

ISSN 2221-3198  
e-ISSN 2686-7486

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

GEOLOGY  
AND GEOPHYSICS  
OF RUSSIAN SOUTH

Том 10  
№ 2 / 2020



ISSN 2221-3198  
e-ISSN 2686-7486

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

# **ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ**

**GEOLOGY AND  
GEOPHYSICS  
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 10  
№ 2 / 2020**

**Владикавказ 2020**

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

**Главный редактор**

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

**Заместитель главного редактора**

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

**Члены редакционной коллегии**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Ответственный секретарь**

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

**Выпускающий редактор**

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

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

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

**ВНЦ РАН**

Адрес учредителя:  
362027, РСО-Алания, г. Владикавказ,  
ул. Маркуса 22  
Тел.: 8 (8672) 501841  
e-mail: vncran@yandex.ru  
<http://www.vncran.ru>

Издатель:

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

Адрес издателя и редакции:  
362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а  
Тел.: 8 (8672) 764084; факс: 8(8672) 764056  
e-mail: southgeo@mail.ru  
<http://geosouth.ru>

**ISSN 2221-3198**

**e-ISSN 2686-7486**

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНЦ РАН, 2020

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

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

**Editor in Chief**

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

**Deputy Editor in Chief**

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

**Members of Editorial board**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Executive Secretary**

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

**Managing Editor**

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

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

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

Founder:

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

Publisher:

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

**ISSN 2221-3198**

**e-ISSN 2686-7486**

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

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

© Geophysical Institute VSC RAS, 2020

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

- Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Герасимов В. Ю.**  
Эклогиты Большого Кавказа (природа протолита и его геодинамическая типизация)..... 6
- Гиоргобиани Т. В., Закарая Д. П.**  
Складчатая структура южного склона Большого Кавказа в пересечении  
ущелья реки Ксани ..... 22
- Попов Ю. В., Пустовит О. Е., Терещенко В. А.**  
Акцессорные хромшпинелиды серпентинитов тектонического  
меланжа Даховского поднятия (Большой Кавказ) ..... 38

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ

- Джгамадзе А. К., Гогичев Р. Р.**  
Гидрогеохимические особенности Северо-Осетинского артезианского бассейна ..... 56

## ГЕОФИЗИКА

- Аптикаев Ф. Ф.**  
Новые строительные нормы: шаг вперед, два шага назад ..... 71
- Певнев А. К.**  
Чрез тернии – к прогнозу землетрясений ..... 82
- Цзюнь-Ян Хуан, Заалишвили В. Б., Мельков Д. А.,  
Чунь-Сян Куо, Куо-Лян Вэнь, Чунь-Те Чэнь**  
Прогресс исследований за последние годы нелинейных свойств грунтов  
в России и на Тайване ..... 95

## ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

- Хасанов М. А., Эзирбаев Т. Б., Эльжаев А. С.**  
Пространственное распространение пермо-триасовых отложений Восточного  
Предкавказья и их нефтегазоносность ..... 113

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Бекузарова С. А., Тебиева Д. И., Бекмурзов А. Д., Кебалова Л. А., Корбесова К. В.**  
Фиторемедиация токсичности воздуха автомобильных дорог ..... 127

- Голубев И. А., Супрун И. К.**  
Применение технологии магнитно-реагентного осветления  
питьевой воды для интенсификации процессов водоподготовки ..... 136

## ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА

- Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В., Чотчаев Х. О.**  
Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений ..... 147

## ЮБИЛЕИ

- Илья Александрович Богуш ..... 161
- Владимир Иванович Голик ..... 163
- Сергей Григорьевич Парада ..... 167
- Юрий Константинович Чернов ..... 170

## CONTENTS

## GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

- Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Gerasimov V. Yu.**  
Eclogites of the Great Caucasus (nature of protolite and its geodynamical typification)..... 6
- Giorgobiani T. V., Zakaraia D. P.**  
Folding Structure of the South Slope of the Great Caucasus in Crossing  
the Gorge of the River Ksani..... 22
- Popov Yu. V., Pustovit O. E., Tereshchenko V. A.**  
Accessory chrome spinels of serpentinites of tectonic melange of the Dakhov uplift  
(Greater Caucasus) ..... 38

## GIDROGEOLOGY

- Dzhgamadze A. K., Gogichev R. R.**  
Hydrogeochemical features of the North Ossetian artesian basin..... 56

## GEOPHYSICS

- Aptikaev F. F.**  
New Building Codes: one step forward, two steps backward ..... 71
- Pevnev A. K.**  
Through difficulties to the earthquake prediction ..... 82
- Jyun-Yan Huang, Zaalishvili V. B., Melkov D. A.,  
Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen**  
Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan..... 95

## GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS

- Khasanov M. A., Ezirbaev T. B., Eljaev A. S.**  
Spatial distribution of Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia  
and their oil and gas potential..... 113

## GEOECOLOGY

- Bekuzarova S. A., Tebieva D. I., Bekmurzov A. D., Kebalova L. A., Korbesova K. V.**  
Phytoremediation of air toxicity of roads ..... 127
- Golubev I. A., Suprun I. K.**  
The use of magnetic reagent clarification of drinking water to intensify  
water treatment processes ..... 136

## GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS

- Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V., Chotchaev Kh. O.**  
Ground geodynamics control by regulating stress level ..... 147

## JUBILEE

- Ilya Aleksandrovich Bogush ..... 161
- Vladimir Ivanovich Golik ..... 163
- Sergey Grigorjevich Parada..... 167
- Yurij Konstantinovich Chernov..... 170

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI: [10.46698/VNC.2020.24.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.24.33.001)

Оригинальная статья

## Эклогиты Большого Кавказа (природа протолита и его геодинамическая типизация)

В. М. Газеев<sup>1, 2</sup>, А. Г. Гурбанов<sup>1, 2</sup>, В. Ю. Герасимов<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН, Россия, 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 18, кор. 2, e-mail: gera-igem2008@yandex.ru

Статья поступила: 06.03.2020, доработана: 20.04.2020, одобрена в печать: 23.04.2020

**Резюме: Актуальность работы.** В структурно формационной зоне Передового хребта Большого Кавказа, в разрезах пород «балканской» и «лабарданской» свит встречаются тела эклогитов омфацит-гранатового состава с примесью амфибола, эпидота, цоизита и кианита. **Целью работы** являлось изучение петрохимических и геохимических особенностей эклогитов в разрезах пород Большого Кавказа. **Методы исследования.** Расчеты, проведенные на основании гранат-клинопироксенового термометра, определяют интервал температур стабильности наблюдаемой ассоциации гранат + омфацит в пределах 580-650 °С, а проведенные оценки давлений, по растворимости жадеитов в клинопироксенах, дают максимальные давления наблюдаемого парагенезиса порядка 13,5 кбар и минимальное – 8,5 кбар. **Результаты работы.** Проведено геохимическое изучение эклогитов и гранатовых амфиболитов и приведены результаты их RFA, ICP-MS анализов, а также дано краткое петрографическое описание изучаемых пород. Рассмотрены петро-геохимические характеристики эклогитов, определена их дометаморфическая природа, а также расшифрована наиболее вероятная геодинамическая типизация исходного протолита. Показано, что эклогиты по составу соответствуют магматическим породам базальтового типа, с отношением изотопов  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  равным 0,7035. Эклогиты образовались по умеренно-титанистым, умеренно-глиноземистым, умеренно-магнезиальным, низко-калиевым, вулканитам с натровым типом щелочности. Предполагается, что исходный расплав основного состава был образован при 8-15% плавлении шпинелевых перидотитов, а  $\text{Ni}/\text{Co}$  отношение  $\Sigma/n$  равно 2,9 соответствует показателю мантийных выплавов, варьирующему в пределах 2,5-5,0. Низкие значения  $\text{Mg}\# = 0,55$  указывают на возможные явления дифференциации исходного расплава. Положительные европиевая  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,95-2,75$  и стронциевая аномалии допускают изначальную аккумуляцию плагиоклаза в вулканитах. Анализ петрогенетических диаграмм показывает, что фигуративные точки эклогитов располагаются в полях базальтов  $E - \text{MORB}$  типа, а также толеитов островных дуг, базальтов задуговых котловин (окраинные моря) и срединно-океанических хребтов. Геохимическая специализация исходных расплавов – сидерофильная. Несовместимые элементы и REE нормированные по  $N\text{-MORB}$  и хондриту, образуют спектры линий, близких к  $N\text{-MORB}$ , а  $\text{La}_n/\text{Ybn} = 0,6-1,7$  при  $\Sigma/n \text{ REE} = 34$  г/т. В тоже время полученные спектры отличаются от эталона  $N\text{-MORB}$  четкими отрицательными аномалиями высокозарядных элементов ( $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$ ), что указывает на их надсубдукционную природу. По совокупности полученных результатов, с учетом палеотектонических реконструкций Кавказского региона,

предполагается, что формирование исходных вулканитов происходило в раннем палеозое, в условиях задугового бассейна расположенного на северной границе палеотетиса.

**Ключевые слова:** петрография, метаморфизм, протолит, минеральный парагенезис, петрогенетические диаграммы, геодинамическая типизация, геохимическая специализация.

