion 26 (1997) 199–205]. Wave Motion. 2000. No. 31(1). pp. 93–96.

19. Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. Vol. 30. No.1. pp. 25–33.

20. Ohori M., Nobata A., Wakamatsu K. A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor analysis. Bull. Seism. Soc. Am. 2002. Vol. 92. pp. 2323–2332.

21. Okada H. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method. Exploration Geophysics. 2006. Vol. 37. pp. 73–85.

22. Panou A.A., Theodulidis N., Hatzidimitriou P.M., Papazachos C.B., Stylianidis K. Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio for assessing site effects in urban environments: the case of Thessaloniki city (Northern Greece). Bull. Geol. Soc. of Greece. 2004. Vol. XXXVI. Proc. 10th International Congress. Thessaloniki. April 2004. pp. 1467–1476.

23. Sabra K.G., Gerstoft P., Roux P., Kuperman W.A., Fehler M.C. Extracting time-domain Greens

9 (3) 2019

function estimates from ambient seismic noise. Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32. L03310.

24. Sadovnichy V., Tikhonravov A., VoevodinVl., Opanasenko V. "Lomonosov": Supercomputing at Moscow State University. In Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale (Chapman & Hall/CRC Computational Science). Boca Raton: USA, CRC Press, 2013. pp. 283–307.

25. Shapiro N.M., Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L07614.

26. Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H. Highresolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science. 2005. Vol. 307. pp. 1615–1618.

27. Snieder R. Extracting the Green's Function from Correlation of Coda Waves: A Derivation Based on Stationary Phase. Phys. Rev. 2004. Vol. 69. pp. 046610-1-046610-8.

28. Tanimoto T., Alvizuri C. Inversion of the HZ ratio of microseisms for S-wave velocity in the crust. Geophys. J. Int. 2006. Vol. 165. pp. 323–335.

29. Viktorov I.A. Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications. New York: Plenum Press, 1967. 154 p.

30. Zhang S.H., Chan L.S., Xia J. The selection of field acquisition parameters for dispersion images from multichannel surface wave data. Pure. Appl. Geophys. 2004. Vol. 161. pp. 185–201.

ГЕОФИЗИКА =

VДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36483

Оригинальная статья

О макросейсмических проявлениях Яндарского землетрясения 17 октября 2018 года

И.Ю. Дмитриева^(D), А.А. Саяпина^(D), С.В. Горожанцев^(D), к.г.-м.н., С.С. Багаева^(D)

Северо-Осетинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, д. 93а, e-mail: sofgsras@gmail.com

Статья поступила: 11 июля 2019, доработана: 17 сентября 2019, одобрена в печать: 18 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность. Кавказский регион характеризуется высокой сейсмичностью. При возникновении ощутимых землетрясений проводятся макросейсмические исследования, представляющие собой изучение последствий сейсмических воздействий. К числу таких землетрясений можно отнести землетрясение, произошедшее на окраине села Яндаре Республики Ингушетия 17 октября 2018 г.с максимальной интенсивностью сотрясений в эпицентре 5 баллов, являющееся объектом данного исследования. Цель работы установление особенностей макросейсмического проявления землетрясения. Методы исследования. Макросейсмическое обследование территории, ретроспективный анализ, параметры землетрясения определялись в программно-вычислительных комплексах WSG и HYP071. Результаты работы. По инструментальным данным сетей сейсмических станций NOGSR, OBGSR, DAGSR получено следующее решение параметров землетрясения: φ=43,27°N, λ=44,92°E, h=12 км, КР=11,5. Приведены сведения по истории сейсмичности очаговой зоны исследуемого землетрясения за последние 150 лет. Очаг землетрясения приурочен к активному Сунженскому разлому. Рассмотрены форшоковая активность и немногочисленная серия афтершоков. Для землетрясения был рассчитан механизм очага по знакам первых вступлений продольных Р-волн на 48 станциях, хорошо окружавших эпицентр и расположенных на расстояниях Δ = 0,3-50,5°. Согласно полученному решению землетрясение возникло под действием преобладающих сжимающих напряжений. Тип подвижки в очаге соответствовал взбросу с правосторонним сдвигом по плоскости NP2 с юго-восточным простиранием и левостороннему сдвигу с компонентами взброса по плоскости NP1 с субширотным простиранием. Для сбора макросейсмических данных сотрудниками Северо-Осетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН был осуществлен выезд в эпицентральную зону и близлежащие районы. Оценка интенсивности проводилась на основе шкалы ШСИ – 17. Землетрясение с интенсивностью 5 баллов проявилось в населенных пунктах Яндаре, Троицкое, Карабулак. Колебания ощущались в Сунже, Барсуках и Плиево силой 4 балла, Назрани – 3-4 балла. В населенных пунктах Магас, Али-Юрт, Средние Ачалуки ощутимость землетрясения составила 3 балла. В семи населенных пунктах колебания проявились интенсивностью в 2 балла. Во Владикавказе землетрясение ощущалось на верхних этажах многоэтажных зданий. Данные о проявлениях Яндарского землетрясения интересны с точки зрения анализа распределения интенсивности сотрясений, изучения сейсмичности региона в целом, а также связи с геологическим строением территории.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, эпицентр, форшоки, механизм очага, макросейсмическое исследование.

Для цитирования: Дмитриева И. Ю., Саяпина А. А., Горожанцев С. В., Багаева С. С. О макросейсмических проявлениях Яндарского землетрясения 17 октября 2018 года. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 151-160. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36483. GEOPHYSICS =

DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36483</u>

Original paper

About Macroseismic Displays of Yandary Earthquake, October 17, 2018

I. Yu. Dmitrieva (D), A. A. Sayapina (D), S. V. Gorozhantsev (D), S. S. Bagaeva (D)

North Ossetian Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: sofgsras@gmail.com

Received 11 July 2019; revised 17 September 2019; accepted 18 September 2019.

Abstract: Relevance. The Caucasus region is characterized by a high seismicity. In case of sensible earthquake occurence, macroseismic studies are carried out, which consist in a study of the effects of seismic impacts. One of such earthquakes occurred on the outskirts of the village of Yandare, Republic of Ingushetia, October 17, 2018 with a maximum intensity in the epicenter of 5 points, which is the subject of the present study. Aim. To establish the features of the macroseismic manifestation of an earthquake. Methods. Macroseismic survey of the territory, retrospective analysis, earthquake parameters were determined in the WSG and HYPO71 software. Results. Using the instrumental data of the networks of seismic stations NOGSR, OBGSR, DAGSR, the earthquake parameters were obtained: $\varphi = 43.27^{\circ}$ N, $\lambda = 44.92^{\circ}$ E, h = 12 km, energy class KP = 11.5. The article provides the information on the history of seismicity of the focal zone of the investigated earthquake over the past 150 years. The earthquake focus is confined to the active Sunzhensky fault. Foreshock activity and a small series of aftershocks are considered. The source mechanism for the earthquake was calculated from the signs of the first arrivals of longitudinal P-waves at 48 stations, surrounding the epicenter and located at the distances Δ = 0.3-50.5°. According to the obtained solution, an earthquake arose under the influence of prevailing compressive stresses. The type of movement in the source corresponded to a reverse fault with a right-side shift along the NP2 plane with southeastern strike and a left-side shift with components of a reverse fault along the NP1 plane with sub-latitudinal strike. In order to collect macroseismic data, employees of the North Ossetian branch of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences made a trip to the epicenter zone and the surrounding areas. The intensity assessment was carried out on the basis of the seismic intensity scale SIS-17 ("ShSI-17"). An earthquake with an intensity of 5 points appeared in the settlements of Yandare, Troitskoye and Karabulak. Fluctuations were felt in Sunzha, Badgers and Plievo with the intensity of 4 points, in Nazran – 3-4 points. In the settlements of Magas, Ali-Yurt, Middle Achaluki, the perceptibility of an earthquake was 3 points. In seven settlements, fluctuations showed an intensity of 2 points. In Vladikavkaz, an earthquake was felt on the upper floors of multi-storey buildings. The data on the Yandare earthquake manifestations is interesting from the point of view of analyzing the distribution of the intensity of tremors, studying the seismicity of the region as a whole, and also the connection with the geological structure of the territory.

Keywords: seismicity, earthquake, epicenter, foreshock, focal mechanism, macroseismic research.

For citation: Dmitrieva I.Yu., Sayapina A.A., Gorozhantsev S.V., Bagaeva S.S. About Macroseismic Displays of Yandary Earthquake, October 17, 2018. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. 9(3): 151-160. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36483.

Сейсмичность Кавказского региона имеет высокие показатели [Рогожин, 2002; Уломов и др., 2007; Погода и др., 2015; Багаева и др., 2018].При возникновении ощутимых землетрясений проводятся макросейсмические исследования, представляющие собой изучение последствий сейсмических воздействий с последующей привязкой результатов к различным оценочным шкалам [Медведев и др., 1965; European Macroseismic Scale 1992, 1993, 1998a, b; Vogt et al., 1994; Michetti et al., 2004, 2007]. К числу таких землетрясений можно отнести и землетрясение, произошедшее на окраине села Яндаре Республики Ингушетия 17 октября в 15^h55^mпо Гринвичу с максимальной интенсивностью сотрясений в эпицентре 5 баллов. Землетрясение было названо Яндарским по названию населенного пункта.

В соответствии с [Рогожин, 2009] эпицентр землетрясения находился в зоне, для которой максимально возможная магнитуда равна $M_{\rm max}$ =6,1. В действительности такие магнитуды здесь пока не зафиксированы. По данным [Бабаян и др., 1977] была рассмотрена история сейсмичности очаговой зоны исследуемого землетрясения за последние 150 лет. Параметры сильнейших и ощутимых землетрясений в рассматриваемой зоне приведены в таблице 1. Исходя из исторических и инструментальных данных, следует, что землетрясения, сопоставимые или превосходящие по энергетическому классу Яндарское землетрясение, происходили и происходят здесь довольно редко.

Таблица 1. / Table 1.

Основные параметры сильнейших исторических землетрясений в районе Яндарскогоземлетрясения. /

N⁰	Ilama / Data	Drova / Timo	Эпицен	тр / Epicenter	h m / hm	М	<i>I</i> ₀ , баллы /
	Jara / Dale	время / типе	φ°, N	λ°, Ε	п, км / кт	IVI	I_0 , Points
1	01.03.1872	22:00	43,20	45,00	7	4,0	6
1	±1 сутки	22.00	±0,2	±0,2	3-14	±0,7	±1
C	23.08.1874	22.50	43,20	44,80	6	4,5	7
2	±10 минут	22:30	±0,2	±0,2	3-12	±0,7	±0,5
2	26.06.1020	20:06	43,3	44,9	12	4,4	5-6
3	20.00.1939	20:00	±0,2	±0,2	8-18	±0,5	±0,5
4	12.06.1046	04:35:43	43,2	44.9	(15)	4,4	
	12.06.1946	±5c	±0,5	±0,5	5-50	0,5	

The main parameters of the strongest historical earthquakes in the area of the Yandary Earthquake

Очаг рассматриваемого землетрясения приурочен к активному Сунженскому разлому (рис. 1). В этом месте Терско-Каспийский передовой прогиб встречается с молодой платформой Предкавказья. В целом, весь район составляет Сунженскую антиклинальную зону. Описываемая территория представляет собой слаборасчленённую долину реки Сунжа. Коренных обнажений практически нет, редкие обнажения встречаются только по руслу реки.



Рис. 1. Фрагмент тектонической карты-схемы региона 1 – эпицентр землетрясения 17.10.2018 г.; 2 – тектонические нарушения, трассирующиеся на поверхности земли. /

Fig. 1. A fragment of a tectonic map of the region

1 - the epicenter of the earthquake on October 17, 2018; 2 - tectonic faults, traceroute on the surface of the earth

9 (3) 2019

Геология и геофизика Юга России

Инструментальные параметры

Параметры землетрясения, рассчитанные в программно-вычислительных комплексах WSG [Красилов и др., 2006] и HYPO71 [Lee et al., 1985], были определены по инструментальным данным сетей сейсмических станций NOGSR, OBGSR, DAGSR [Габсатарова и др., 2017]. Гипоцентр землетрясения имеет координаты φ = 43,27°N, λ = 44,92°E, глубину залегания *h*=12 км, энергетический класс *K*_P=11,5. Станции [Погода и др., 2013, 2016; Саяпина и др., 2018, 2019], участвующие в определении параметров гипоцентра, окружали эпицентр с азимутальной брешью GAP=117° (рис. 2). Ближайшая станция «Комгарон» находилась на расстоянии 25 км. Общее число станций, участвующих в локации, равно *N*=21. Записи ближайших к эпицентру станций представлены на рисунке 2.





Fig. 2. Fragments of records of the vertical components of the network stations GS RAS. The inset shows the position of seismic stations involved in determining the coordinates of the hypocenter of the Yandary earthquake

Форшоки и афтершоки

Анализ предваряющей сейсмичности выявил за месяц до Яндарского землетрясения в его очаговой зоне сейсмическую активность, по-видимому, являющуюся форшоковой. Общее число зарегистрированных событий составило N = 13 в диапазоне $K_{\rm p} = 5,7-10,6$, параметры которых приведены в таблице 2. Об ощутимости самого сильного форшока в этой серии стало известно позднее от жителей г. Карабулак и с. Яндаре в процессе сбора макросейсмических данных исследуемого землетрясения.

Афтершоковая последовательность была немногочисленна: всего 5 зарегистрированных событий. Максимальный афтершок с $K_P = 9$ произошел в этот же день в 22^h26^m по Гринвичу, ощущавшийся некоторыми жителями с. Яндаре и г. Карабулак.

Таблица 2. / Table 2.

Nº	Дата,	t ₀ , чмин.	Эпип Еріс	tентр/ enter	h,			Дата,	t ₀ , чмин /	Эпиц Еріс	ентр / enter	h,	К _Р 10.6 6.2 7.6 11.5 9.0 6.0 8.9
	Date, DM	/Hour Min- utes	φ°, N	λ°, Ε	км / km	K _P	N⁰	Date, DM	Hour Min- utes	φ°, N	λ°, Ε	км / km	K _P
Форшоки / Forshoks						11	05.09	0259	43.34	44.99	9	10.6	
1	04.09	0129	43.31	44.99	6	7.9	12	05.09	0404	43.33	44.99	7	6.2
2	04.09	0134	43.33	44.96	18	5.9	13	08.09	0526	43.33	45.0	9	7.6
3	04.09	0138	43.31	44.95	7	6.8	Основной толчок / Mainpush						
4	04.09	0140	43.32	44.96	7	5.7		17.10	1555	43.27	44.92	12	11.5
5	04.09	0142	43.29	44.97	7	6.2	Афтершоки / Aftershocks						
6	04.09	0202	43.01	45.01	9	7.8	1	17.10	2226	43.3	44.92	11	9.0
7	04.09	0257	43.34	45.03	7	7.1	2	18.10	2320	43.27	44.96	3	6.0
8	04.09	1207	43.33	45.0	11	7.9	3	19.11	1957	43.29	44.94	17	8.9
9	04.09	1902	43.34	45.0	9	10.1	4	29.11	0151	43.29	44.9	12	6.4
10	04.09	2047	43.32	44.98	10	7.4	5	05.12	1431	43.34	44.94	11	7.5

Основные параметры форшокови афтершоков Яндарского землетрясения. / The main parameters of foreshocks and aftershocks of the Yandary earthquake





Fig. 3. Map of the epicenters of the foreshocks and aftershocks of the earthquake of October 17, 2018

Карта эпицентров форшоков и афтершоков для исследуемого землетрясения изображена на рисунке 3, из которой видно, что их области распределения ориентированы различно.

Облако форшоков имеет северо-восточное простирание, а область афтершоков вытянута вдоль простирания Сунженского разлома и достаточно близка к основному толчку.

Механизм очага

Механизм очага Яндарского землетрясения был рассчитан [Габсатарова и др., 2019] для модели источника в виде двойного диполя на основе знаков первых вступлений продольных *P*-волн [Ландер, 2006] на 48 станциях, хорошо окружавших эпицентр и расположенных на расстояниях $\Delta = 0,3-50,5^{\circ}$. Диаграмма механизма очага в стереографической проекции в нижней полусфере показана на рисунке 4, параметры – приведены в таблице 3.

Такое решение механизма очага согласуется с кинематической характеристикой Сунженской разломной зоны.



Рис. 4. Стереограмма механизма очага землетрясения 17 октября 2018 г. / Fig. 4. Stereogram of the focal mechanism of the earthquake on October 17, 2018

Согласно полученному решению землетрясение возникло под действием преобладающих сжимающих напряжений, ориентированных в юго-западном направлении. Тип подвижки в очаге соответствовал взбросу с правосторонним сдвигом по плоскости NP2 с юго-восточным простиранием и левостороннему сдвигу с компонентами взброса по плоскости NP1 с субширотным простиранием. Обе нодальные плоскости имеют достаточно крутое падение.

Таблица 3. / Table 3.

Параметры механизма очага землетрясения 17 октября 2018 г. /

Оси главных напряжений / Principalaxes						Нодальные плоскости / Nodal planes					
-	Т	İ	Р	N NP1			NP2				
PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
58	102	11	210	29	307	269	42	43	144	62	124

The parameters of the focal mechanism of the earthquake of October 17, 2018

Макросейсмические проявления Яндарского землетрясения

Для сбора макросейсмических данных сотрудниками Северо-Осетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН был осуществлен выезд в эпицентральную зону и близлежащие районы. Оценка интенсивности проводилась по реакции людей и предметов быта на основе шкалы ШСИ-17 [ГОСТ Р 57546-2017]. Обследованию были подвергнуты в основном одно- и двухэтажные жилые дома (за исключением г. Магаса) и некоторые здания административного значения.