**Для цитирования:** Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Герасимов В. Ю. Эклогиты Большого Кавказа (природа протолита и его геодинамическая типизация). *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2020.24.33.001.

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

---

---

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

---

---

DOI: [10.46698/VNC.2020.24.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.24.33.001)

Original paper

## Eclogites of the Great Caucasus (nature of protolite and its geodynamical typification)

V. M. Gazeev <sup>1, 2</sup>, A. G. Gurbanov <sup>1, 2</sup>, V. Yu. Gerasimov <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 22 Markusa Str., Vladikavkaz 362027, Russian Federation, e-mail: gazeev@igem. ru;

<sup>3</sup>Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Mineralogical museum named A. E. Fersman of Russian Academy of Sciences (Minmuseum RAS), 18-2 Leninsky Avenue, Moscow 119071, Russian Federation, e-mail: gera-igem2008@yandex. ru

Received: 06.03.2020, revised: 20.04.2020, accepted: 23.04.2020

**Abstract: Relevance.** In structural-formation zone of Front ridge of the Great Caucasus in rock sections of “balkanskoy” and “labardanskoy” suites bodies of eclogites of omphacite-garnet composition with a admixture of amphibole, epidote, zoisite and clinopyroxene are occur. **Aim** of the work was to study the petrochemical and geochemical features of eclogites in sections of the Greater Caucasus rocks. **Methods.** Calculation carried out on the basis of garnet-clinopyroxene thermometer, are assess interval temperature of stability of observed association garnet + omphacite within 580-650°C, and carried out assessments of pressure according solubility of jadeites in the clinopyroxene, give maximum pressure of observed paragenesis is 13,5 kbar and minimum – 8,5 Kbar. **Results.** Geochemical investigation of eclogites and garnet amphibolites was carried out and results of it RFA, ICP-MS analysis and also briefly petrographyc discription of investigated rocks have been done. Petrogeochemical characteristics of eclogites have been treated and it premetamorphic nature was determined and the most likely geodynamical typification of initial protolite was deciphered. It was shown, that eclogites correspond on composition to magmatic rocks of basaltic type with a relation of isotopes of <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr equal to 0.7035. Eclogites were formed from moderate-titaniferous, moderate-aluminiferous and moderate-magnesianiferous, low-potassic volcanites with a sodium type of alkalinity. It is suggested, that initial melt of basic composition, was formed at a 8-15% melting of spinelian peridotite. Ni/Co ratio  $\Sigma/n$  equal 2,9 correspond to index of mantle smelted, varying within 2,5-5,0. Low values Mg# =0,55 denotes on possible phenomenon of differentiation of initial melt. Positive europium Eu/Eu\* =0,95-2,75 and strontium anomalies allows of primary accumulation of plagioclase in volcanites. Analysis of petrogenic diagrams are show, that dots of eclogites are located in field of basalt E – MORB

type, and also – tholeite of arc island, basalt of backarc basin (margin sea) and medial ocean ridge. Geochemical specialization of the initial melts is siderophile. Incompatible elements and REE are normalized to N-MORB and chondrite, are formed spectra of lines, close to MORB type basalt;  $La_n/Yb_n = 0,6-1,7$  when  $\sum/n REE=34$  ppm. At the same time obtained spectrums are distinguish from standart of N-MORB by clear negative anomalies of high-charged elements (Nb, Ta, Zr, Hf), that indicate of their oversubduction nature. According to tofality of obtained results and accounting of paleotectonic reconstruction of the Caucasus region, have supposed, that forming of initial volcanites was occurred in Early Paleozoic in condition of back-arc basin which located on the northern margin of Paleo-Tethys.

**Keywords:** petrography, metamorphism, protolite, mineral paragenesis, petrogenic diagram, geodynamical typification, geochemical specialilization.

**For citation:** Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Gerasimov V. Yu. Eclogites of the Great Caucasus (nature of protolite and it geodynamical typification). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (2): 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2020.24.33.001.

**Acknowledgments:** This work was supported by State Topic registration number AAAA-A19-119040190054-8 in GRD VSC RAS.

## Введение

По современным представлениям эклогиты (Эк) – это высокобарические породы, соответствующие по химическому составу габбро, базальтам, коматиитам и превышающие их по плотности на 20-25%. Для них характерны минералы: гранат пироп-альмандин-гроссулярового состава и жадеит содержащий клинопироксен. В природе они встречаются как ксенолиты в трубках кимберлитов и в щелочных базальтах или в виде будин, линз и жил среди пород полиметаморфических комплексов. Изучение различных Эк. дает информацию о составе мантии, истории метаморфизма Эк- содержащих комплексов земной коры, а также о эволюции древнего магматизма, так как Эк. в некоторых регионах залегают среди протерозойских пород, в которых присутствуют метаморфиты древних плутонических ассоциаций [Удовкина, 1985]. Проблема Эк. давно привлекает внимание геологов в связи с развитием теории тектоники плит, согласно которой частично эти породы должны образовываться в зонах субдукции океанической плиты и затем выводиться к поверхности при процессах аккреции и столкновения островных дуг, микроконтинентов и континентов. В связи с этим они считаются несомненными отторжениями от мантии или низов коры. При обсуждении возможной модели образования Эк. важно установить являются ли они фрагментами коры океанического или континентального типа. Полезную информацию для решения этого вопроса дает изучение характера распределения в них редкоземельных элементов. Имеющиеся данные по Эк. Киргизии и Казахстана показывают, что за редким исключением, они образовались за счет пород близких к базальтам срединно-океанических хребтов. Например, Эк. Армориканского массива имеют геохимические особенности, сходные как с базальтами типа *MORB*, так и продуктами островодужного вулканизма. Протолитом Эк. Центрального Французского массива служили породы как океанического, так и континентального типа. Изучение характера распределения *REE* и изотопов *Nd* в Эк. Доминиканской Республики позволило предположить, что они являются смесью субдуцированных осадков и островодужного материала [Добрецов и др., 1989]. Известно, что при решении проблем генезиса Эк., распространенных в земной коре, необходимо исследовать: 1) природу протолитов, форму тел Эк. и соотношение с вмещающими породами; 2) *PT* параметры равновесия Эк. парагенезисов и эволюционную направленность метаморфизма, приведшую к их

появлению; 3) соотношение  $PT$  параметров равновесия минеральных ассоциаций Эк. и вмещающих толщ; 4) флюидный режим высокобарического метаморфизма, существовавший при образовании Эк; 5) изотопный возраст Эк; 6) тектоническую позицию Эк., и эклогитоносных комплексов [Добрецов и др., 1989]. На Большом Кавказе (БК) Эк. известны в структурно-формационной зоне Передового хребта (СФЗ ПХ) как в её западной части, в ядре Блыбского антиклинория, в бассейнах рек Уруштен, Малая и Большая Лаба (блыбский метаморфический комплекс, балканская свита), так и в её восточной части – в междуречье правых притоков р. Чегем – Лабардан-су и Шудулгу-су (лабарданская свита). Метаморфизм разреза кристаллических пород с телами Эк. соответствует ставролитовой фации кианит-силлиманитового типа глубинности [Шенгелия и др., 1991]. Изотопные отношения в Эк. в долине р. Лабардан-су имеют следующие значения:  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma = 0,0070 \pm 6$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma = 0,703505 \pm 15$ ;  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma = 0,1960 \pm 4$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma = 0,513026 \pm 14$ ;  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\text{SE} = 18,2620 \pm 40$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\text{SE} = 15,5953 \pm 36$ ;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\text{SE} = 38,0035 \pm 92$  [Лебедев и др., 2010].

В настоящей публикации приведены результаты геохимического изучения Эк. и ассоциирующих с ними гранатовых амфиболитов. Рассмотрена дометаморфическая природа и геодинамическая типизация исходного протолита.

#### Фактический материал и методы его исследования.

Материалом для исследования послужила коллекция, собранная в 2018 г., при посещении кристаллического разреза с телами эклогитов и гранатовых амфиболитов по р. Уруштен (урочище Красная скала), и 2 образца В.Ю. Герасимова с р. Лабардан-су. Аналитические исследования выполнены в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика»: в 13 пробах проведено определение концентраций петрогенных и микроэлементов рентгено-флюоресценным анализом ( $XRF$ ) на спектрометре «Респект-100»; в 5 пробах определения содержаний рудных, редких и редкоземельных элементов выполнены методом спектроскопии с индукционно-связанной плазмой с масс-спектрометрическим окончанием ( $ICP-MS$ ) на масс-спектрометре X-Series II. Используются 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 анализы Эк. и эклогитоподобных пород БК по данным [Афанасьев и др., 1969; Плошко, Шпорт, 1974; Плошко и др., 1977; Татришвили, 1970].