С интенсивностью 5 баллов землетрясение проявилось в населенных пунктах Яндаре, Троицкое и Карабулак. Оно было замечено практически всеми жителями этих сел. Многие люди испытывали сильный испуг, некоторые покидали помещения. В домах сильно раскачивались висячие предметы, дребезжала посуда, вибрировали мебель и предметы домашнего обихода. В магазине с полок падали легкие предметы. В отдельных кирпичных домах наблюдались трещины в стенах. При землетрясении был слышен подземный гул, схожий со звуковым эффектом, издаваемым взрывом.

Интенсивность колебаний 4 балла была зафиксирована в населенных пунктах Плиево, Барсуки, Сунжа. Здесь землетрясение ощутили многие люди, находящиеся в покое. В помещениях дрожала мебель, колебались висячие предметы. Паники у людей не было, просто замерли в ожидании.

В Магасе, Али-Юрте, Средних Ачалуках ощутимость землетрясения составила 3 балла. Люди, находившиеся в покое, чувствовали плавное покачивание. В домах были заметны колебания висячих предметов, дребезжание посуды.

Интенсивность сотрясений в 2 балла зафиксирована в населенных пунктах Берд-Юрт, Майское, Галашки, Чермен, Зязиков-Юрт, Гайрбек-Юрт и Батако по вибрации легких предметов.

Во Владикавказе землетрясение ощущалось на верхних этажах многоэтажных зданий. Обобщенные результаты оценки интенсивности землетрясения приведены в таблице 4, а соответствующая карта пунктов-баллов представлена на рисунке 5.

Таблица 4. / Table 4.

N⁰	Пункт /	Δ, км	Коорд Coord	инаты / linates		No	Пункт /	Δ, км	Координаты / Coordinates	
	Settlement	/ km	φ°,N	λ°,E			Settlement	/ km	φ°,N	λ°,E
	5 баллов /						2 балла /			
	5 points						2points			
1	Яндаре	0.9	43.27	44.91		11	Берд-Юрт	16.8	43.22	45.11
2	Карабулак	4.26	43.31	44.91		12	Майское	18.5	43.19	44.72
3	Троицкая	6.97	43.31	44.99		13	Галашки	21.6	43.08	44.98
	4 балла /					14	Чермен	21.5	43.15	44.71
	4points				15	Зязиков-Юрт	26.8	43.48	44.77	
4	Плиево	7.12	43.29	44.84		16	Гайрбек-Юрт	30	43.40	44.60
5	Барсуки	9.1	43.26	44.81		17	Батако	33.4	43.38	44.54
6	Сунжа	11.8	43.32	45.05			1 балл /			
	3-4 балла /						1 point			
	3-4points					18	Владикавказ	34.2	43.02	44.68
7	Назрань	13.8	43.21	44.76			не ощущалось			
	3 балла /						/ notfeel			
	3 points					19	Михайловское	30.4	43.10	44.63
8	Магас	14.6	43.17	44.80		20	Беслан	32.4	43.19	44.53
9	Али-Юрт	15.1	43.14	44.85		21	Пседах	36	43.47	44.57
10	Ср Аналуки	18.9	43 37	44 73		22	Сагонния	363	43 49	44 59

Макросейсмические данные о землетрясении 17 октября 2018 г. / Macroseismic data on the earthquake on October 17, 2018





1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале СШИ-17; 2 – инструментальный эпицентр; 3 – предполагаемые изосейсты. /

Fig. 5. Map locality-points and fragments of the expected isoseist earthquake October 17, 2018 with K_P =11.5

l – macroseismic intensity; 2 – instrumental epicenter; 3 – eists

В заключение стоит сказать, что землетрясение 17 октября 2018 г. стало первым ощутимым землетрясением в Республике Ингушетия, для которого удалось собрать макросейсмические данные сотрудниками СОФ ФИЦ ЕГС РАН. Так как объем имеющейся макросейсмической информации для рассматриваемой территории относительно невелик, данные о проявлениях Яндарского землетрясения интересны с точки зрения анализа распределения интенсивности сотрясений и изучения сейсмичности региона в целом.

Литература

1. Бабаян Т.О., Кулиев Ф.Т., Папалашвили В.Г., Шебалин Н.В., Вандышева Н.В. (отв. сост.). II б. Кавказ [50-1974 гг., *M*≥4.0, *I*₀≥5] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 69-170.

2. Багаева С.С., Саяпина А.А., Горожанцев С.В., Погода Э.В. Макросейсмические проявления Заманкульского землетрясения 12 апреля 2018 г. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 39-42.

3. Габсатарова И.П., Даниялов М.Г., Мехрюшев Д.Ю., Погода Э.В., Янков А.Ю. Северный Кавказ //Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 17-27.

4. Габсатарова И.П., Гилёва Н.А., Богинская Н.В., Иванова Е.И., Малянова Л.С., Сафонов Д.А., Середкина А.И. Механизмы очагов отдельных землетрясений России // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – (в печати).

5. ГОСТ Р 57546-2017 Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. Москва. Стандартинформ, 2017. 27 с.

6. Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Петергоф, 2-6 октября 2006 г. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77-83.

7. Ландер А. В. Описание и инструкция для пользователя комплекса программ FA (расчет и графическое представление механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений *P*-волн). – М: Фонды автора, 2006. –27с.

8. Медведев С. В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64 // М.: Межведомственный геофизический институт при Президиуме АН СССР, 1965. 11с.

9. Погода Э.В., Багаева С.С., Саяпина А.А. Регистрационные возможности сети сейсмологических наблюдений Северо-Осетинского филиала ГС РАН // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы VIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 266-269.

10. Погода Э.В., Гричуха К.В., Кабирова О.Г. Очаговые зоны землетрясений Центральной части Северного Кавказа. // Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. Геофизическая служба РАН, Республиканский центр сейсмологической службы при Национальной академии наук Азербайджана. 2015. – С. 265-268.

11. Погода Э.В., Дмитриева И.Ю., Пятунин М.С.. Исследование спектральных характеристик сейсмических шумов на сейсмостанциях Республики Северная Осетия – Алания. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы/ Отв. ред. А. А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – С. 263-267.

 Рогожин Е. А. Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона. // Современные математические и геологические модели природной среды: Сб. науч. тр. – М. ОИФЗ РАН, 2002. – С. 244-254.

13. Рогожин Е.А. Сейсмотектоника центрального сектора Большого Кавказа как основа для сейсмического мониторинга и оценки опасности // Вестник Владикавказского Научного Центра. – 2009. – №9 (4). – С. 16-22.

14. Саяпина А.А., Багаева С.С., Горожанцев С.В. О методико-технологических особенностях выполнения сейсмологических наблюдений в Северной Осетии. Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: сборник научных трудов / гл. ред. В.И. Костицын; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2018. – С. 252-258.

15. Саяпина А.А., Багаева С.С., Горожанцев С.В. Краткая история создания и этапы развития сейсмологической службы в Республике Северная Осетия-Алания (к 80-летию Э.В. Погоды и 20-летию образования СОФ ФИЦ ЕГС РАН) // Вестник Владикавказского научного центра Т. 19, №2. – Владикавказ: ВНЦ РАН, 2019. – С. 56-64.

16. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе // Физика Земли. 2007. № 7. С. 31-45.

17. European Macroseismic Scale 1992. Conseil De L'Europe Cahiers Europeen de Geodynamique et de Seismologie Vol. 7. Luxemburg, 1993, 79 p.

18. European Macroseismic Scale EMS-98 / Ed. by G. Grunthal. Luxembourg: Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, 1998. Vol. 15. 99 p.

19. Lee W. H. K. and Valdes C. M. HYP071PC: A personal computer version of the HYPO71 earthquake location program // U. S. Geological Survey Open File Report 85-749. – 1985. – 43 p.

20. Michetti A. M., Esposito E., Gürpinar A., Mohammadioun B., Porfeido S., Rogozhin E., Serva L., Tatevossian R., Vittory E., Audemard F., Comerci V., Marco S., McCalpin J., Mörner N.A. The INQUA scale. An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. Roma: SystemCart, 2004. 118 p. (Memoriedescritivedella carta geologicad'Italia; Vol. 67).

21. Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audermard F., Azuma T., Clague J., Commerci V., Gurpinar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Morner N.A., Ota Y., Rogozhin E. Intensity scale ESI 2007 // Memorie descriptive della carta geologicad'Italia. 2007. V. LXXIV, 50 p.

22. Vogt J., Musson R.M. W., Stucchi M. Seismogeological and hydrological criteria for the New European Macroseismic Scale (MSK-92) // Natural Hazards, 1994. Vol. 10, N 1/2. P. 1-6.

References

1. Babayan T.O., Kuliev F.T., Papalashvili V.G., Shebalin N.V., Vandysheva N.V. (rev. comp.). II b. Caucasus [50–1974, M≥4.0, I0≥5]. New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times to 1975. M. Nauka, 1977. pp. 69–170. (In Russ.)

2. Bagaeva S.S., Sayapina A.A., Gorozhantsev S.V., Pogoda E.V. Macroseismic effect of the Zamankul earthquake on April 12, 2018. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the XIII International Seismological School. Publishing editor A.A. Malovichko. Obninsk: FRC GS RAS, 2018. pp. 39–42. (In Russ.)

3. Gabsatarova I.P., Daniyalov M.G., Mekhryushev D.Yu., Pogoda E.V., Yankov A.Yu. North Caucasus. Earthquakes of Russia in 2015. Obninsk. FRC GS RAS, 2017. pp. 17–27. (In Russ.)

4. Gabsatarova I.P., Gileva N.A., Boginskaya N.V., Ivanova E.I., Malyanova L.S., Safonov D.A., Seredkina A.I. Focal mechanisms of some earthquakes in Russia. Earthquakes of Russia in 2018. Obninsk. FRC GS RAS, 2019. (in press). (In Russ.)

5. GOST R 57546-2017 Earthquakes. Seismic intensity scale. Moscow. Standardinform, 2017. 27 p. (In Russ.)

6. Krasilov S.A., Kolomiets M.V., Akimov A.P. Organization of the digital seismic data processing using the WSG software package. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the International Seismological School dedicated to the 100th anniversary of the opening of the Pulkovo and Yekaterinburg seismic stations. Peterhof, October 2–6, 2006, Obninsk. GS RAS, 2006. pp. 77–83. (In Russ.)

7. Lander A.V. Description and instructions for the user of the FA program complex (calculation and graphical representation of the mechanisms of earthquake sources according to the signs of the first P-wave arrivals). M. Author's funds, 2006. 27p. (In Russ.)

8. Medvedev S.B., Shponkhoier V., Karnik V. Seismic intensity scale MSK-64. Moscow. Interdepartmental Geophysical Institute under the Presidium of the USSR Academy of Sciences, 1965. 11p. (In Russ.)

9. Pogoda E.V., Bagaeva S.S., Sayapina A.A. Registration capabilities of the network of seismological observations of the North Ossetian branch of the GS RAS. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the VIII International Seismological School. Obninsk. GS RAS, 2013.

9 (3) 2019

Геология и геофизика Юга России

pp. 266–269. (In Russ.)

10. Pogoda E.V., Grichukha K.V., Kabirova O.G. Focal zones of earthquakes in the central part of the North Caucasus. Materials of the Tenth International Seismological School. Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Republican Center of Seismological Service under the National Academy of Sciences of Azerbaijan. 2015. pp. 265-268. (In Russ.)

11. Pogoda E.V., Dmitrieva I.Yu., Pyatunin M.S. Research of spectral characteristics of seismic noise at seismic stations of the Republic of North Ossetia - Alania. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the XI International Seismological School. Publishing editor A.A. Malovichko. Obninsk: FRC GS RAS, 2016. pp. 263–267. (In Russ.)

12. Rogozhin E.A. Modern geodynamics and potential sources of earthquakes in the Caucasus region. Modern mathematical and geological models of the natural environment: Proceedings M. JIPE RAS, 2002. pp. 244–254. (In Russ.)

13. Rogozhin E.A. Seismotectonics of the central sector of the Greater Caucasus as a basis for seismic monitoring and hazard assessment. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2009. No. 9 (4). pp. 16–22. (In Russ.)

14. Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Gorozhantsev S.V. About the methodological and technological features of seismological observations in North Ossetia. Theory and practice of exploration and production geophysics: Proceedings of scientific papers. Editor-in-charge. V.I. Kostitsyn; Perm State National Research University. Perm, 2018. pp. 252–258. (In Russ.)

15. Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Gorozhantsev S.V. A brief history of the creation and stages of the development of the seismological service in the Republic of North Ossetia-Alania (devoted to the 80th anniversary of E.V. Pogoda and the 20th anniversary of the NOB FRC GS RAS). Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center Vol. 19, No. 2. Vladikavkaz: VSC RAS, 2019. pp. 56–64. (In Russ.)

16. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. To the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. Physics of the Earth. 2007. No. 7. pp. 31–45. (In Russ.)

17. European Macroseismic Scale 1992. Conseil De L'Europe Cahiers Europeen de Geodynamique et de Seismologie Vol. 7. Luxemburg, 1993, 79 p.

18. European Macroseismic Scale EMS-98. Luxembourg: Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, 1998. Vol. 15. 99 p.

19. Lee W.H.K. and Valdes C.M. HYP071PC: A personal computer version of the HYPO71 earthquake location program. U.S. Geological Survey Open File Report 85–749. 1985. 43 p.

20. Michetti A.M., Esposito E., Gürpinar A., Mohammadioun B., Porfeido S., Rogozhin E., Serva L., Tatevossian R., Vittory E., Audemard F., Comerci V., Marco S., McCalpin J., Mörner N.A. The INQUA scale. An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. Roma: SystemCart, 2004. 118 p. (Memoriedescritivedella carta geologicad'Italia; Vol. 67).

21. Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audermard F., Azuma T., Clague J., Commerci V., Gurpinar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Morner N.A., Ota Y., Rogozhin E. Intensity scale ESI 2007. Memorie descriptive della carta geologicad'Italia. 2007. Vol. LXXIV, 50 p.

22. Vogt J., Musson R.M.W., Stucchi M. Seismogeological and hydrological criteria for the New European Macroseismic Scale (MSK-92). Natural Hazards, 1994. Vol. 10, N 1/2. pp. 1–6.

= ГЕОФИЗИКА =

VДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36753

Оригинальная статья

Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания.

Часть 2

Ю.К.Чернов (¹), д. ф.-м. н., проф., А.Ю. Чернов (²), к. т.н., М.И.Читишвили (¹), асп.

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

2Инженерный институт «Северо-Кавказский федеральный университет», Россия, 355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2

Статья поступила: 26 июля 2019, доработана: 16 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Характеристики движений грунта при сильных землетрясениях из-за зависимости от большего числа трудно контролируемых природных факторов имеют случайную природу, вследствие чего их моделирование целесообразно проводить в вероятностной форме. Эпистемическая неопределенность учитывается включением в вероятностный анализ альтернативных моделей. Целью работы является разработка региональной модели для территории Республики Северная Осетия-Алания. Объектом исследования являются сейсмические воздействия. Метод исследования – вероятностный анализ сейсмической опасности. Результаты работы. В статье описываются модели спектров и акселерограмм колебаний грунта, а также «нетрадиционных» («спектральных») моделей балльности сотрясений, разработанные в рамках исследований по созданию нового варианта вероятностной карты детального сейсмического районирования (ДСР) территории РСО-Алания. Спектры Фурье и спектры реакции моделируются в виде наборов уровней спектральной плотности (ISI) и спектральных ускорений (SA) на различных частотах (f). Эти параметры рассматриваются как случайные величины, имеющие лог. нормальное распределение вероятностей при различных сочетаниях магнитуд землетрясений (*M*) и расстояний до очага (*D*). Построение функций распределения выполнено в два этапа. Сначала определены «среднестатистические» оценки ISI (M, D, f) или SA (M, D, f), а затем путем корректировок эти оценки приближены к условиям рассматриваемой территории. Корректировки сделаны на основе анализа сейсмогеологических особенностей района, влияющих на рассматриваемые параметры сильных движений грунта (СДГ). Базовые («среднестатистические») построения проведены с использованием более 2500 спектров ускорений колебаний грунта при землетрясениях различных районов мира с M=2,5-7,7, D=2-808 км и /=3-10 баллов MSK. Применен также новый метод восстановления спектров колебаний грунта при землетрясениях по их макросейсмическому полю. Для этого использованы данные макросейсмических обследований 27 сильных землетрясений региона с М=3,5-7,0 и силой сотрясений в эпицентре 6-9 баллов MSK. Акселерограммы моделировались как в виде временных функций, генерируемых методом случайных колебаний, так и подбором записей реальных землетрясений с последующим их масштабированием в спектрально-временной области. В обоих случаях критериями точности построений являлись близости спектров, а также амплитуд, периодов и длительностей, измеренных на акселерограммах к соответствующим моделям спектров и описанным в первой части статьи моделям единичных параметров. Получаемые посредством разработанных моделей оценки всех параметров СДГ сопоставлялись между собой, а также с оценками по другим известным в мире моделям. Показан высокий уровень согласованности и непротиворечивости всех моделируемых параметров СДГ при землетрясениях всех рассматриваемых М и D. Выполненные для сравнения такие же тесты для некоторых других моделей СДГ, рекомендуемых для использования на территории РФ, показали преимущества наших моделей по данному показателю. Практическая значимость работы. Разработанные модели СДГ могут быть полезными при вероятностном и детерминистском («ситуационном») анализе сейсмической опасности территории РСО-Алания и других районов со сходными сейсмогеологическими условиями.

Ключевые слова: детальное сейсмическое районирование, землетрясения, сильные движения грунта, вероятные сейсмические воздействия, макросейсмическая интенсивность, сейсмические колебания.

Для цитирования: Чернов Ю.К., Чернов А.Ю., Читишвили М.И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть 2. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 161-178. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36753. = GEOPHYSICS =

DOI: <u>10.23671/VNC. 2019.3.36753</u>

Original paper

Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania.

Part 2

Y. K. Chernov (D¹, A. Y. Chernov (D², M. I. Chitishvili)

1Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: chenta-26@mail.ru;

²Institute of Construction in the North-Caucasian Federal University, 2 Kulakov Str., Stavropol 355029, Russian Federation

Received 26 July 2019; revised 16 September 2019; accepted 24 September 2019.

Abstract: Relevance. Due to the large number of difficultly controlled natural factors, the characteristics of soil movements during strong earthquakes are random in nature, and therefore it is advisable to model them in a probabilistic form. Epistemic uncertainty is taken into account by the inclusion of alternative models in the probabilistic analysis. **Aim.** To develop a regional model for the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. The object of the study is seismic impact. Methods. Probabilistic analysis of seismic hazard. Results. The article describes the models of spectra and accelerograms of soil vibrations, as well as "non-traditional" ("spectral") models of shake intensity, developed as the part of studies to create a new version of the probability map of detailed seismic zoning (DSZ) of the territory of North Ossetia-Alania. Fourier spectra and response spectra are modeled as sets of spectral density levels (ISI) and spectral accelerations (SA) at different frequencies (f). These parameters are considered as random variables having a log-normal probability distribution for various combinations of earthquake magnitudes (M) and focal distance (D). The construction of distribution functions is carried out in two stages. First, "average" estimates ISI (*M*, *D*, *f*) or SA (*M*, *D*, *f*), and then by adjusting these estimates are close to the conditions of the considered territory. Corrections are made on the basis of the analysis of the seismic and geological features of the area, affecting the parameters under consideration for strong ground motions (SGM). Basic ("average") calculations were carried out using more than 2500 acceleration spectra of soil vibrations during earthquakes in different parts of the world with M = 2.5-7.7, D = 2-808 km and I = 3-10 MSK points. A new method has also been applied for reconstructing the spectra of soil vibrations during earthquakes according to their macroseismic field. For this purpose, data from macroseismic surveys of 27 strong earthquakes in the region with M = 3.5-7.0 and shaking strength at the epicenter of 6–9 MSK points were used. Accelerograms were modeled both in the form of time functions generated by random vibrations and by selecting records of real earthquakes with their subsequent scaling in the spectral-temporal region. In both cases, the criteria for the accuracy of the constructions were the proximity of the spectra, as well as the amplitudes, periods, and durations measured on the accelerograms to the corresponding spectral models and models of unit parameters described in the first part of the article. Estimates of all SGM parameters obtained by means of the developed models were compared with each other, as well as with estimates from other models known in the world. A high level of consistency and consistency of all simulated SGM parameters during earthquakes of all the considered M and D is shown. The same tests performed for comparison for some other SGM models recommended for use on the territory of the Russian Federation showed the advantages of our models for this indicator. Practical significance. The developed SGM models can be useful in probabilistic and deterministic ("situational") analysis of seismic hazard in the territory of North Ossetia-Alania and other areas with similar seismic and geological conditions.

Keywords: detailed seismic zoning, earthquakes, strong ground motions, probable seismic effects, macroseismic intensity, seismic vibrations.

For citation: Chernov Yu.K., Chernov A.Yu., Chitishvili M.I. Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Part II. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9(3): 161-178. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753.

Ведение

В Геофизическом институте «Владикавказского научного центра РАН» разрабатывается новый вариант вероятностной карты ДСР территории РСО-Алания. Важной составной частью этих исследований является разработка моделей сильных движений грунта (СДГ) при потенциально опасных землетрясениях региона. Моделируются наиболее важные для инженерно-сейсмологической практики параметры сильных движений – так называемые единичные характеристики (пиковые ускорения грунта (*PGA*), периоды ускорений с максимальной амплитудой (T_a), длительности основной фазы колебаний (τ)), спектры и акселерограммы колебаний грунта, а также макросейсмические интенсивности сотрясений. Модели единичных характеристик СДГ и макросейсмических интенсивностей сотрясений (в традиционном понимании – I_T) описаны в первой части статьи (см. [Чернов и др., 2019]). В настоящей (второй) части данной работы приведены результаты разработки вероятностных моделей спектров и акселерограмм при потенциально опасных для изучаемого района землетрясениях. Здесь же рассмотрены и производные от моделей спектров модели так называемых (подробнее см. в [Чернов, 1989]), «спектральных» моделей балльностей (I_C),

Также как и описанные в первой части статьи модели единичных параметров данные модели строились в контексте общей расчетной схемы, согласно которой моделируемые параметры СДГ являются случайными величинами, задание которых возможно лишь с некоторой долей неопределенности. Согласно концепции современного вероятностного анализа сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis или PSHA) рассмотрены два типа таких неопределенностей. Первый обусловлен невозможностью точного учета всех природных факторов, влияющих на поле сильных движений. Второй связан с выбором того или иного массива исходных данных, того или иного способа его анализа и интерпретации получаемых результатов, выбором типа и параметров результирующих моделей и т. д. Данное обстоятельство порождает многообразие возможных решений, каждое из которых само может рассматриваться как реализация другой, более общей случайной величины. Механизм случайности этой величины формируется уже не «объективными» природными, а другими, «субъективным» факторами. В литературе эти неопределенности часто обозначаются как «алеаторые» и «эпистемические», соответственно [Афанасьева, 2008; Bommer, Scherbaum, 2008; Соколов, 2012; Beven et al., 2015]. «Эпистемические» неопределенности могут учитываться в рамках методологии «логического дерева» [Воттег et al., 2010; Cotton et al., 2006; Delavaud et al., 2012; Danciu et al., 2016, Kale, Akkar, 2017]. Настоящее исследование включает в себя элементы данной методологии в виде анализа различных вариантов, первичных данных, способов их обработки, а также вариантов уже известных моделей того же типа. С этих позиций предлагаемые модели в зависимости от контекста можно рассматривать и как одну из возможных альтернатив и как итоговое обобщение различных решений.

Настоящая работа в значительной мере базируется на результатах наших предыдущих исследований (см. [Чернов, 1989; Чернов Ю., Чернов А., 2008; Zaalishvili, Chernov, 2018]). В соответствие с содержащимися в них рекомендациями, также как и приведенные в первой части статьи модели *PGA*, T_a , τ и I_T , рассматриваемые здесь модели |S|(M,D,f), SA(M,D, f), и I_C , задают прогнозируемые параметры в виде случайных величин с логарифмически нормальным распределением вероятностей. Поэтому основная задача данной работы – определение характеристик этих распределений применительно к сейсмогеологическим условиям исследуемой территории РСО-Алания.

Получаемые посредством разработанных моделей оценки всех параметров СДГ (и единичных и спектрально-временных) сопоставлены между собой, а также с оценками по другим известным в мире моделям – тестирование на «внутреннюю» и «внешнюю» согласованность. Выполненные для сравнения такие же тесты для некоторых других моделей СДГ, рекомендуемых для использования на территории РФ, показали преимущества наших моделей по данному показателю.

Исходные данные и методика исследований

Модели спектров Фурье и спектров реакции колебаний грунта строились в виде набора значений уровня спектральной плотности или спектральных амплитуд ускорений для 18 спектральных составляющих, логарифмически равномерно распределенных в инженерном диапазоне частот 0,28-22,0 Гц. Преимущества такого способа параметризации спектров рассмотрены в [Чернов, 1989]. Функции распределения вероятностей при этом строятся для каждой спектральной составляющей отдельно. Принципы построения те же, что и для единичных параметров колебаний – делаются оценки уровней спектра в ближней зоне землетрясений разных (потенциально опасных) магнитуд и оценки их изменения с расстоянием по мере удаления от очага.

По тем же причинам, что и единичные характеристики колебаний модели спектров для изучаемой территории РСО-Алания построены в два этапа. Сначала рассмотрены базовые «среднестатистические» модели. Затем в них внесены региональные поправки. В качестве «среднестатистических» приняты модели спектров, подробно (включая математические выражения) описанные нами в [Чернов Ю., Чернов А., 2008; 2017]. Исходными данными для этих моделей являлись 2507 инструментально зарегистрированных спектров землетрясений из различных районов мира с M=2,5-7,7, D=2-800 км, I=3-10 баллов MSK, более подробная информация о которых, дана в первой части статьи. Дополнительно использованы также схожие по формату модели |S| (*M*, *D*, *f*), разработанные нами ранее для Северного Кавказа, Средней Азии, Дальнего Востока, запада США, севера Италии и других районов. На рисунке 1 приведены примеры таких первичных построений для землетрясений с $M \approx 5,0$ (4,5-5,4) и $M \approx 7,0$ (6,5-7,4). Здесь же приведены полученные на основе этих данных и служащие первым приближением для наших дальнейших построений «среднестатистические» функции затухания спектров для землетрясений взбросо-сдвигового типа. Данный тип зависимостей выбран как подходящий для учета в обобщенном виде механизмов очагов большинства. землетрясений исследуемого района.

При разработке моделей спектров в ближней зоне землетрясений помимо «инструментальных» оценок использован также метод реконструкции спектров сильных землетрясений по их макросейсмическому полю. В основе данного метода лежат установленные нами ранее количественные соотношения между наблюдаемыми макросейсмическими эффектами и уровнями спектральной плотности Фурье ускорений колебаний грунта на определенных («ответственных») частотах, своих, для сотрясений разной силы. Данные соотношения успешно использовались во многих сейсмоактивных районах страны и за рубежом для решения «прямой» задачи – определения вероятных балльностей сотрясений по известным спектрам колебаний грунта. Это так называемая «спектральная» модель балльности. В данном же случае решается «обратная» задача – по наблюдаемым макросейсмическим эффектам оценивается спектр вызвавших эти эффекты колебаний. Методика таких построений, основана на количественном сопоставлении (методом итераций) функций затухания спектров колебаний с независимыми оценками функций затухания макросейсмической интенсивности землетрясений. Достаточно подробно она описана в [Чернов Ю., Чернов А., 2008]. Здесь только отметим, что приведенные в этой публикации примеры, показывают, что «макросейсмические» оценки спектров, по точности могут быть сопоставимы с «инструментальными».

Для построения «макросейсмических» спектров использованы данные макросейсмических обследований 27 сильных землетрясений изучаемого региона с M=3,5-7,0 и силой сотрясений в эпицентре $I_0 = 6-9$ баллов *MSK*, среди которых Ахалкалакское землетрясение

31 декабря 1899 г., Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г., Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г., Рачинское землетрясение 29 апреля 1991 г., Сальское землетрясение 22 мая 2001 г., Нижнекубанское землетрясение 9 ноября 2002 г. и др.). Второй тип использованных материалов – приведенные в [Никонов, 1995] оценки балльности сотрясений в эпицентрах 189 землетрясений с магнитудами *M*=2,0-5,6, глубинами очагов *H*=3-40 км и макросейсмическими балльностями *I*₀=3,0-7,5 балла *MSK*.

9 (3) 2019

Помимо описанной в первой части статьи «традиционной» модели балльности $I_{\rm T}$ (M, D) разработана вышеупомянутая «спектральная» модель балльности $I_{\rm C}$ (M, D), основанная на описанной в [Чернов, 1989] тесной связи макросейсмических эффектов землетрясений с уровнями спектров колебаний на «ответственны» частотах, своих для каждого уровня балльности. Принятые в настоящей работе значения этих параметров приведены в таблице 1. В ней значения $|S|_{form}$ для I>VII баллов – это наши предыдущие оценки, для I≤VII баллов – это уточненные по расширенной базе данных (см. первую статьи) оценки настоящего исследования.



Рис. 1. Примеры первичных данных и результатов построений моделей спектров Фурье ускорений колебаний грунта при потенциально опасных на изучаемой территории РСО-Алания землетрясениях с М≈5,0 (А) и М≈7,0 (Б). Синие кружки – прямые измерения по базе инструментально зарегистрированных спектров землетрясений. Зеленые и красные линии – «среднестатистические» оценки спектров землетрясений взбросового типа и скорректированные за счет региональных условий, соответственно. /

Fig. 1. Examples of primary data and the results of constructing models of Fourier spectra of accelerations of soil vibrations in case of earthquakes potentially dangerous in the investigated territory of North Ossetia-Alania with $M\approx5.0$ (A) and $M\approx7.0$ (B). Blue circles – direct measurements based on the instrumentally recorded spectra of earthquakes. The green and red lines are the "average" estimates of the ramp-type earthquake spectra and adjusted due to regional conditions, respectively.

Для получения итоговых, приближенных к региональным условиям, моделей «среднестатистические» оценки скорректированы путем введения соответствующих поправок. Коррекция выполнена с учетом сопоставительных оценок, полученных ранее нами, а также другими исследователями для различных сейсмоактивных районов мира, с разными сейсмотектоническими условиями (см. выше). Корректирующие (повышающие ~ на 5-25% уровни высокочастотной части спектров в ближних зонах землетрясений) коэффициенты, приняты на основании результатов многочисленных исследований, свидетельствующих о сравнительно более высоком уровне макросейсмических эффектов в эпицентральных зонах северокавказских землетрясений.

Исследуемый район преимущественно расположен в горной области, характеризующейся раздробленностью земной коры и, как следствие, повышенным (по сравнению с платформами) затуханием сейсмических сигналов с расстоянием. Поэтому в итоговых моделях скорости затухания амплитуд, спектров и балльностей с расстоянием увеличены на 5-15% по сравнению с исходными «среднестатистическими» зависимостями. В графическом виде примеры откорректированных таким образом моделей также приведены на рисунке 1.

Для уменьшения эпистемической (субъективной) составляющей неопределенности помимо вышеописанных зависимостей |S| (M, D, f) в качестве альтернативных привлечены оценки, разными способами выполненные ранее для смежных районов со сходными сейсмотектоническими условиями.

Значения спектральных ускорений *SA* (*M*, *D*, *f*)) (спектров реакции) определялись из соответствующих значений |S| (*M*, *D*, *f*) по методике [Ванмарке, 1981]. Второй вариант (дополнительный) – оценки спектров реакции через рекомендованные в [Свод..., 2018] стандартные коэффициенты динамичности *b* (*T*):

$$SA(T) = \beta(T) a_{eff} \tag{1}$$

где *T* – период колебаний в с.; *a_{eff}* – эффективное ускорение, рассчитываемое по *PGA* (см. первую часть настоящей статьи) или по коэффициентам сейсмичности, вытекающим из рекомендаций СНиП [Свод..., 2018].

Записи ускорений колебаний грунта при землетрясениях (акселерограммы) моделировались двумя способами – синтезированием при помощи метода случайных колебаний [Болотин, 1979; Салганик, 1987; Штейнберг и др., 1993] и подбором реальных записей землетрясений.

При реализации первого способа огибающая цуга колебаний задается по выражению из работ [Штейнберг и др., 1993; Свод..., 2017]:

Таблица 1. / Table 1.

Значения «ответственных» частот ($f_{\text{отв}}$) и уровней спектральной плотности на этих частотах ($|S|_{f_{\text{отв}}}$) для различных макросейсмических интенсивностей (I),

принятые при построении «спектральной» модели балльности. / Values of "responsible" frequencies (f_{res}) and spectral density levels at these frequencies ($|S|f_{res}$) for different macroseismic intensities (*I*), adopted when constructing the "spectral" intensity model.

Параметры	I, балл MSK / I, point MSK									
спектров /										
Spectrum	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Parameters										
$f_{\text{отв}}, \Gamma$ ц /	10,0	10,0	7,8	4,8	3,6	1,68	1,0	0,78	0,78	0,78
<i>S</i> _{<i>f</i>отв} , см/с /	-0,54	-0,08	0,37	0,82	1,28	1,73	2,18	2,65	3,00	3,20

$$a = a_{\max} \frac{3t \cdot \tau}{9t^2 - 9t \cdot \tau + 4\tau^2}$$
(2)

где $\tau = \tau_{0,5.}$

Оценки значений $\tau_{0.5}$ выполнены по моделям, описанным в первой части статьи.

Синтезированные акселерограммы рассчитываются для временного интервала, на котором ожидаются опасные ускорения. Помимо соответствия спектрам и огибающим записей ускорений, псевдоакселерограммы конструируются таким образом, чтобы геометрическое среднее максимальных амплитуд ускорений на двух горизонтальных составляющих одной записи было близко к соответствующим прогнозным значениям *PGA*. Кроме этого в разрабатываемый ансамбль акселерограмм включаются синтезированные записи с различными периодами T_a так, чтобы в совокупности они давали среднее по ансамблю значение T_a , близкое к своему прогнозному значению.