#### Краткая геология и петрографическая характеристика эклогитов

Эк. в разрезах пород «балканской» и «лабарданской» свит в СФЗ ПХ встречаются в виде линзовидных тел переменной мощности (от первых дециметров до 3-5 реже 15 метров). Они ассоциируют со слюдястыми, амфиболовыми, кианит-гранатовыми сланцами, гнейсами и гранатовыми амфиболитами. Контакты тел Эк. с вмещающими сланцами и гнейсами субсогласные, резкие, с гранатовыми амфиболитами – обычно постепенные. Помимо Эк., в этих разрезах описаны пластообразные тела апатит – карбонатных и апатит – амфибол – карбонатных метасоматитов [Плошко, Шпорт, 1974]. Внешне Эк. средне- и крупнозернистые плотные породы темно-зеленовато-серого цвета с порфиробластами буроватого граната. Микро-

структура пород порфиробластическая (рис. 1-1), гранобластовая (рис. 1-2) местами симплектитовая. Эк. состоят из омфацита (до 45%), граната (до 20%), амфибола (до 15%), эпидота и цоизита, кианита. В меньших количествах присутствуют: парagonит, мусковит-фенгит, хлорит, карбонат, альбит, кварц, апатит, рутил, лейкоксен, пирит, ортит и циркон.

Гранат обычно присутствует в виде округлых корродированных зерен или кристаллов додекаэдрического габитуса, размером от 0,1 до 1,0 см. В нем часто встречаются включения кварца, эпидота, омфацита, рутила, роговой обманки, кальцита. От центра к краям зерен граната возрастает количество пиропового минала от 10 до 30%. Омфацит наблюдается в промежутках между порфиробластами граната в виде агрегата сросшихся индивидов размером до 1 мм, местами отмечается совместный рост омфацита и граната (рис. 1-4). Его кристаллы обладают зональностью, выражающейся в повышении Fe и снижении Na, Al к их краям. При количестве  $\text{Na}_2\text{O}$  равном 6-8 масс. %, содержание жадеитового минала в омфаците оценивается в 47-52%. Амфибол встречается в виде включений призматических кристаллов роговой обманки в гранате и образует каемки вокруг его зерен, а также присутствует

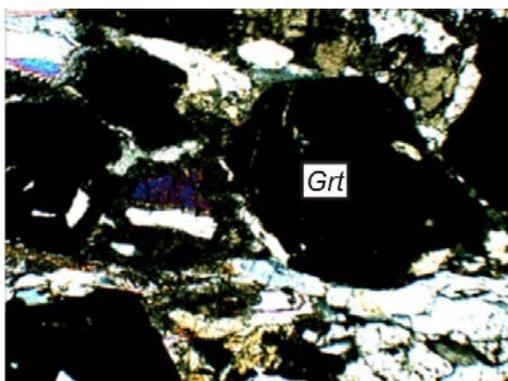


Рис. 1-1. Порфиробластическая структура эклогитов.

Fig. 1-1. Porphyroblastic texture of eclogite



Рис. 1-2. Гранобластическая структура основной ткани.

Fig. 1-2. Granoblastic texture of parenchyma tissue

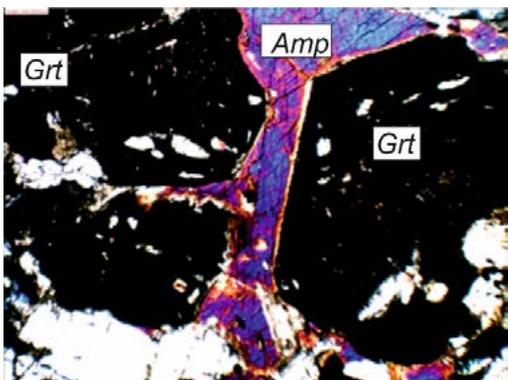


Рис 1-3. Амфибол в промежутках между кристаллами граната.

Fig. 1-3. Amphibole in gap between garnet crystals

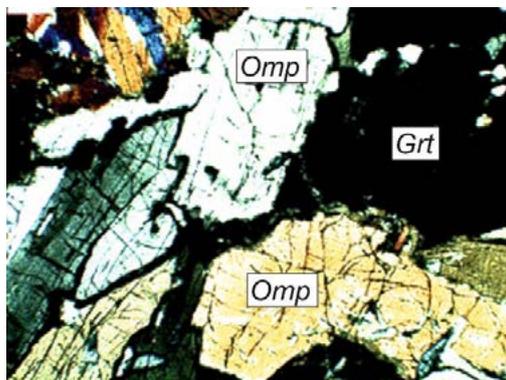


Рис. 1-4. Совместный рост граната и омфацита

Fig. 1-4. Joint growth garnet and omphacite

Рис. 1. Микрофотографии пород (Д – диагональ снимков 2,9 мм). /  
Fig. 1. Microphotographies of rocks (Д – diagonal of photo is 2.9 mm)