При подборе акселерограмм реальных землетрясений применяется их масштабирование по амплитудам и в спектрально-временной области, цель которого более точное совпадения спектра реакции масштабированной акселерограммы с прогнозным спектром реакции. Коэффициенты масштабирования рассчитываются по отношениям прогнозных спектров и реальных спектров на «характерных» или «важных» для рассматриваемых объектов периодах. Дополнительно к основному критерию (близости спектра масштабированной акселерограммы к прогнозному спектру) применяются также и критерии близости амплитуд и периодов пиковых ускорений, а также относительных длительностей масштабированных акселерограмм к соответствующим прогнозным значениям этих параметров.

Результаты и обсуждение

<u>Модели спектров Фурье ускорений колебаний грунта</u>. Для определения параметров моделей (функций распределения вероятностей) уровней спектральной плотности Фурье ускорений грунта для каждой спектральной составляющей при возникновении землетрясения с магнитудой M и расстоянием до очага D сначала сделаны оценки «опорного» спектра ускорений колебаний грунта в ближней зоне землетрясений с $\overline{M} = 5,0$. Магнитуды $\overline{M} = 5,0$ выбраны как занимающие среднее по магнитуде положение в ряду потенциально опасных для территории РСО-Алания ($\overline{M} = 3,5-7,0$), что дает наименьшую суммарную погрешность при последующих пересчетах (экстраполяциях), полученных для данной магнитуды оценок (см. ниже) в сторону больших и меньших M. Кроме того данная категория спектров относительно хорошо обеспечена статистическим материалом. Итоговый спектр обобщает несколько версий таких оценок. В графическом виде они показаны на рисунке 2.

Как видно из этого рисунка различные варианты оценок тесно корреспондируют между собой, что говорит о возможности получения на их основе достаточно надежных итоговых оценок. Считая точность полученных в процессе настоящего исследования «инструментальных» и «макросейсмических» спектров выше, чем других альтернатив, каждому из них придан статистический вес 2, остальным – по 1. Результирующая средневзвешенная оценка, принятая для дальнейших расчетов также приведена на этом рисунке.

Спектр, полученный для ближней зоны землетрясений с \overline{M} =5,0, с использованием соотношений $\beta_{\rm M}(f)$ для землетрясений взбросо-сдвигового типа из [Чернов Ю., Чернов А., 2017] пересчитан в спектры для ближних зон землетрясений других потенциально опасных магнитуд (\overline{M} =3,5-7,0). Итоговые оценки спектров Фурье в графическом виде приведены на рисунке 3.

На следующем этапе из ближней зоны значения |S|(M,f) при помощи откорректированных (см. выше) коэффициентов затухания $n_{lg|S|}$ пересчитаны на разные расстояния D. Примеры, итоговых функций затухания наиболее вероятных значений |S| для различных спектральных составляющих в графическом виде показаны на рисунках 4 и ба. Стандартные



Рис. 2. Наиболее вероятные значения уровней спектральной плотности Фурье ускорений (|S|) в ближней зоне потенциально опасных для территории PCO-Алания землетрясений с $\overline{M} = 5,0$. «Средние» грунтовые условия. Синие линии: 1 - уточненная оценка спектра для района Дагестанского землетрясения 1970 г. из [Чернов, 1989]; <math>2 - для землетрясений Центрального Предкавказья из [Чернов, 2011]; 3 u 4 - «макросейсмические» и «инструментальные спектры настоящего исследования, соответственно; <math>5 - для кавказских землетрясений из [Соколов, 1998]; 6 - для землетрясений Северного Кавказа из [Чернов, 2006]. Красная линия – принятые (средневзвешенные) оценки. /

Fig. 2. The most probable values of the spectral density levels of Fourier accelerations (|S|) in the near zone of earthquakes potentially hazardous for the territory of North Ossetia-Alania with M = 5.0.
"Average" soil conditions. Blue lines: 1 – refined spectrum estimate for the 1970 Dagestan earthquake. from [Chernov, 1989]; 2 – for earthquakes of the Central Ciscaucasia from [Chernov, 2011]; 3 and 4 – "macroseismic" and "instrumental spectra of the present investigation, respectively; 5 – for the Caucasian earthquakes from [Sokolov, 1998]; 6 – for earthquakes of the North Caucasus from [Chernov, 2006]. Red line – accepted (weighted average) estimates.



Рис. 3. Наиболее вероятные значения уровней спектральной плотности Фурье ускорений в ближней зоне потенциально опасных для территории PCO-Алания землетрясений разных магнитуд (М). «Средние» грунтовые условия. /

Fig. 3. The most probable values of the Fourier spectral density levels of accelerations in the near zone of earthquakes of various magnitudes (M) potentially hazardous for the territory of North Ossetia-Alania. "Average" soil conditions.



Puc. 4. Примеры наиболее вероятных значений |S| (M, D, f), моделирующих спектры землетрясений, потенциально опасных для территории PCO-Алания. / Fig. 4. Examples of the most probable values of |S| (M, D, f), simulating the spectra of earthquakes that are potentially hazardous for the territory of North Ossetia-Alania.



Рис. 5. Примеры моделей СДГ для потенциально опасного на территории PCO-Алания землетрясения с M=6,0 и D=15 км. «Средний» грунт. а – наиболее вероятные значения |S| (f); b – синяя и зеленая линии – наиболее вероятные значения SA (f) по основному и дополнительному варианту, соответственно; синяя и красная линии – спектры реакции, рассчитанные по акселерограммам, показанным на рисунке под индексами «с» (синтезированная) и «d» (масштабированная запись землетрясения Greece; Alkion Eq. 25.02.1981; M_L=6,1; D= 24 km. Korinthos – OTE Building; VI+ (MSK), компонента E-W). /

Fig. 5. Examples of SGM models for a potentially hazardous earthquake in the North Ossetia-Alania with M = 6.0 and D = 15 km. "Medium" soil. and – the most probable values |S| (f); b – blue and green lines – the most probable values of SA (f) for the main and additional options, respectively; the blue and red lines are the reaction spectra calculated from the accelerograms shown in the figure under the indices "c" (synthesized) and "d" (scaled record of the Greece earthquake; Alkion Eq. 02.25.1981; $M_L = 6.1$; D = 24 km Korinthos OTE Building; VI+ (MSK), E-W component). отклонения $\sigma_{lg|S|} \approx 0.30$ приняты одинаковыми для всех *M*, *D* и *f*.

<u>Модели спектров реакции ускорений колебаний грунта</u>. По итоговым моделям |S| (*M*, *D*, *f*), а также по описанным в первой части статьи моделям *PGA* (*M*, *D*) построены модели спектров реакции *SA* (*M*, *D*, *f*), примеры двух вариантов которых (основного и дополнительного) приведены на рисунке 56.

<u>Модели акселерограмм колебаний грунта</u>. Пример двух вариантов моделей колебательных ускорений грунта при сильном землетрясении рассматриваемого района приведен на рисунках 5с и 5d. Спектр реакции, используемый для конструирования этих акселерограмм, показан на рисунке 5b. Здесь же для сравнения приведены спектры реакции рассчитанные по этим акселерограммам.

<u>Модель «спектральной» балльности сотрясений грунта.</u> Примеры результатов расчетов по «спектральной» модели приведены на рисунке 6. Стандартные отклонения для всех расчетных значений I приняты одинаковыми и равными $\sigma_I \approx 0.3$ балла MSK.

Также как и рассмотренные в первой части статьи модели единичных параметров СДГ, описанные выше модели спектров, акселерограмм и «спектральных» балльностей сопоставлялись между собой и с моделями вышеупомянутых единичных характеристик (тест на внутреннюю согласованность). Сопоставление показывает высокий уровень их согласованности и непротиворечивости. Так, например, функции затухания $I_{\rm C}(M, D)$ и $I_{\rm T}(M, D)$ (рис. 6) очень близки. Здесь также следует иметь в виду, что функции I_C (M, D) являются производными от функций затухания |S| (M, D, f), а функции I_T (M, D), в свою очередь, тесно коррелируют с описанными в первой части статьи параметрами PGA, T_a и τ . В этом контексте важно отметить еще и то, что разработанные модели хорошо вписываются в данные натурных обследований сильных землетрясений региона (примеры на рисунке 6). На этом рисунке данные обследований по Спитакскому землетрясению 7 декабря 1988 г. взяты из [Геодакян и др., 1991], данные по Ахалкалакскому землетрясению 31 декабря 1899 г. из [Tatevossian et al., 1997]. Данные по северокавказским землетрясениям с М≈4,5 (4,1-4,9) – объединение данных по афтершокам Дагестанского землетрясения 1970 г. из [Рустанович, 1974; Дагестанское..., 1981], данных из каталога [Никонов, 1995] и материалов ИФЗ РАН по ДСР Ставропольского края. Осреднение везде выполнено нами.



Рис. 6. Сопоставление наиболее вероятных балльностей сотрясений по нашим моделям землетрясений с M=7,0 (a), M=6,0 (б) и M=4,5 (в) с данными макросейсмических обследований для Спитакского землетрясения 1988 г., Ахалкалакского землетрясения 1899 г. и землетрясений рассматриваемого региона с M≈4,5, соответственно. I_T (красная линия) и I_C (зеленая линия). Пустые синие и залитые красные кружки результаты натурных обследований и их осреднение, соответственно. /

Fig. 6. Comparison of the most probable tremor intensities from our earthquake models with M = 7.0 (a), M = 6.0 (b) and M = 4.5 (c) with macroseismic surveys for the 1988 Spitak earthquake, 1899Akhalkalaki earthquake and earthquakes of the considered region with $M \approx 4.5$, respectively. I_T (red line) and I_C (green line). Empty blue and filled red circles are the results of field surveys and their averaging, respectively.

Спектры модельных акселерограмм близки к соответствующему прогнозному спектру реакции (рис. 5b). Пиковые амплитуды, периоды и длительности, измеренные на этих акселерограммах также близки к их прогнозным значениям (см. первую часть статьи). Таким образом, модели акселерограмм также представляются достаточно реалистичными и обоснованными.

В целом тесты на «внутреннюю» согласованность показывают, что разработанный комплекс моделей СДГ (как единичных, так и спектрально-временных характеристик) хорошо сбалансирован – все моделируемые параметры увязаны между собой и «подтверждают» друг друга во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд и расстояний.

Сравнение (в рамках проверки на «внешнюю» согласованность) наших моделей спектров со спектрами из других регионов показывает, что в ряде случаев, они могут быть на 15-30% выше спектров аналогичных по магнитуде землетрясений запада США или района Газли и близки к спектрам землетрясений севера Италии (см., например, [Sadigh et al., 1986; Чернов, 1989; Boore et al., 1994; Campbell, Bozorgnia, 1994, 2008]. «Среднестатистические» спектры также примерно в 1,1 раза ниже спектров, принятых в настоящем исследовании для территории РСО-Алания.

Таким образом, для наиболее опасных на изучаемых территориях землетрясений, разработанный комплекс моделей СДГ является достаточно реалистичным и дающим несколько (~ на 5-15%) завышенные оценки по сравнению со многими используемыми в мировой практике подобными эмпирическими зависимостями. Такой консерватизм оценок на этом этапе представляется оправданным, так как он, с одной стороны, призван отражать особенности сейсмогеологической ситуации исследуемого района, а с другой – уменьшить риск недооценки уровня сейсмической опасности, которая может возникнуть из-за отмеченной ранее ограниченности использованных здесь исходных данных.

В то же время, сравнивая наши модели спектров реакции с оценками, вытекающими из действующих нормативов (рис. 5b) можно видеть, что в низкочастотной области, наоборот, наши оценки существенно ниже нормативных. В этой связи следует отметить, что такие расхождения, возможно, имеют системный характер, так как наблюдались нами и ранее во многих других районах, где проводились тподобные исследования.

Продолжая тему согласованности и непротиворечивости результатов модельных построений, как инструмента и важного критерия оценки их обоснованности и надежности, отметим, что, по нашему мнению, выполненный в настоящем исследовании объем таких перекрестных проверок и, главное, их результаты являются одной из отличительных черт настоящей работы. В отечественной инженерно-сейсмологической практике такие проверочные сопоставления пока не имеют достаточного распространения. Поэтому, в целях сравнительного анализа мы сами выполнили подобные сопоставления для двух, как нам кажется, наиболее важных для нашей страны групп моделей СДГ, имеющих схожее с нашими моделями предназначение и содержание. Это версии моделей, разработанные для ОСР территории РФ [Комплект..., 1999; Свод..., 2018] и для производства ДСР [Свод..., 2017]. В материалах по ОСР в явном виде приводятся только функции затухания I(M, D) и PGA(M, D). При разработке I(M, D) наряду с другими процедурами использован функционал, связывающий балльность. пиковое ускорение и относительную длительность ускорений колебаний грунта $I^{**}(PGA, \tau_{0.5})$, который подобен функционалу из [Свод..., 2017]. Исходя из этого, в качестве теста на «внутреннюю» согласованность (см. пример на рис. 7а) сопоставлены значения, вытекающие из вышеозначенной зависимости I(M, D) и функционала $I^{**}(PGA, \tau_{0.5})$, в котором PGA(M, D) – рекомендации ОСР, а $\tau_{0.5}(M, D)$ взяты из [Свод..., 2017]. Для оценки «внешней» согласованности на этом же рисунке приведена рекомендованная в шкале MMSK-84 зависимость I(M, r), в которой r преобразовано в D (см. первую часть статьи).

На рисунке 7b приведен пример подобных сопоставлений оценок, вытекающих из мо-



Рис. 7. Наиболее вероятные прогнозные значения макросейсмических интенсивностей сотрясений при землетрясениях разных магнитуд. a - no моделям OCP, где синие, зеленые и красные линии – оценки по зависимостям I (M, D), по функционалам I** (PGA, $\tau_{0,s}$) и по шкале MMSK-84, соответственно. b - no моделям, рекомендуемым для ДСР, где синие, и красные, зеленые и оранжевая линии – оценки по шкале MMSK-84, по функционалам I** (PGA, $\tau_{0,s}$), по нашим «среднестатистическим» зависимостям I (M, D) и по зависимости I (M, D) для OCP. / Fig. 7. The most probable prognosis values of macroseismic intensities of tremors during earthquakes of different magnitudes. a - according to the GSZ models, where the blue, green, and red lines are the estimates for the dependences I (M, D), for the functionals I** (PGA, $\tau_{0,s}$), and for the MMSK-84 scale, respectively. b - according to the models recommended for DSZ, where the blue, and red, green and orange lines are grades on the MMSK-84 scale, according to the functionals I** (PGA, $\tau_{0,s}$), according to our "average" dependencies I (M, D) and according to the dependence I (M, D) for GSZ.

делей СДГ, рекомендованных для ДСР. В этом случае, исходя из контекста публикации [Свод..., 2017] в качестве рекомендованных функций затухания балльностей приняты оценки по скорректированной зависимости I(M, r) из шкалы *MMSK-84*. Для «внешних» сравнений использованы наши «среднестатистические» зависимости, а также зависимости I(M, D), принятые для ОСР.

Приведенные иллюстрации и весь выполненный сравнительный анализ в целом показывают, что, предлагаемый в настоящем исследовании комплекс моделей СДГ применительно именно к территории РСО-Алания среди рассмотренных выше альтернатив является конкурентоспособным, а с учетом «критерия согласованности» выглядит даже предпочтительнее.

Исходя из этого и имея в виду современную практику PSHA, в общем случае, предполагающего использование нескольких альтернативных версий, предлагаемый комплекс моделей СДГ можно рекомендовать в качестве одной из возможных альтернатив.

Говоря о полезности многовариантных оценок, все же нужно иметь в виду, что при разработке отечественных нормативных документов (Карт ОСР-97 и ОСР-2015) использована только одна (не эмпирическая и не теоретическая, а по терминологии авторов «описательная», т.е., в нашем понимании, «умозрительная») версия модели СДГ. В рекомендациях для ДСР [Свод..., 2017] также закреплена только одна конкретная версия моделей СДГ. Кроме того, согласно данному документу, сами оценки сейсмической опасности в рамках ДСР, могут производиться как в вероятностной, так и в детерминистской форме. Правда при этом вопрос о том, каким образом эти две оценки, имеющие разный физический смысл соотносятся друг с другом, остается открытым. Тем не менее, если встать на позиции этих документов, то комплекс наших моделей в принципе может рассматриваться и как безальтернативный вариант, который, при отсутствии более сильных конкурентов, также может быть использован в целях ДСР на территории РСО-Алания.

Заключение

Как отмечено выше, из-за большой эпистемической неопределенности, для более надежных оценок сейсмической опасности следует использовать (см., например, [Douglas, 2010]) нескольких альтернативных моделей СДГ, процедуры подбора которых, обсуждались многими исследователями (см. выше). В данной работе мы следуем рекомендациям сформулированным [Danciu et al., 2016], согласно которым в рабочий набор моделей СДГ необходимо включать хотя бы одну модель, разработанную для конкретной территории (региона) (группа 1). В настоящем исследовании предлагается вариант таких региональных моделей различных характеристик СДГ. В этих моделях эпистимическая неопределенность учитывалась путем анализа разных наборов исходных данных и разных методик создания моделей СДГ. В исследуемом регионе, так же, как и в большинстве сейсмоактивных районов мира, ограниченный объем записей местных сильных землетрясений пока не позволяет применять методы прямого статистического анализа. Поэтому использовалась техника адаптации моделей, предложенных для других регионов, и «среднемировых» моделей. Такая адаптация широко используется в мировой практике (см. например [Atkinson 2010], а так же обзор в работе [Вога et al., 2018]).

Характеризуя разработанный комплекс моделей СДГ в целом можно резюмировать следующее:

1. Предлагаемые модели дают возможность на количественном уровне производить оценки всех необходимых для вероятностного детального сейсмического районирования территории PCO-Алания характеристик макросейсмических эффектов и колебаний грунта при потенциально опасных для данной территории землетрясениях.

2. Разработанные модели позволяют учитывать региональные и локальные особенности возможных на данной территории землетрясений, такие как интенсивность и спектральный состав сейсмических возмущений в ближней зоне землетрясений разных магнитуд, изменение характеристик сотрясений с расстоянием, геометрические размеры и пространственную ориентацию очагов, механизм подвижки и другие факторы, что повышает точность и детальность прогнозных оценок.

3. Представленные модели достаточно полно отражают имеющиеся на данный момент по исследуемому району сейсмогеологические данные. В то же время они относительно просто могут корректироваться с учетом поступающей новой информации. Это делает их удобными также и в технологическом отношении.

4. Проведенные перекрестные сопоставления прогнозируемых посредством разработанных моделей параметров сильных движений между собой и с оценками для других регионов показывают высокий уровень их согласованности и непротиворечивости, что подтверждает их реалистичность и надежность.

В данной статье не рассматриваются вопросы подбора возможного *полного* набора моделей для вероятностной оценки сейсмической опасности территории РСО Алания. В качестве предварительного варианта для данных сейсмотектонических условий в качестве альтернативных можно предложить модель [Akkar et al., 2014] (группа 2 по классификации [Danciu et al., 2016]); модели [Boore, Atkinson, 2008, Campbell, Bozorgnia, 2008] как представители NGA разработок (группа 3 по [Danciu et al., 2016]); и модель [Zhao et al., 2006] (группа 4), которая характеризуется репрезентативным распределением данных по магнитудам и удаленностям землетрясений (см. также [Bommer et al., 2010]).

Изложенное позволяет сделать вывод, что разработанные модели могут использоваться в виде одной из альтернатив при вероятностном анализе сейсмической опасности (PSHA). Наряду с другими разработками в подходящих сейсмотектонических условиях их можно также применять и при производстве «детерминистских» (например, «сценарийных») оценок возможных сейсмических воздействий. В заключение следует отметить, что разработанные модели СДГ являются одним из этапов или вариантов в ряду возможных решений, которые в дальнейшем по мере поступления новых данных должны совершенствоваться, детализироваться и уточняться.

Литература

1. Афанасьева В.В. Онтология научной неопределенности. – Саратов: Наука, 2008. – 108 с.

2. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – С. 29-31.

3. Ванмарке Э. Х. Реакция сооружений на землетрясения. // В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981. – С. 256-299.

3. Геодакян Э.Г., Голинский Г.А., Папалишвили В.Г., Хромецкая Е.А., Шнбалин Н.В. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г., карты изосейст. // Землетрясения в СССР в 1988 году. – М. – 1991. – С. 74-84.

 Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства. – М.: Наука, 1981. – 265 с.

5. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. // Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Министерство науки и технологий, Российская Академия наук, Объединенный Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – М. – 1999-57 с.

6. Никонов А.А. Каталог ощутимых землетрясений Ставропольского края. // Объединенный институт физики Земли РАН. – М. – 1995. – 16 с.

7. Рустанович Д.Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. – М.: Наука, 1974. – 97 с.

8. Салганик М. П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения. // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 28. – М.: Наука, 1987. – С. 157-173.

9. Свод правил. СП XXX1325800.2017. Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования (Первая редакция). Издание официальное. – М. – 2017. – 32 с. // Интернет доступ: http://nopriz. ru/upload/iblock/9b4/sp seism raion. pdf

 Свод правил СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. СНиП II 7-81*
 М. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М. – 2018. – 126 с.

11. Соколов В.Ю. Спектры ускорений колебаний грунта при землетрясениях на Кавказе. // Физика Земли. – 1998. – № 8. – С. 56-69.

12. Соколов В.Ю. О моделировании пространственного распределения сильных движений грунта при оценках сейсмической опасности и риска. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012. – Т. 39. № 2. – С. 5-22.

 Чернов Ю. К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.

14. Чернов Ю.К. Опыт уточнения сейсмической опасности отдельных территорий в Ставропольском крае с учетом новых требований СНиП и мировой практики. // Инженерная геология. Вып. 1. – М. – 2006. – С. 23-35.

15. Чернов Ю. К., Чернов А. Ю. Оценка спектров колебаний грунта при землетрясениях по их макросейсмическому полю для прогнозирования расчетных сейсмических воздействий. // Инженерная геология. М. ОАО ПНИИИС. – 2008. – № 17. – С. 21-37.

16. Чернов А.Ю. Северокавказская региональная система спектров сильных движений грунта для антисейсмического проектирования и строительства. // VIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований в контексте международного сотрудничества и интеграции». Секция «Актуальные вопросы фундаментальных и прикладных геологических исследований». Украина, Днепропетровск. – 2011. – С. 60-61.

17. Чернов Ю.К., Чернов А.Ю. Вероятностные модели сейсмических воздействий для прогнозирования сейсмической опасности в инженерных целях. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 116-128.

8 Чернов Ю. К., Чернов А. Ю., Читишвили М. И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть І. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 2. – С. 95-108.

19. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии, Вып. 34. – М.: Наука, 1993. – С. 5-94.

9 (3) 2019

20. Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer J. J. Empirical ground-motion models for point and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // Bull. Earthq. Eng. – 2014. – V. 12 (1). – Pp. 359-387.

21. Atkinson G.M. Ground motion prediction equations for Hawaii from a referenced empirical approach. // Bulletin of Seismological Society of America. – 2010. – V. 100. – Pp. 751-761.

22. Beven K. J., Aspinall W. P., Bates P. D., Borgomeo E., Goda K., Hall J. W., Page T., Phillips J. S., Rougier J. T., Simpson M., Stephenson D. B., Smith P. J., Wagener T., Watson M. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment – Part 1: A review of the issues. // Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss. – 2015. No. 3. – Pp. 7333-7377.

23. Bommer J. J., Douglas J., Scherbaum F., Cotton F., Bungum H., Fäh D. On the selection of groundmotion prediction equations for seismic hazard analysis. // Seismological Research Letters. – 2010. – V. 81. – Pp. 783-793.

24. Bommer J.J., Scherbaum F. The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. // Earthq. Spectra. – 2008. – V. 24 (4). – Pp. 997-1009.

25. Boore D. M, Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. // Earthquake Spectra. – 2008. –V. 24 (1). – Pp. 99-138.

26. Boore D. M., Joyner W. B., Fumal T. E., Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations From Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. // U. S. Geological Survey Open – File Report. – 1994. – Pp. 94-127.

27. Bora S.S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West² Empirical Fourier and Duration Models to Generate Adjustable Response Spectra. // Earthquake Spectra. In-Press. – 2018.

28. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5%-damped linear elastic response spectra at periods ranging from 0.1 s to 10.0 s. // Earthquake Spectra. – 2008. – V. 24 (1). – Pp. 139-171.

29. Campbell K. W., Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993. // In: Proceedings, Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-141994 Chicago. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. – 1994. – Vol. III. – Pp. 283-292.

30. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J. J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting groundmotion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. // Journal of Seismology. – 2006. – V. 10. – Pp. 137-156.

31. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2016. DOI: 10.1007/s10518-016-9989-1

32. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. // J. Seismol. – 2012. – No. 16. – Pp. 451-473. DOI 10.1007/s10950-012-9281-z

33. Douglas J. Consistency of ground-motion prediction from the past four decades. // Bull. Earthq. Engineering. – 2010. – V. 8 (6). – Pp. 1515-1526. DOI: 10.1007/a10518-010-9195-5.

34. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. // Earthquake Spectra. DOI: 33 (3):837-856. – 2017. – Vol. 33. No. 3. – Pp. 837-856.

35. Sadigh, K., J. Egan, and R. Youngs. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. // Earthquake Notes. – 1986. – Pp. 57-132.

36. Tatevossian R. E., Albini P., Camassi R., Mokrusyina N. G., Shebalin N. V., Petrossian A. E. Analyzing and improving supporting dataset of the Akhalkalak, Dtkemdtr 31, 1899, earthquake. // Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. (D. Giadini, S. Balassanian), Kluver As. Publ. – 1997. – Pp. 383-400.

37. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of The Republic of North Ossetia-Alania. // The Open Construction and Building Technology Journal. DOI: 10.2174/1874836801812010309. – 2018. – No. 12. – Pp. 309-318.

38. Zhao J.X., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura K.,

Thio H.K., Somerville P.G., Fukushima Y. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classifications based on predominant period. // Bulletin of the Seismological Society of America. DOI: 10.1785/0120050122. – 2006. – V. 96. – Pp. 898-913.

References

1. Afanas'eva V.V. Ontology of scientific uncertainty. Saratov, Nauka, 2008. 108 p. (In Russ.)

2. Bolotin V.V. Random vibrations of elastic systems. M. Nauka, 1979. pp. 29–31. (In Russ.)

3. Vanmarke E.Kh. The response of structures to earthquakes. In the book: Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra, 1981. pp. 256–299. (In Russ.)

3. Geodakyan E.G., Golinskii G.A., Papalishvili V.G., Khrometskaya E.A., Shnbalin N.V. Spitak earthquake of December 7, 1988, isoseist maps. Earthquakes in the USSR in 1988. Moscow. 1991. pp. 74–84. (In Russ.)

4. Dagestan earthquake on May 14, 1970. Destructive consequences. Engineering seismology. Issues Earthquake-engineering. Moscow. Nauka, 1981. 265 p. (In Russ.)

5. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-97. Explanatory note and a list of cities and towns located in earthquake-prone areas. Ministry of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Moscow. 1999. 57 p. (In Russ.)

6. Nikonov A.A. Catalog of tangible earthquakes in the Stavropol Territory. The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Moscow. 1995. 16 p. (In Russ.)

7. Rustanovich D.N. Vibrations of the earth's surface in the epicenter zones of strong earthquakes. M. Nauka, 1974. 97 p. (In Russ.)

8. Salganik M.P. Modeling of seismic impacts on building structures. Issues of engineering seismology.
 Vol. 28. Moscow. Nauka, 1987. pp. 157–173. (In Russ.)

9. Set of rules. SP XXX1325800.2017. Detailed seismic zoning and seismic microzonation for spatial planning (First edition). The official publication. Moscow. 2017. 32 p. Internet access: http://nopriz.ru/upload/iblock/9b4/sp seism raion.pdf (In Russ.)

10. Set of rules. SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. SNiP II 7-81 * Moscow. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Moscow. 2018. 126 p. (In Russ.)

11. Sokolov V.Yu. Acceleration spectra of soil vibrations during earthquakes in the Caucasus. Physics of the Earth. 1998. No. 8. pp. 56–69. (In Russ.)

12. Sokolov V.Yu. Modeling the spatial distribution of strong ground motions in assessing seismic hazard and risk. Issues of engineering seismology. 2012. Vol. 39. No. 2. pp. 5–22. (In Russ.)

13. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative seismic hazard assessment of the territories. Tashkent: Publishing house "FAN", 1989. 295 p. (In Russ.)

14. Chernov Yu.K. Experience in refinement of seismic hazard for certain areas in the Stavropol Territory, taking into account the new requirements of SNiP and world practice. Engineering geology. Vol. 1. M. 2006. pp. 23–35. (In Russ.)

15. Chernov Yu.K., Chernov A.Yu. Evaluation of the spectra of soil vibrations during earthquakes by their macroseismic field for prognosis of the estimated seismic effects. Engineering geology. M. OJSC PNIIIS. 2008. No. 17. pp. 21–37. (In Russ.)

16. Chernov A.Yu. North Caucasian regional system of strong ground motions spectra for earthquakeresistant design and construction. VIII International scientific conference of students, graduate students and young scientists "Geography, geoecology, geology: the experience of scientific research in the context of international cooperation and integration". Section "Actual issues of fundamental and applied geological research". Ukraine, Dnepropetrovsk. 2011. pp. 60-61. (In Russ.)

17. Chernov Yu.K., Chernov A.Yu. Probabilistic models of seismic effects for seismic hazard prognosis for engineering purposes. Geology and geophysics of the South of Russia. 2017. No. 2. pp. 116–128. (In Russ.)

18 Chernov Yu.K., Chernov A.Yu., Chitishvili M.I. Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Part I. Geology and geophysics of the

South of Russia. 2019. Vol. 9. No. 2. pp. 95–108. (In Russ.)

19. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods for assessing seismic impacts (manual). Issues of engineering seismology, Vol. 34. M. Nauka, 1993. pp. 5–94. (In Russ.)

20. Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point and extendedsource crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bull. Earthq. Eng. 2014. Vol. 12(1). pp. 359–387.

21. Atkinson G.M. Ground motion prediction equations for Hawaii from a referenced empirical approach. Bulletin of Seismological Society of America. 2010. Vol. 100. pp. 751–761.

22. Beven K.J., Aspinall W.P., Bates P.D., Borgomeo E., Goda K., Hall J.W., Page T., Phillips J.S., Rougier J.T., Simpson M., Stephenson D.B., Smith P.J., Wagener T., Watson M. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment. Part 1: A review of the issues. Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss. 2015. No. 3. pp. 7333–7377.

23. Bommer J.J., Douglas J., Scherbaum F., Cotton F., Bungum H., Fäh D. On the selection of groundmotion prediction equations for seismic hazard analysis. Seismological Research Letters. 2010. Vol. 81. pp. 783–793.

24. Bommer J.J., Scherbaum F. The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. Earthq. Spectra. 2008. Vol. 24(4). pp. 997–1009.

25. Boore D.M, Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra. 2008. Vol. 24(1). pp. 99–138.

26. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations From Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. U.S. Geological Survey Open-File Report. 1994. pp. 94–127.

27. Bora S.S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West2 Empirical Fourier and Duration Models to Generate Adjustable Response Spectra. Earthquake Spectra. In-Press. 2018.

28. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5%-damped linear elastic response spectra at periods ranging from 0.1 s to 10.0 s. Earthquake Spectra. 2008. Vol. 24(1). pp. 139–171.

29. Campbell K.W., Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993. In: Proceedings, Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. 1994. Vol. III. pp. 283–292.

30. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting groundmotion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. Journal of Seismology. 2006. Vol. 10. pp. 137–156.

31. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. Bulletin of Earthquake Engineering. 2016. DOI: 10.1007/s10518-016-9989-1

32. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. J. Seismol. 2012. No. 16. pp. 451–473. DOI 10.1007/s10950-012-9281-z

33. Douglas J. Consistency of ground-motion prediction from the past four decades. Bull. Earthq. Engineering. DOI: 10.1007/a10518-010-9195-5.2010. Vol. 8(6). pp. 1515–1526.

34. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. Earthquake Spectra. DOI: 33(3):837–856.2017. Vol. 33. No. 3. pp. 837–856.

35. Sadigh, K., J. Egan, and R. Youngs. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. Earthquake Notes. 1986. pp. 57–132.

36. Tatevossian R.E., Albini P., Camassi R., Mokrusyina N.G., Shebalin N.V., Petrossian A.E. Analyzing and improving supporting dataset of the Akhalkalak, Dtkemdtr 31, 1899, earthquake. Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. (D. Giadini, S. Balassanian), Kluver As. Publ. 1997. pp. 383–400.

37. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of The Republic of North Ossetia-Alania. The Open Construction and Building Technology Journal. DOI: 10.2174/1874836801812010309. 2018. No. 12. pp. 309–318.

38. Zhao J.X., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura K., Thio H.K., Somerville P.G., Fukushima Y. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classifications based on predominant period. Bulletin of the Seismological Society of America. DOI: 10.1785/0120050122. 2006. Vol. 96. pp. 898–913.

— ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА =

VДК 504.55.054:622 (470.6) DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481

Оригинальная статья

Геомеханические факторы взаимодействия природных и технических систем в районах освоения недр

В.И. Голик (¹), д.т.н., проф., Х.Х. Кожиев², д.т.н., проф., О.Г. Бурдзиева (¹), к.геогр.н., С.А. Масленников³, к.т.н.