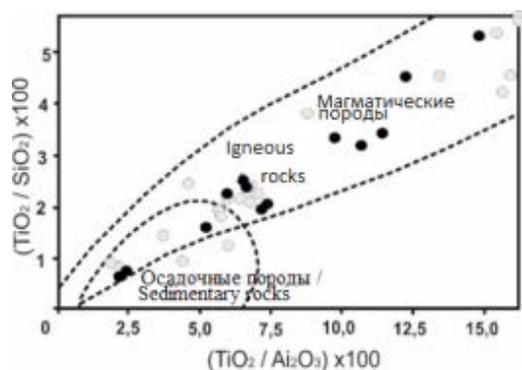


Рис. 2-1.  $(TiO_2/SiO_2) \times 10^2 - (TiO_2/Al_2O_3) \times 10^2$  /  
 Fig. 2-1.  $(TiO_2/SiO_2) \times 10^2 - (TiO_2/Al_2O_3) \times 10^2$

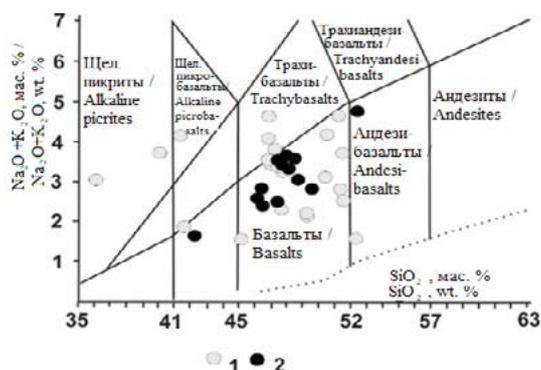


Рис. 2-2.  $Na_2O+K_2O - SiO_2$  /  
 Fig. 2-2.  $Na_2O+K_2O - SiO_2$

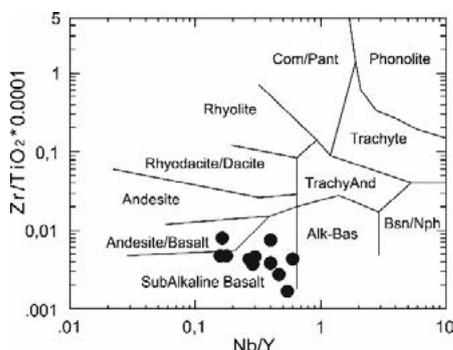


Рис. 2-3.  $Zr / (TiO_2 \times 0,0001 - Nb/Y$  /  
 Fig. 2-3.  $Zr / (TiO_2 \times 0,0001 - Nb/Y$

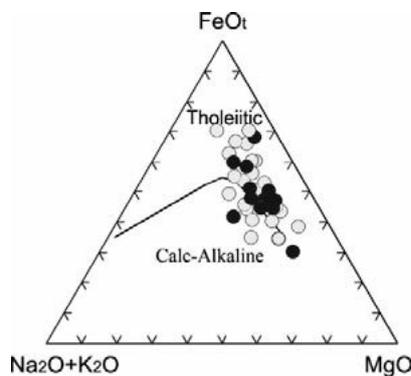


Рис. 2-4.  $(Na_2O+K_2O) - FeO-MgO$  /  
 Fig. 2-4.  $(Na_2O+K_2O) - FeO-MgO$

Рис. 2. Составы эклогитов и гранатовых амфиболитов, на классификационных диаграммах. Условные обозначения: 1 – анализы из литературных источников; 2 – RFA. ЦКП «ИГЕМ – Аналитика».

Fig. 2. Composition of eclogites and garnet amphibolites on the classificational diagrams. Legend: 1 – analysis from literature; 2 – XRF analysis from CCU.

в мезостазиесе. По количеству  $Na_2O$  4,3% амфиболы относятся к паргасит-баррозитовой серии [Шенгелия и др., 1991; Плошко, Шпорт, 1974]. Кианит неравномерно рассеян в породе и присутствует в виде удлинённых кристаллов размером до  $0,1 \times 0,5$  см. Содержания вторичных минералов местами существенно возрастают: эпидота до 15%, цоизита до 20%, амфибола до 45%, мусковит, парагонит + фенгит (до 20%). Отмечаются окварцованные разности Эк. [Плошко и др., 1977].

### Петрохимические и геохимические характеристики эклогитов

На диаграмме  $(TiO_2/SiO_2) \times 10^2 - (TiO_2/Al_2O_3) \times 10^2$  (рис. 2), используемой для определения первичной природы метаморфических пород [Закруткин, 1981] фигуративные точки составов (ФТС) изученных пород группируются в поле магматических пород. Незначительная часть ФТС локализована в 8-ми процентной области неопределённости составов магматических и осадочных пород, что вероятно указывает на туфовую природу некоторых Эк. с возможной примесью осадочного компонента. На классификационных диаграммах, учитывающих отношения петро-

генных оксидов ( $Na_2O+K_2O$ ) –  $SiO_2$  и редких элементов ( $Zr/TiO_2 \times 10^{-4}$ ) –  $Nb/Y$  ФТС располагаются в поле базальтов нормальной щелочности. На диаграмме АФМ отмечается Феннеровский тип дифференциации исходных пород, с увеличением железистости в конечных продуктах (табл. 1).

На диаграммах  $SiO_2$  – петрогенные элементы (рис. 3) ФТС Эк. образуют компактные поля, без видимых корреляционных трендов петрогенных оксидов. Неко-

Таблица 1. / Table 1.

**Результаты RFA эцлогитов и гранатовых амфиболитов Большого Кавказа  
(оксиды в весовых %; элементы в г /т).**

**Results of XRF analysis of eclogites and garnet amphibolites of Greate Caucasus  
(oxides in wt.%/ elements in ppm).**

	67/18	68/18	69/18	70/18	71/18	72/18	73/18	74/18	75/18	76/18	77/18	7-1	7-2
$SiO_2$	48,09	47,40	42,12	46,14	48,67	47,37	46,38	46,51	48,71	52,38	49,71	47,78	47,67
$TiO_2$	1,19	1,58	2,35	0,76	1,58	1,12	2,14	1,01	1,70	0,43	0,32	0,95	0,98
$Al_2O_3$	17,74	16,10	16,07	14,59	14,80	16,49	17,40	16,91	14,97	17,51	14,56	13,07	13,13
$Fe_2O_3$	10,81	13,03	19,92	11,70	14,83	12,64	14,14	11,22	11,93	9,16	7,32	11,75	11,85
$MnO$	0,16	0,20	0,15	0,21	0,23	0,21	0,20	0,16	0,21	0,13	0,14	0,17	0,18
$MgO$	6,40	6,95	6,31	9,72	5,08	8,27	5,69	8,76	8,04	6,14	10,85	8,55	8,64
$CaO$	10,51	10,31	10,52	12,02	10,15	9,28	10,45	11,72	9,91	8,90	12,61	13,02	12,90
$Na_2O$	3,12	3,16	1,55	2,50	3,30	2,18	2,46	2,15	2,65	4,58	2,66	3,52	3,53
$K_2O$	0,17	0,40	0,09	0,12	0,30	0,27	0,32	0,18	0,36	0,32	0,19	0,12	0,11
$P_2O_5$	0,13	0,21	0,02	0,04	0,21	0,04	0,03	0,11	0,20	0,04	0,02	0,04	0,04
$S$	0,13	0,07	0,03	0,0	0,0	0,14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,09	0,06
ppm	1,31	0,46	0,65	2,05	0,68	1,94	0,59	1,10	1,12	0,29	1,41	0,78	0,75
Сумма / Sum	99,76	99,87	99,78	99,85	99,83	99,95	99,8	99,83	99,8	99,88	99,79	99,84	99,84
$Cr$	149	178	29	255	80	190	92	326	344	152	684	3,51	3,61
$V$	248	246	781	140	280	248	295	175	251	175	130	212	225
$Co$	30	35	70	44	48	43	38	44	35	23	37	30	26
$Ni$	79	94	119	186	38	107	49	123	166	41	164	125	130
$Cu$	60	78	176	34	84	112	92	87	54	65	117	42	43
$Zn$	91	99	85	99	113	101	85	75	96	75	53	218	186
$Pb$	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	11	<10	<10	10	10
$Rb$	<10	12	<10	<10	13	11	11	<10	12	10	<10	10	10
$Sr$	416	197	320	111	284	123	464	255	154	62	88	455	340
$Ba$	1311	203	64	60	107	153	173	64	97	148	77	41	31
$Nb$	6	7	6	6	6	6	6	6	7	6	6	5	5
$Zr$	44	77	14	21	75	43	18	17	136	32	14	39	43
$Y$	21	42	10	13	38	15	14	11	43	15	<10	18	18

Примечание: р. Уруштен. Красные Скалы. 67, 68, 69,70,72,73,74,76,77/18 эцлогиты. 71,75/18 гранатовые амфиболиты. р. Лабардан су. 7-1,7-2 эцлогиты. /

Note: river Urushten, Red Cliff: 67, 68, 69,70,72,73,74,76,77/18 eclogites;71,75/18 garnet amphibolites. River Labagom-su. 7-1,7-2 eclogites.