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

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44;

³Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал в г. Шахты) «Донской государственный технический университет», Россия, 346500, Ростовская обл., г. Шахты, пер. Луговой, 21

Статья поступила: 16 июня 2019, доработана: 22 августа 2019, одобрена в печать: 23 августа 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Деятельность горнодобывающей отрасли осуществляется с высокой степенью риска. Проблема управления состоянием массива особо актуальна в условиях горного региона с неработающими выработками, воронками провалов и отвалами пород и хвостов обогащения на террасных участках и в долинах рек. Она особо актуальна в условиях региона Северная Осетия с неработающими выработками, воронками провалов и отвалами пород и хвостов обогащения на террасных участках и в долинах рек. Увеличение глубины горных работ и объемов выемки сырья в сейсмически активных районах усиливают статическое и динамическое воздействие на геомеханические системы. Цель работы – исследование влияния геомеханических факторов с целью их учета при разработке месторождений. Методы исследования. Динамика напряжений в массиве измерялась с помощью тензометрических датчиков. На одном из месторождений была оборудована замерная тензометрическая станция. Полученные эпюры напряжений вокруг выработки служили основанием для оценки поведения массива. Результаты работы. Установлено, что изменение состояния крепи в зависимости от фазы развития очистных работ подчиняется закономерности. Пока рудное тело в пределах блока ведет себя как защемленная в висячем и лежачем боках балка, напряжения распределяются равномерно. После отрезки рудного тела со стороны висячего бока нагрузка на верхний элемент крепи со стороны очистных работ возрастает. Одним из направлений совершенствования технологий является использование феномена заклинивания дискретных пород, что нередко позволяет обеспечить возможность отработки месторождений с получением экологоэкономического эффекта при обеспечении безопасности горных работ. Практическая значимость работы. Эффективность использования породных конструкций складывается из экономии труда и материалов на управление состоянием скальных массивов при подземных работах. Оптимизация влияния напряжений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок уменьшает разубоживание руд породами и снижает опасность травмирования работающих отлаивающимися породами. При подземной разработке скальных сложноструктурных металлических месторождений в зоне взаимодействия горных выработок величина и знак напряжений во времени и пространстве может быть прогнозирована с достаточной для оперативного управления детализацией. Учет геомеханических факторов при отработке таких участков позволяет корректировать параметры разработки с получением экономического эффекта от повышения качества добываемых руд и уменьшения опасности для работающих.

Ключевые слова: руда, разработка, напряжения, деформации, тензометрия, нивелирование, качество, безопасность.

Для цитирования: Голик, В. И., Кожиев Х. Х., Бурдзиева О. Г., Масленников С. А. Геомеханические факторы взаимодействия природных и технических систем в районах освоения недр. *Геология и Геофизика* Юга России. 2019. 9 (3): 179-188. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481.
= GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS =

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481

Original paper

Interaction of Natural and Technical Systems in the Subsoil Development Areas

V. I. Golik 🕑, Kh. Kh. Kozhiev², O. G. Burdzieva 🝺, S. A. Maslennikov³

 ¹Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russia, e-mail: v.i.golik@mail.ru;
²North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44 Nikolaev Str., Vladikavkaz 362201, Russian Federation;
³Institute of Service and Entrepreneurship, Don State Technical University, 21 per. Lugovoi, Shakhty 346500, Rostov-on-Don, Russian Federation

Received 16 June 2019; revised 22 August 2019; accepted 23 August 2019

Abstract: Relevance. Mining activities are carried out with a high degree of risk. The problem of managing the massif state is especially actual under the conditions of a mountain region with non-operated workings, funnels of dips and dumps of rocks and tailings in terraced areas and in river valleys. It is especially relevant under the conditions of the North Ossetia region with non-operated workings, funnel dips and dumps of rocks and tailings in terraced areas and in river valleys. An increase in the depth of mining and the volume of excavation in seismically active areas reinforce the static and dynamic effects on geomechanical systems. Aim. To study the influence of geomechanical factors in order to take them into account during mining. **Methods.** The stress dynamics in the array was measured using tensometric sensors. At one of the fields, a measuring strain gauge station was equipped. The obtained stress diagrams around the mine opening were the basis for assessing the behavior of the array. Results. It was defined that the change in the state of the lining depends on the phase of development of the treatment works. While the ore body within the block behaves like a beam pinched in the hanging and lying sides, the stresses are distributed evenly. After the ore body cutting from the side of the hanging side, the load on the upper support element from the side of the treatment works increases. One of the areas of technology improvement is the use of the phenomenon of self-locking of discrete rocks, which often allows you to provide the opportunity to develop deposits with environmental and economic effects while ensuring the safety of mining. Practical significance. The efficiency of rock structure using consists of saving labor and materials for managing the state of rock masses during underground work. Optimization of the effect of stresses in the zone of interaction between treatment and preparatory workings reduces ore dilution by rocks and reduces the risk of injury for workers working with peeling rocks. In underground mining of rocky complex structural metal deposits in the interaction zone of mine workings, the magnitude and sign of stresses in time and space can be predicted with sufficient detail for operational control. Consideration of geomechanical factors during the mining of such sites allows one to adjust the development parameters to obtain the economic effect of improving the quality of ore mined and reducing the risk to workers.

Keywords: ore, development, stress, strain, strain gauge, leveling, quality, safety.

For citation: Golik V. I., Kozhiev Kh. Kh., Burdzieva O. G., Maslennikov S. A. Interaction of Natural and Technical Systems in the Subsoil Development Areas. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* 2019. 9 (3): 179-188. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481.

Эффективность взаимодействия природных и технических систем на месторождениях руд обеспечивается применением геофизического контроля состояния техногенно изменяемого горного массива и технологии контроля и блокирования технологического цикла при достижении определенного уровня напряженного состояния разрабатываемого массива [Дмитрак и др., 2018; Заалишвили, Дзеранов, 2010; Комащенко и др., 2016; Семенова и др., 2018].

Концепция природоохранности и ресурсосбережения включает в себя управление состоянием массива путем определения уровня напряжений, формируемых совокупностью геостатического давления, природных сейсмотектонических воздействий и техногенной сейсмичности [Molev et al., 2015].

При проектировании технологий подземной разработки рудного месторождения, по мере расширения сети горных выработок, оценка техногенной сейсмичности и напряженно-деформированного состояния массива осуществляются по обоснованным объективным и достоверным критериям, разрабатываемым для конкретных геотехнических условий. Критерии оценки техногенной сейсмичности осуществляются численным моделированием (метод конечных элементов) в виде физико-математической модели системы целиков и очистных камер месторождения.

Метод рассматривает континуум как совокупность дискретных элементов, границы которых определяются узловыми точками, что позволяет описывать реакцию континуума на внешнее воздействие движением узловых точек.

Исследования, направленные на изучение закономерностей развития негативных последствий под воздействием факторов техносферы на окружающую среду, имеют не только научное, но и практическое значение.

Проблема особо актуальна в условиях региона Северная Осетия, где добыча цветных металлов имеет более 200 летнюю историю, с неработающими выработками, воронками провалов и отвалами пород и хвостов обогащения на террасных участках и в долинах рек [Заалишвили и др., 2013; Семенова и др., 2018; Najafi et al., 2014].

Деятельность горнодобывающей отрасли осуществляется с высокой степенью риска из-за сложности геологической обстановки, как в плане структурно-тектонической раздробленности, так и в многообразии негативно воздействующих факторов на устойчивость массива горных пород.

При разработке рабочей документации параметры управления массивом завышают в сторону увеличения безопасности, что увеличивает потери в целиках и разубоживает руды вмещающими породами. Как правило, расчеты не учитывают вероятности влияния на массив динамических напряжений техногенного характера.

Извлечение руды из недр происходит в условиях недостаточной изученности напряженно-деформированного состояния массива, подверженного наложенному воздействию природных (тектоника, гравитация, магматизм, сейсмичность) и техногенных (горные выработки, технологические взрывы, вибрации) полей напряжений.

Напряженно-деформированное состояние массива горных пород проявляется не только в форме механических разгрузок, но и в изменении параметров среды, мониторинг которых позволяет дифференцировать элементы массива по степени концентрации напряжений.

При проектировании состояние разрабатываемых массивов принимается статическим, а влияние динамических, в том числе, сейсмических процессов несущественным или не прогнозируемым. Увеличение глубины проведения горных работ и наращивание объемов выемки сырья в сейсмически активных районах усиливают статическое и динамическое воздействие на геомеханические системы, что обуславливает необходимость учета сейсмической составляющей, в том числе техногенного характера.

Сейсмичность обусловлена суммарным действием геодинамической активности территории и физико-механическими характеристиками среды. Она зависит от условий формирования массивов и процессов дезинтеграции.

При разработке сложноструктурных месторождений рудные залежи увязаны с мелки-

ми разломами и крупными макротрещинами, создающими зоны трещиноватости и рассланцевания пород.

В геологическом строении скальных месторождений принимают участие осадочные и магматические породы. Ведущая роль в структуре и рудоносности месторождения принадлежит разломам и трещинам.

Трещиноватость пород составляет до 10 трещин на 1 метр, а вблизи тектонических разломов увеличивается до 50 и – редко – более трещин на 1 метр. Характер распределения трещиноватости в лежачем и висячем боках зон примерно одинаков.

Главным фактором устойчивости массива является влияние трещиноватости (рис. 1).



Рис. 1. Характер обрушения пород: 1 – разлом; 2 – трещины отрыва; 3 – послойные срывы; 4 – вывалы по трещинам отрыва послойных зон; 5 – вывалы по послойным трещинам; 6 – вывалы по трещинам скола зоны разлома. /

Fig. 1. The nature of the rocks collapse: 1 – fault; 2 – separation cracks; 3 – layered breakdowns; 4 – dumps along the separation cracks of layered zones; 5 – dumps along layered cracks; 6 – dumps along the cleavage cracks of the fault zone.

Наиболее интенсивно трещиноватость проявляется в оперяющих нарушениях и вблизи их (рис. 2).



Puc. 2. Характер распределения трещин в выработке. / Fig. 2. The nature of the distribution of cracks in the excavation.

В непосредственной близости к разлому в породах отмечается зона повышенной трещиноватости и рассланцевания. Породы здесь разбиты на плитки толщиной 1-30 мм. Коэффициент структурного ослабления снижается.

В массиве скальных месторождений выделяются инженерно-геологические районы,

различающиеся нарушенностью, ослабленностью, прочностью и устойчивостью пород. Внутри районов выделяются инженерно-геологические элементы, характеризующиеся сходностью свойств и состояния пород и руд [Стась и др., 2017; Golik et al., 2015а].

9 (3) 2019

Одним из основных способов исследования динамики нагрузки на крепь выработок являются измерения с помощью тензометрических датчиков [Анохин и др., 2014; Дмитрак и др., 2006; Goodarzi, Oraee-Mirzamani, 2011].

На одном из месторождений-аналогов Садонских месторождений в выработке № 1 на жесткой металлической крепи участка длиной 13 м было установлено 27 металлических рам с интервалом 0,5 м друг от друга. Замерная тензометрическая станция была размещена на 5 металлических рамах. На каждой раме было оборудовано 9 замерных точек, в каждой из которых располагались три датчика, наклеенные на три плоскости спецпрофиля.

По измеренным напряжениям $\xi_{0}, \xi_{fl}, \xi_{f2}$ определяли главные деформации:

$$\xi_{1,2} = \frac{\xi_{f_2} + \xi_{f_1}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\xi_{f_2} - \xi_{f_1})^2 + (\xi_0 - \xi_{f_1})},$$

и угол ј между направлениям
и $\xi_{,0}$ и $\xi_{,1}$

$$tg\phi_{0} = \frac{\xi_{f_{1}} - \xi_{f_{2}}}{2\xi_{0} - \xi_{f_{1}} - \xi_{f_{2}}} \cdot tg\phi_{l'}$$

Главные напряжения в исследуемой точке на основании закона Гука:

$$\sigma_{1} = \frac{E}{1 - \mu^{2}} (\xi_{1} + \mu \xi_{2}),$$

$$\sigma_{2} = \frac{E}{1 - \mu^{2}} (\xi_{2} + \mu \xi_{1}),$$

где Е – модуль упругости;

µ – коэффициент Пуассона.

Нормальные напряжения σ_z – вертикальное и σ_x – горизонтальное:

$$\sigma_{\rm z} = \sigma_1 \sin \alpha - \sigma_2 \sin \alpha$$

$$\sigma_{\rm x} = \sigma_1 \sin a - \sigma_2 \sin a$$

Эпюры напряжений вокруг выработки служили основанием для оценки поведения массива под влиянием горных работ (рис. 3).

В районе очистных блоков были пробурены скважины, в которых частотными датчиками по изменению частоты генерируемых импульсов определяли величину напряжений. Кроме того, в скважинах устанавливали датчики смещения стенок скважин, показания которых регистрировали тензометрической аппаратурой.

Усиление влияния очистных работ на состояние крепи зафиксировано с приближением фронта работ на расстояние 15-18 м. Напряжения в крепи возрастали по мере приближения очистных забоев сначала медленно, а на расстоянии 20 м от висячего бока к лежачему – интенсивно.

Изменение состояния крепи в зависимости от фазы развития очистных работ подчиняется закономерности. Пока рудное тело в пределах блока ведет себя как защемленная в висячем и лежачем боках балка, напряжения распределяются равномерно. После отрезки рудного тела со стороны висячего бока нагрузка на верхний элемент крепи со стороны очистных работ возрастает (табл. 1, 2).

Установлено, что при прочих равных условиях рудные целики испытывают большие деформации, чем породный массив (рис. 4).

В процессе очистной выемки на площади длиной L и шириной l действует нагрузка Q, вызванная массой вышележащих пород (у H):



Рис. 3. Эпюры напряжений σ_z : 4-24 — тензометрические датчики; 1-5 — замеры. / Fig. 3. Plots of stresses σ_z : 4-24 — strain gauges; 1-5 — measurements.

Таблица 1. / Table 1.

J			8 11	
Замеры / Measurements	Напряжения, МПа / Voltage, MPa Номера датчиков / Sensor Numbers			
	24	44	11	
1	-	-	-	
2	2,3	0,12	0,04	
3	9,7	2,35	0,85	
4	7,65	5,1	2,65	
5		6,35	3,6	
6		-	3,7	

Динамика напряжений в крепи. / The dynamics of stresses in the mine working support.

$Q = Ll\gamma I$

В рассматриваемых условиях ү Н = 98 МПа. Нагрузка определяется из выражения:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

где Q₁ – нагрузка от массы вышележащих обрушенных пород; Q₂ – нагрузка в зоне концентрации напряжений.



Puc. 4. Напряжения в стенках скважин: 3, 4, 7, 10 – номера датчиков, 1-6 – наблюдения. / Fig. 4. Stresses in the walls of the wells: 3, 4, 7, 10 – sensor numbers, 1-6 – observations.

Рост нагрузки в зоне концентрации напряжений составляет 15-20% от гравитационной составляющей, или 39 МПа, что менее предела прочности пород на сжатие – 54-75 МПа.

Наблюдения за состоянием породного массива указывают на существенное увеличение деформаций и напряжений после истечения трех месяцев сопряжения выработок. Отмечено также, что напряжения в породном массиве возрастают медленнее, чем в руде.

Обрушение пород в пределах зоны сопряжения может быть предотвращено креплением выработок, параметры которого определятся взаимодействием заклинившихся структурных породных блоков:

- при достаточной силе распора может быть применена облегченная крепь;

 при недостаточной силе распора крепление выработки рассчитывают из условия поддержания столба пород высотой до дневной поверхности или высоты свода естественного равновесия пород.

Регулирование напряжений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок уменьшает разубоживание руд породами и снижает опасность травмирования работающих отслаивающимися породами.

Одним из основных направлений совершенствования технологий погашения напряжений является использование феномена заклинивания дискретных пород с реализацией их остаточной прочности. В ряде случаев использование свойств пород позволяет обеспечить возможность отработки месторождений с получением эколого-экономического эффекта при обеспечении безопасности горных работ. Оптимизация процессов погашения является целью многих исследований, в том числе и настоящего [Козырев и др., 2014; Протосеня, Куранов, 2015; Яковлев и др., 2016].

Концепция способа погашения напряжений выработанного пространства исходит из того, что обнаженные горными работами породы с течением времени обрушаются или до свода, образованного заклинившимися структурными блоками, или до определяемой коэффициентом обрушения пород высоты.

9 (3) 2019

Эффективность использования породных конструкций складывается из экономии труда и материалов на управление состоянием скальных массивов при подземных работах. Оптимизация влияния напряжений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок уменьшает разубоживание руд породами и снижает опасность травмирования работающих отслаивающимися породами [Грязев и др., 2016; Каплунов, 2014; Рыльникова, 2016; Golik et al., 2015b].

Заключение

При подземной разработке скальных сложноструктурных металлических месторождений в зоне взаимодействия горных выработок величина и знак напряжений во времени и пространстве могут быть прогнозирована с достаточной для оперативного управления детализацией.

Учет геомеханических факторов при отработке таких участков позволяет корректировать параметры разработки с получением экономического эффекта от повышения качества добываемых руд и уменьшения опасности для работающих.

Литература

1. Анохин А.Г., Семенько К.А., Дарбинян Т.П., Цирель С.В., Мулёв С.Н. Методология учета степени влияния нарушенности рудопородного массива на сейсмический риск. // Горный журнал. – 2014. – № 4. – С. 19-24.

2. Грязев М. В., Качурин Н. М., Захаров Е. И. Тульский государственный университет: 85 лет на службе отечеству. // Горный журнал. – 2016. – № 2. – С. 25-29.

3. Дмитрак Ю. В., Голик В. И., Вернигор В. В. Геомеханические предпосылки сохранения устойчивости выработок при разработке водообильных месторождений. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 218-229.

4. Дмитрак Ю.В., Логачева В.М., Подколзин А.А. Геофизическое прогнозирование нарушенности и обводненности массива горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 11. – С. 35-36.

5. Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Информационный мониторинг распределённых физических полей в пределах урбанизированной территории. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 4. – С. 8-16.

6. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В. Вероятностная карта сейсмической опасности, в том числе сейсмического микрорайонирования с учетом нелинейных свойств. // Наука и высшая школа Чеченской Республики: перспективы развития межрегионального и международного научно-технического сотрудничества Межрегиональный Пагуошский симпозиум, тезисы докладов. – 2010. – С. 277-279.

7. Каплунов Д.Р. Условия устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса России. / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 10. – С. 3-11.

8. Козырев А.А., Федотова Ю.В., Журавлева О.Г. Вероятностный прогноз сейсмоопасных зон в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива. // Вестник МГТУ. – 2014. – Том 17. № 2. – С. 225-230.

9. Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – №2. – С. 101-114.

10. Протосеня А.Г., Куранов А.Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения. // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 67-71.

11. Рыльникова М.В. Методологические аспекты проектирования системы управления минерально-сырьевыми потоками в полном цикле комплексного освоения рудных месторождений. / Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. // Рациональное освоение недр. – 2016. – № 3. – С. 36-41.

12. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование отработки

запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 65-73.

13. Стась Г.В., Качурин Н.М., Корчагина Т.В., Змеев М.В. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. Вып. 1. – Тула: ТулГУ, 2017. – С. 170-182.

14. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах. // ФТПРПИ. – 2016. – № 2. – С. 34-47.

15. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015a. – No. 4. – Pp. 321-324.

16. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015b. – T. 7. No. 4. – Pp. 325-329.

17. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. // 30th International Conference on Ground Control in Mining. – 2011. – Pp. 74-79.

18. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2013. – No. 60. – Pp. 345-352.

19. Molev M. D., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 10. No. 16. – Pp. 6787-6792.

20. Najafi A. B., Saeedi G. R., Farsangi M. A. E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2014. – Vol. 70. – Pp. 115-122.

References

1. Anokhin A.G., Semen'ko K.A., Darbinyan T.P., Tsirel' S.V., Mulev S.N. Methodology for taking into account the degree of disturbance influence of the ore-rock massif on seismic risk. "Gornyi Zhurnal". 2014. No. 4. pp. 19-24. (In Russ.)

2. Gryazev M.V., Kachurin N.M., Zakharov E.I. Tula State University: 85 years in the service of the fatherland. "Gornyi Zhurnal". 2016. No. 2. pp. 25–29. (In Russ.)

3. Dmitrak Yu.V., Golik V.I., Vernigor V.V. Geomechanical prerequisites for maintaining the stability of mine workings during the development of watered deposits. Bulletin of Tula State University. Earth sciences. 2018. No. 1. pp. 218–229. (In Russ.)

4. Dmitrak Yu.V., Logacheva V.M., Podkolzin A.A. Geophysical prediction of disturbance and watering of the rock mass. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2006. No. 11. pp. 35-36. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Burdzieva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Information monitoring of distributed physical fields within an urbanized area. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2013. No. 4. pp. 8–16. (In Russ.)

6. Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V. Probabilistic map of seismic hazard, including seismic microzonation taking into account nonlinear properties. Science and Higher School of the Chechen Republic: prospects for the development of interregional and international scientific and technical cooperation Interregional Pugwash Symposium, proceedings of abstracts. 2010. pp. 277–279. (In Russ.)

7. Kaplunov D.R. Conditions for sustainable development of the mineral resource complex of Russia. Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2014. No. 10. pp. 3–11. (In Russ.)

8. Kozyrev A.A., Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G. The probabilistic forecast of seismic hazard zones in the conditions of shock-hazardous deposits of the Khibiny massif. Bulletin of MSTU. 2014. Vol. 17. No. 2. pp. 225–230. (In Russ.)

9. Komashchenko V.I., Vasil'ev P.V., Maslennikov S.A. The reliable raw material base for KMA underground mining technologies. Bulletin of Tula State University. Earth sciences. 2016. No. 2. pp. 101–114. (In Russ.)

10. Protosenya A.G., Kuranov A.D. The prognosis methodology for the stress-strain state of a rock

mass during combined development of the Koashvinskoye field. "Gornyi Zhurnal". 2015. No. 1. pp. 67–71. (In Russ.)

11. Ryl'nikova M.V. Methodological aspects of designing a control system for mineral and raw material flows in the full cycle of integrated development of ore deposits. Rational development of the subsoil. 2016. No. 3. pp. 36–41. (In Russ.)

12. Semenova I.E., Avetisyan I.M., Zemtsovskii A.V. Geomechanical substantiation of the development of reserves of a deep horizon in difficult mining, geological and geodynamic conditions. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2018. No. 12. pp. 65–73. (In Russ.)

13. Stas' G.V., Kachurin N.M., Korchagina T.V., Zmeev M.V. Geomechanical and aerodynamic consequences of undermining the territories of mining allotments in the mines of East Donbass. Izv. TulSU. Earth sciences. Vol. 1. Tula: TulSU, 2017. pp. 170–182. (In Russ.)

14. Yakovlev D.V., Tsirel' S.V., Mulev S.N. Patterns of development and methodology for the rapid assessment of technogenic seismic activity in mining enterprises and in mining regions. FTPPRI. 2016. No. 2. pp. 34–47. (In Russ.)

15. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 4. pp. 321–324.

16. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7. No. 4. pp. 325–329.

17. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. 30th International Conference on Ground Control in Mining. 2011. pp. 74–79.

18. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013. No. 60. pp. 345–352.

19. Molev M.D., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10. No. 16. pp. 6787–6792.

20. Najafi A.B., Saeedi G.R., Farsangi M.A.E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. Vol. 70. pp. 115–122.

ЮБИЛЕИ =

Юбилей Владислава Борисовича Заалишвили



23 сентября 2019 года исполняется 70 лет со дня рождения известного российского ученого, директора и зав. отделом геофизики, инженерной сейсмологии и геоинформатики Геофизического института – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (ГФИ ВНЦ РАН), зав. кафедрой геофизики и геоинформатики Северо-Осетинского государственного университета имени К.Л. Хетагурова (СОГУ), профессора Грозненского государственного нефтяного технологического университета имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ), доктора физико-математических наук, профессора В.Б. Заалишвили.

Заалишвили В.Б. работает в области геофи-

зики, геологии, геоэкологии и горного дела. Он создал новое научное направление «оценка сейсмической опасности территории на основе учета нелинейных свойств горных пород мощными невзрывными источниками», им впервые введены простые и эффективные показатели движения в виде площадей нормализованного и реального спектров колебаний, определяющие поглощение и нелинейность среды, универсальность которых обусловила их широкое использование на практике, он ввел понятия «средневзвешенного периода колебаний» и коэффициента «рельефности», разработал ряд современных технологий оценки сейсмической опасности горных пород, не имеющих аналогов в мире, предложил новый инструментально-расчетный метод сейсмического микрорайонирования, разработал методологию трансформации состояния горной породы в условиях интенсивных изменяющихся нагрузок, создал уникальную систему инструментального мониторинга Казбекского вулканического центра, разработал универсальную систему мониторинга природно-техногенных опасностей и методологию оценки их риска. Заалишвили В.Б. один из основоположников современной Грузинской школы инженерной сейсмологии и Южного Кавказа, активно развивает научную школу инженерной сейсмологии в Северной Осетии, на Северном Кавказе и, в целом, на Кавказе.

Заалишвили Владислав Борисович родился 23 сентября 1949 года в Грузии, в г. Тбилиси. В 1969 г. окончил музыкальное училище по классу скрипки и получил квалификацию «артист оркестра». В 1972 г. окончил физический факультет Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили по специальности «радиофизика» и получил квалификацию физика.

В 1964 начал трудовую деятельность рабочим. В 1966-1968 гг. работал в Институте физической и органической химии АН ГССР, физиком-механиком. С 1968 по 1969 год работал в Тбилисском конструкторском бюро, техником. В 1969-1991 гг. работал в Институте строительной механики и сейсмостойкости АН ГССР (ИСМИС) им. К.С. Завриева, ст.

техником, инженером, ст. инженером, мнс, научным сотрудником. В 1973-1974 гг. служил в рядах Советской армии. В 1975, будучи секретарем комсомольской организации, был направлен, и в 1977 г. окончил, получив высшее экономическое образование, университет при ГК г. Тбилиси КП ГССР. В 1976-1980 гг. учился в аспирантуре ИСМИС АН ГССР по двум специальностям: «Испытание сооружений» и «Механика грунтов».

Под руководством академика АН ГССР Ш. Г. Напетваридзе подготовил в ИСМИС и в 1986 г. в Институте геофизики АН Грузии им. М. В. Нодия защитил диссертацию «Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 04.00.22 «Физика твердой Земли».

С 1991 по 1994 гг. обучался в очной докторантуре Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (научный консультант член-корр. РАН, А.В. Николаев). В 1991-1994 работал ассистентом кафедры «Геоинформатика» в Московском геологоразведочном институте им. Серго Орджоникидзе. В 1994-1996 гг. работал в Институте сейсмологических и геофизических исследований, зав. лабораторией инженерной сейсмологии.

В 1996 г. в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова на физическом факультете защитил диссертацию «Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 04.00.22 «Физика твердой Земли».

В 1996-2005 гг. он продолжил работу в Институте Строительной Механики и Сейсмостойкости им. К.С. Завриева АН Грузии нс, снс (1997), внс (1998), зав. лабораторией инженерной сейсмологии (1999).

В 1997 г. Заалишвили В.Б. создал и возглавлял по 2005 г. общественную организацию «Центр прикладной геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмической защиты сооружений» в Грузии (AGESAS), в составе которой объединил молодых грузинских ученых. Именно от имени указанной организации при его бессменном руководстве в период 1998-2000 гг. вместе с коллегами им был получен ряд серьезных международных грантов: ИНТАС (ЕЭС), ЕВРАЗИЯ, ТАСИС, НАТО. В проектах ИНТАС и НАТО активное участие принимали российские ученые под руководством профессора А. Д. Гвишиани, а также ученые из Испании, Франции, Великобритании. Проекты «ЕВРАЗИЯ» и «ТАСИС» курировались учеными США и Италии/Греции, соответственно.

В 2000 г. он организовал Северо-Кавказское отделение (на правах филиала) Института Физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, директором которого являлся до 2007 г.

В 2002 г. Заалишвили В.Б. организовал Национальный комитет Грузии по сейсмостойкому строительству и инженерной сейсмологии и при поддержке российских коллег ввел в Европейскую ассоциацию по сейсмостойкому строительству (EACC). Был его первым вице-президентом в 2002-2008 гг. и в 2006 г. в этом качестве принял активное участие в работе EACC в Женеве.

В 2003-2015 гг. работал директором ФГБУН Геофизического института Владикавказского научного центра РАН. С июня 2015 г. был научным руководителем, а с 26 марта 2016 г. является директором Геофизического института – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (ГФИ ВНЦ РАН).

В 2016-2018 гг. работал главным научным сотрудником в Комплексном научно-исследовательском институте (КНИИ РАН) им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук.

В 2003-2015 гг. работал профессором Северо-Кавказского Горно-Металлургического института (Государственный технический университет) (СКГМИ (ГТУ)). В 2006 году создал и возглавил базовую кафедру прикладной геофизики на базе СКГМИ (ГТУ). В сентябре – ноябре 2015 г. был и. о. зав кафедрой прикладной геологии СКГМИ (ГТУ).

С 2004 г. является профессором на кафедре строительных конструкций Грозненского государственного нефтяного технологического университета имени академика М.Д. Миллионщикова.

В 2005 г. в Институте геофизики им. М.В. Нодия АН Грузии с целью нострификации успешно защитил диссертацию «Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 04.00.22 «Физика твердой Земли» и получил Европейский диплом доктора физико-математических наук (The degree of a doctor of sciences Physics and Mathematics: 04.00.22.).

В 2007 г. по представлению Ученого Совета Грозненского государственного нефтяного технологического университета имени академика М.Д. Миллионщикова ВАК присвоено ученое звание профессора по кафедре строительных конструкций.

Заалишвили В.Б. с 1969 г. по настоящее время принимал активное участие в 256 научно-исследовательских работах.

Он руководил и принимал участие в работах по сейсмическому микрорайонированию территорий (СМР): ряда городов Грузии и России (Владикавказ, Сочи, Тбилиси, Гагра, Сухуми, Батуми, Кутаиси, Рустави, Боржоми, Гали, Гори и т. д.), грузинских АЭС, ТЭЦ, ГРЭС, водохранилищ (Цителцкаро, Лакбе, Ингури и т. д.), промышленных центров (Маднеули и т. д.) и больших строительных площадок в Азербайджане, Грузии, России (Ленкорань, Негром, Сочи и т. д.).

Заалишвили В.Б. участвовал в динамических испытаниях зданий и сооружений (гг. Сочи, Пицунда, Карачаевск, Тбилиси, Кутаиси и т.д.), моделей устоев моста для БАМ на большой виброплатформе в ИСМиС им. К.С. Завриева АН ГССР, исследовал влияние различных источников (землетрясения, взрывы, сильные ветровые и искусственные вибрации и т.д.) на устойчивость культовых сооружений (древний монастырь IV века Давид Гареджи на юге Грузии (1990), монастырь «Гелати» и церковь «Моцамета» вблизи г. Кутаиси (1970), Метехская церковь (1981), главная Грузинская синагога (1994), Мечеть в г. Тбилиси (1991), домовая церковь св. Нино в г. Владикавказе (2007)), отдельных транспортных систем (а/м туннель в Гагра (1985)), объектов городской застройки (гг. Владикавказ, Тбилиси, Кутаиси, Цхалтубо и др.), уникальных природных и искусственных сооружений (пещерный комплекс Сатаплия вблизи г. Цхалтубо (1983), телевышка (1984) и фуникулер на горе Мтац-минда (1985) в г. Тбилиси и др.), последствий военных действий на городскую застрой-



Конференция, посвященная 10 летию схода ледника Колка, Владикавказ, 2012 г.

ку (Тбилиси, 1994; Грозный, 2006), изучал влияние импульсных ударников при забивке свай на устойчивость окружающих жилых зданий (г. Тбилиси, 1992), принимал участие в СМР трассы Транскавказской ж/д магистрали (1982), руководил работами по СМР территорий Ново-Воронежской АЭС (1997), Чири – Юртской ГЭС (2012) в Чечне, площадок завода «Электроцинк» (2011), ряда строительных площадок города (2003-2019), в том числе, здания Туббольницы (2017), храма Александра Невского в г. Владикавказе (2018) и т.д.

Он руководил созданием системы инструментального мониторинга за опасными природно-техногенными процессами «Кармадонский параметрический полигон» (2003) и первой на Северном Кавказе сети сейсмических наблюдений на урбанизированной территории «Владикавказ» (2004). В 2003 г. была открыта Кармадонская станция в с. Кани на высоте 1920 м (над у. м.), и в 2012 г. – сейсмическая станция на высоте 2970 м (над у. м.) в районе ледника Колка, успешно записавшие в составе сети Кармадонского параметрического полигона, сход селя в районе ледника Девдорак 17 мая 2014 года. В 2015 г. под его руководством организован Владикавказский прогнозный полигон, включающий высокоточную геодезическую систему GPS-наблюдений. В 2016 г. под его руководством создана система уникального инструментального мониторинга в районе Казбекского вулканического центра. Под его руководством в 2017 г. с участием уральских геофизиков начат инструментальный радоновый мониторинг прогноза сильных землетрясений.

В декабре 1988 г. после Спитакского землетрясения (Армения, 1988 г.) принимал участие в макросейсмическом обследовании территорий гг. Ленинакана и Калинина, после Рачинского землетрясения (Грузия, 1991 г.) руководил обследованием застройки в гг. Амбролаури и Они. В 2002 г. Заалишвили В.Б. руководил группой ученых и специалистов по инженерному макросейсмическому обследованию последствий Тбилисского землетрясения 2002 г. в центральной части г. Тбилиси. В 2004 г. на основе анализа инструментальных данных впервые установил и обосновал основные этапы процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 года в РСО-Алания. В 2005 г. разработал новый расчетно-инструментальный метод СМР. В 2010-2013 гг. руководил созданием первых вероятностных карт СМР территорий гг. Владикавказ, Беслан, Ардон, Алагир, Дигора, Моздок, с. Чикола, являющихся непосредственной основой сейсмостойкого проектирования и строительства.

В 2009 г. в издательстве «Наука» вышла книга Заалишвили В.Б. «Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площа-



С иностранными коллегами. Владикавказ, Геофизический институт, 2019 г.

док». В 2014 г. он был одним из редакторов объемной монографии «Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра» (ред. Леонов Ю. Г., Заалишвили В.Б.).

Заалишвили В.Б. был научным руководителем проекта ИНТАС (INTAS 97-0870 Project "Seismic hazard Assessment for Big Cities in Georgia Using the Modern Concept of Seismic Microzonation with Consideration of Soil Non-linearity"), 1999-2001; директором проекта ТАСИС (Project under the aegis of TACIS: Assessment of Seismic Hazard of the Poti Port Breakwater Site Location), TACIS SERVICE CONTRACT No 98-0441; Project No. TNGE 9801 (2000); директором проекта Программы EBPA3ИЯ (Eurasia project (G98-0212) «Development of insurance policy in earthquake engineering taking into account economic development of Georgia», 1999-2002; содиректором от России проекта Программы HATO (NATO "Science for Peace" Program Project "Seismic Risk of Large Cities of Caucasus: Tools for Risk Management (NATO SfP 974320)), 1999-2005; руководителем российской стороны международного Проекта Программы BSEC (BSEC Project "Develop and Prepare an Experimental Sample of Data Logger Radon Measuring Device Set with Data Collection Central Controller") (2014-2017).

В рамках Программы долгосрочного экономического сотрудничества Российской Федерации и Республики Армения на 2014-2020 гг. Заалишвили В.Б. является руководителем от России проектов «Разработка модели динамического регионального показателя инженерно-сейсмологических условий территории на основе анализа инструментальных записей сильных и разрушительных землетрясений» и «Разработка комбинированной системы велосиметров/акселерометров для наблюдений за опасными природно-техногенными геологическими процессами».

Под руководством Заалишвили В.Б. ученые ГФИ ВНЦ РАН победили в конкурсе по выполнению научно-исследовательской работы для государственных нужд в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Разработка новых методов и способов оценки сейсмической опасности грунтов при сильных сейсмических воздействиях» («Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области геофизики»).

Заалишвили В.Б. руководитель первого на территории РСО-Алания проекта Российского научного Фонда (РНФ) «Природные опасности и мониторинг горных территорий в России и Индии» ("Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India" within the Program "Basic research and applied research conducted by international research teams" Russian (in cooperation with DST, India)), 2019-2021.

Он руководил или принимал активное участие в макросейсмическим обследовании сильных и разрушительных землетрясений: Карталинское (Грузия, 1920), Дагестанское (Россия, 1970), Черногорское (Россия, 1976), Дманисское (Грузия, 1978), Гавазское (Грузия, 1982), Спитакское (Армения, 1988), Рачинское (Грузия, 1991), Барисахское (Грузия, 1992), Гоубанское (Грузия, 2000), Тбилисское (Грузия, 2002) и т. д.

Заалишвили В.Б. один из создателей сети инженерно-сейсмометрических станций в зданиях и на уникальных сооружениях в ГССР (1969-1981 гг.). Получил целый ряд записей сильнейших землетрясений на Кавказе (Дагестанское, 1970 г.; Дманисское 1978 г., Спитакское, 1988 г.; Рачинское, 1991 г.). Впервые на Кавказе в 1978 г. получил инструментальную запись ускорения на скальных породах (8-балльное Дманисское землетрясение).

Под его руководством 25 апреля 2002 г. сотрудниками лаборатории инженерной сейсмологии ИСМиС им. К.С. Завриева АН Грузии был успешно реализован среднесрочный прогноз сильного Тбилисского землетрясения.

Заалишвили В.Б. отличился при испытании в 1979 г. крупномасштабной модели мостового сооружения для Байкало-Амурской магистрали (БАМ) на большой вибрационной платформе (единственной на Кавказе и одной из трех в б. СССР) и получил благодарность с записью в трудовой книжке от одного из создателей динамической теории сейсмостойкости (вместе с Мононобе, 1929 г.) и основателей Академии наук ГССР, директора ИСМиС, академика К.С. Завриева.

В 1982 г. в процессе проектирования Транскавказской ж/д магистрали (ударной комсомольской стройки СССР) Тбилиси-Орджоникидзе (Владикавказ) руководил конной экспедицией, которая прошла в горных районах Грузии, Северной Осетии, Чечни и Ингушетии. В 1983 г. он был ответственным исполнителем карты сейсмической опасности территории трассы Тбилиси-Орджоникидзе (Владикавказ).

В 2000 г. делал экспертизу Проекту Британской корпорации трассы строительства газопровода Баку – Тбилиси, в 2007 г. принимал участие в организации экстренных работ по оценке грунтовых условий Проекта прокладки газопровода в Южную Осетию.

В 2003-2004 гг. с участием профессора И.В. Бондырева (Грузия) руководил макросейсмическим обследованием района схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. в Северной Осетии.

В 2003 г. проект Заалишвили В.Б., представленный от руководимого им Северо-Кавказского Отделения Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, занял I место во Всероссийском конкурсе Госстроя РФ.

В 2010 г. созданный Заалишвили В.Б. научно-образовательный центр «Геоинжиниринг» на базе СКГМИ (ГТУ) и ГФИ ВНЦ РАН победил в 5 конкурсах ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

В 2010, 2016, 2018 гг. молодые ученые Института Дзеранов Б. В., Мельков Д. А., Кануков А. С., Дзебоев Б. А., Габараев А. С., Бурдзиева О. Г., Майсурадзе М. В. за исследовательские работы, выполненные под руководством Заалишвили В. Б., получали «Премию Главы Республики Северная Осетия-Алания в области науки и техники для учащихся общеобразовательных школ, молодых ученых и специалистов».

Аспирант Заалишвили В.Б. Наталья Громова в 2005 г. заняла II место на конкурсе научных работ молодых ученых российских вузов по геологии, его аспирант А.К. Харебов и докторант к. ф.-м. н. Ж.Д. Туаева, дважды в 2006 и 2007 гг. стали победителями в номинации «Лучший аспирант РАН» и «Кандидаты и доктора наук РАН». Его ученик к. т. н. Д.А. Мельков стал победителем Конкурса грантов Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук на 2014 г.

В 2010-2014 гг. на конкурсах Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД» разработки, выполненные под руководством и участии Заалишвили В.Б., получили 8 золотых и одну серебряную медали, два кубка «За развитие изобретательства в регионе», кубок Бахрейна, а сам Заалишвили В.Б. был награжден орденом «Золотой Архимед» и золотой медалью Н. Тесла «За большой вклад в международное развитие науки и техники». В июне 2010 г. на I международной, специализированной выставке «Инновации для XXII зимних олимпийских игр» разработка ГФИ ВНЦ РАН «Комплексный метод оценки сейсмической опасности», выполненная под руководством В.Б. Заалишвили, «по решению международного жюри» была удостоена золотой медали.

Под его руководством защищена докторская и 12 кандидатских диссертаций, в том числе, 4 кандидатские работы в Грузии. Он председатель ГАК по специальности 130404 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» СКГМИ (ГТУ), председатель ГАК по направлению «Физика» в Северо-Осетинском Государственном Университете им. К. Л. Хетагурова. Был неоднократно оппонентом докторских и кандидатских диссертаций в России, Грузии и Молдавии.

Заалишвили В.Б. – главный редактор, основанного им в 2011 г., журнала «Геология и геофизика Юга России» (перечень ВАК), член редколлегии журналов «Вестник Владикавказского научного центра РАН» (перечень ВАК), «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» (перечень ВАК), Грозненский естественнонаучный бюллетень (перечень ВАК), «Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений», Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН, «Open Construction & Building Technology Journal» (база данных СКОПУС), «Open Conference Proceedings» (база данных СКОПУС), «Geology and Geoscience», «Journal of Georgian Geophysical Society», «Труды молодых ученых».

Заалишвили В. Б неоднократно был председателем/членом оргкомитетов/научных комитетов международных конференций в России и за рубежом, ответственным/научным редактором 15 сборников конференций и 10 монографий.

Заалишвили В.Б. входит в состав Межведомственного совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Минстрое России. Он зам. руководителя Технического комитета по стандартизации ТК 465 «Строительство».

Заалишвили В.Б. – член Российской ассоциации по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (1992), Американского сейсмологического общества (1999), Грузинского геофизического общества (1993), Рабочей группы комиссии СНГ по сейсмостойкому строительству и уменьшению природно-техногенных воздействий (1999), Российского общества инженеров строительства (2007), Ассоциации специалистов и преподавателей безопасности (2010), член научного совета объединения «Товарищество Сибирских геотехников» (2016), Русского географического общества (2017), Почетный член Национальной ассоциации сейсмостойкого строительства и инженерной сейсмологии Грузии (2002), член Президиума Международной организации «Eurasian SEISMO Association» (2017), член научного совета Евразийского форума по сейсмической безопасности сооружений и городов «SEISMO Euro-Asian Forum» (2017), член Российского национального комитета по сейсмостойкому строительству и сейсмической безопасности (РКССС) (2017), эксперт международной премии «Глобальная энергия» (2014), член Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) (2019).

Заалишвили В.Б. – действительный член Российской академии естественных наук (2007), Европейской академии естественных наук (2007), Академии горных наук (2007), Международной академии наук Экологии и Безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ) – ассоциированного члена ООН (2005). Он вице-президент южного отделения МАНЭБ.

С 2013 года Заалишвили В. Б. входит в федеральный реестр экспертов научно-технической сферы РФ, он эксперт подкомитета 7 «Сейсмобезопасность в строительстве» (2013), эксперт РАН (2019). Он является специалистом-экспертом Комиссии по сейсмостойкому строительству и уменьшению природно-техногенных последствий Межправительственного совета по сотрудничеству в строительной деятельности стран СНГ.

Заалишвили В.Б. является автором и соавтором 825 публикаций, в том числе, 22 монографий, 8 учебно-методических пособий, 64 патентов на изобретения, 11 компьютерных Программ, 14 баз данных в области геофизики, геологии, экологии и горного дела. Имеет 33 публикации в изданиях, входящих в международные базы данных Web of Science и 28 – в SCOPUS.

Заалишвили В.Б. – Заслуженный изобретатель РФ (2019), Заслуженный деятель науки РСО-А (2006), Почётный учёный города Рима (2007), Почетный работник науки и техники РФ (2014), Ветеран труда (2010), Почетный академик АН ЧР (2014), Почетный доктор КНИИ РАН (2014).

Он награжден Благодарностью Президента РФ (2014), Медалью «Во славу Осетии» (2017), Почётными грамотами Президиума РАН (2010, 2012), Президиума и Профсоюза РАН (2010, 2014), Почетной грамотой Парламента РСО-А (2014), Юбилейной медалью «100 лет профсоюзам России» (2011), Благодарственным письмом Общественной палаты Чечни (2014), Почетной грамотой международного общественного движения «Штыр Нихаш» (2015), Почетной грамотой Центра обеспечения деятельности по защите населения и территории РСО-А от ЧС (2016), Почетной грамотой Президиума АН ЧР (2016), Иконой св. Нино (2007), а также другими ведомственными и общественными наградами. Заалишвили В.Б. – более 10 лет является заместителем председателя грузинского общества «Единство – эболодь». В этом качестве он неоднократно достойно представлял общество за пределами Республики. Заалишвили В.Б провел большую работу по исследованию технического состояния грузинской церкви святой равноапостольной Нины, просветительницы Грузии, и составлению технического регламента ее восстановления. Здесь по его приглашению побывали ведущие ученые и специалисты в области инженерной строительной науки из Москвы, Грозного, Ариэльского университета (Израиль), Тбилиси. При этом ученые из Тбилиси под руководством Константина Одишвили привезли, подготовленные ими безвозмездно, детальный проект восстановления не только Храма, но и фамильной Осетинской башни в Куртатинском ущелье Северной Осетии. Вместе с другими членами общества: Р.А. Цинделиани (председатель), В.В. Джагмаидзе, Э.О. Карелидзе, Н.М. Бурдули и др., он многое делает для того, чтобы представители грузинской диаспоры жили в заслуженных ими десятками лет самоотверженной работы на благо Северной Осетии и России и трепетном взаимодействии с конгломератом национального окружения, в достойных, комфортных условиях.

Заалишвили В.Б. успешно совмещает высокопрофессиональную практическую деятельность с эффективной организационной и научной работой в области геофизики, геологии, экологии и горного дела, а также в активной защите объектов интеллектуальной собственности, руководит и принимает участие в создании новых методов и способов, решении научных задач, связанных с обеспечением безопасности населения и снижения уязвимости горных территорий к опасностям различной природы, использовании в практике работы современных достижений науки и техники, активно работает над выявлением и становлением молодых ученых. Все это обеспечивает стремительное развитие наук о Земле, в том числе, инженерной сейсмологии в Северной Осетии и, в целом, на Северном Кавказе.

Наконец, хотелось бы сказать несколько слов и о его личной жизни. Он женат. У него четверо детей (двое сыновей и две дочери) и 7 внуков.

В этот день хочу от всей души поздравить юбиляра, моего замечательного ученика, Владислава Борисовича Заалишвили со знаменательным днем в его жизни – 70 летним юбилеем и пожелать ему здоровья, успешности в насущных делах и семейного благополучия!

Пожелаем ему и в дальнейшем жить активной научной, общественной жизнью, и еще многое реализовать из задуманного им на благо людям!

Член-корр. РАН

Furence

А.В. Николаев

13 сентября 2019 г. г. Москва, ПАМЯТЬ



Академик Федотов Сергей Александрович 19.03.1931-20.08.2019

20 августа 2019 года на 89 году жизни скончался известный российский ученый-геофизик, сейсмолог и вулканолог с мировым именем, доктор физико-математических наук, профессор геофизики, академик Сергей Александрович Федотов.

После окончания геологического факультета МГУ в 1953 году Сергей Александрович поступил в аспирантуру ИФЗ АН СССР, и с тех пор его научная деятельность и научные исследования были неразрывно связаны с отечественной геофизикой.

Участие в полевых работах на Курилах определило дальнейшую судьбу С.А. Федотова – вся его жизнь была посвящена изучению вулканизма и сейсмичности Курило-Камчатской дуги. Он прошел большой путь от аспиранта ИФЗ РАН до начальника Тихоокеанской сейсмической партии ИФЗ АН СССР (с 1959 по 1970 гг.), заведующего лабораторией сейсмичности тихоокеанского пояса ИФЗ АН СССР (с 1969 по 1993 гг.), и директора Института Вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН (с 1971 по 2004 гг.). Благодаря выдающимся результатам научных исследований в области сейсмической опасности на территории Камчатского края и изучению механизмов вулканической деятельности Сергей Александрович получил известность в научных кругах, как в России, так и за рубежом. Он избран действительным членом Российской академии наук (1992 г.) и Европейского геофизического союза, Президентом Международной ассоциации и вулканологии и химии недр Земли (МАВХНЗ), являлся членом Президиума ДВО РАН и Бюро ОГГГГН РАН, Председателем Научного совета во вулканологии и сейсмологии, а также долгое время возглавлял

9 (3) 2019



Академик РАН С. А. Федотов и д. ф. – м. н. В. Б. Заалишвили на общем собрании Российской Академии наук, г. Москва, 2012 г.

Совет по прогнозу землетрясений ИВиС ДВО РАН и Камчатского филиала Геофизической службы РАН и ведущую научную школу «Современный вулканизм и сейсмичность».

Исследования сейсмичности Камчатки и Курильских островов позволили ему создать авторский метод долговременного прогноза сейсмической опасности, который сегодня активно используется для оценок сейсмического процесса и конструктивно развивается в работах его последователей и учеников.

С. А. Федотов ввел в сейсмологию представление о сейсмическом цикле. Именно благодаря его твердой научной и гражданской позиции в районе Петропавловска-Камчатского в силу обоснованных им причин не была построена атомная электростанция.

Он автор около 400 печатных научных работ, изобретений и монографий.

Самоотверженный энтузиазм и огромные усилия, которые прилагал Сергей Александрович в вопросах обеспечения сейсмической безопасности населения Камчатского края за счет научного обоснования необходимости неотложных мер по повышению надежности жилых и промышленных объектов этого самого сейсмоопасного региона России, хорошо известны и в научной среде, и доведены до самого высокого уровня руководства страной. Успешное решение этих задач напрямую связано с перспективами экономического развития Камчатки, а также с обеспечением интересов государственной безопасности, учитывая оборонную значимость городов Петропавловска-Камчатского и города Вилючинск.

Заслуги С.А. Федотова перед государством не раз отмечались почетными государственными наградами, среди которых – ордена Почета и Октябрьской революции, Трудового Красного Знамени и «За заслуги перед Отечеством» IV степени.

С. А. Федотов в последние годы активное внимание уделял и Югу России. Здесь вместе со своими учениками и коллегами под его руководством было проведено исследование вулкана Эльбрус. Он живо откликался на наши просьбы о поддержке международных мероприятий на Северном Кавказе (Северная Осетия, Чечня и др.).

С. А. Федотов прожил достойную уважения жизнь. На наш взгляд, самым главным достоинством С. А. Федотова была его необычайно высокая работоспособность, величайший научный кругозор и высочайшая культура Ученого и Человека!

Близкое знакомство с глубокоуважаемым и дорогим сердцу Сергеем Александровичем Федотовым стало значимым событием в нашей жизни. Он был принципиальным и искренним ученым, и поддержка его всегда очень многое значила для нас, молодых, не очень и совсем не молодых ученых.

Память о выдающемся Ученом, Человеке, Коллеге и старшем Друге Сергее Александровиче Федотове сохранится в наших сердцах на всю жизнь!

= ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ =

9 (3) 2019

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

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

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

1. Earth and Planetary Sciences (науки о Земле и планетарные науки);

2. Environmental Science (наука об окружающей среде).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

 статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;

 краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3-5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);

 обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20-25 страниц по заказу редакции.

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

Инструкция для авторов

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

9 (3) 2019

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 A4. 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 перепискии 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 (H₂O) и единицах измерений (MBT/cm²) – прямым

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

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

Адрес редакции:

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

= INFORMATION FOR AUTHORS =

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

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

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal "Geology and Geophysics of Russian South" are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;

2. Environmental Science.

The journal "Geology and Geophysics of Russian South" publishes:

- articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;

- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);

- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor's order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal «Geology and Geophysics of 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 Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),

- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;

- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;

– an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames, academic degrees and titles (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site www. naukagor. ru (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols lim, lg, ln, arg, const, sin, cos, min, max, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H₂O) and measurement units (MW/cm²) 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 v, 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

9 (3) 2019

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main -1 pt, auxiliary -0.5 pt; for the symbols in the picture area - «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation "et al."; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ (№ 3. 2019 г. Том 9)

Главный редактор В.Б. Заалишвили

Подписано в печать 16.10.2019 г. Формат 60×84 1/8. Дата фактического выхода 25.10.2019 г. Усл. печ. лист 23,6. Гарнитура «Times». Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 87. 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