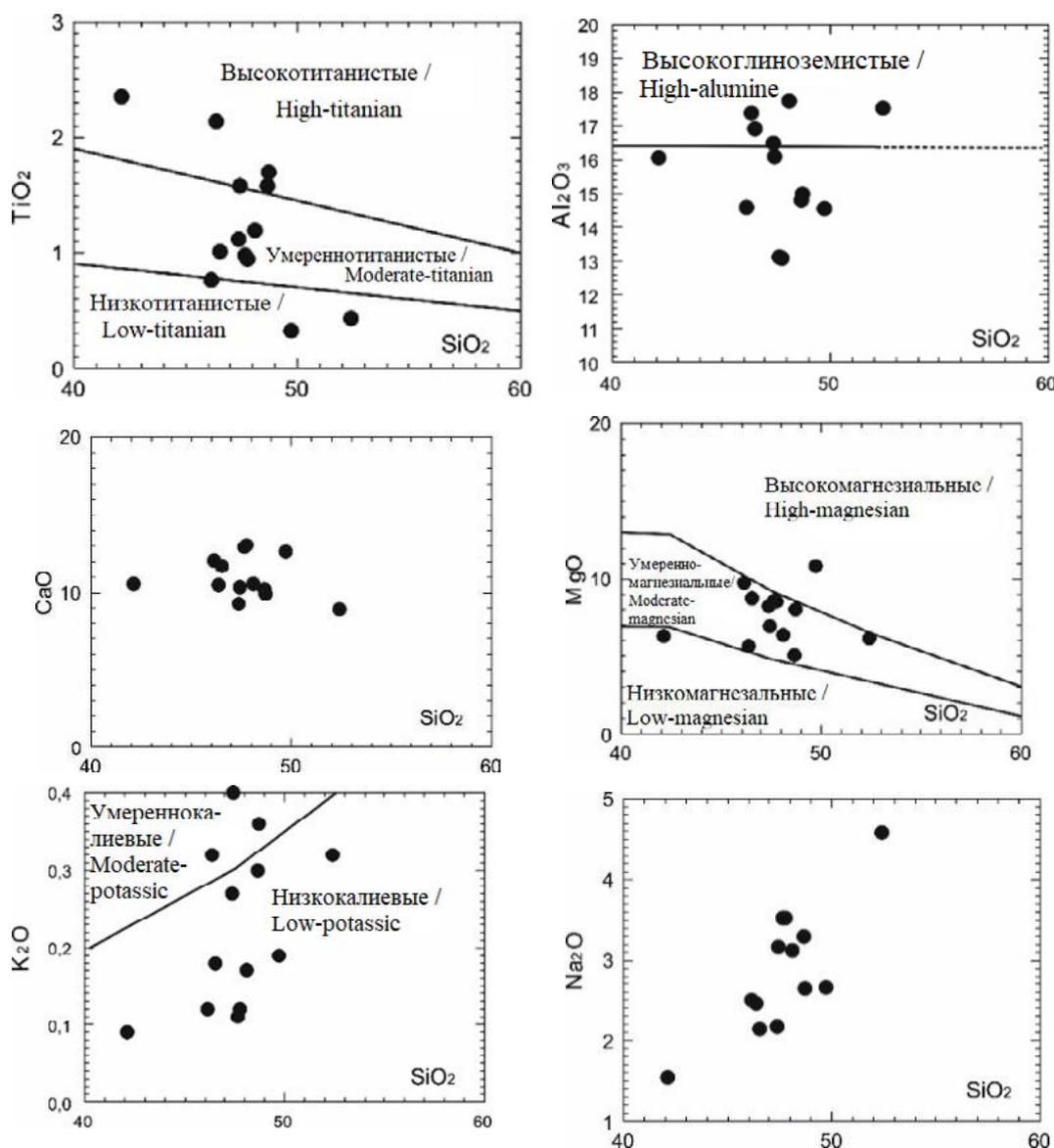


Рис. 3. Диаграммы концентраций петрогенных компонентов (в мас. %). /  
 Fig. 3. Diagrams of petrogenetic components concentration (in wt. %)

торое исключение составляют не закономерные вариации содержаний  $K_2O$ . Исходные базальтоиды, по-видимому, были умеренно-титанистыми, умеренно-глиноземистыми  $Al=0,6-1,1$  масс. %, умеренно-магнистыми  $Mg\# = 0,38-0,74$  ( $\Sigma/n$  0,55), низко калиевыми породами, с натровым типом щелочности  $Na_2O/K_2O=7,3-32$ .  $U/Th$  отношение, варьирующее от 0,25 до 1,0, что указывает на неизменность составов пород наложенными процессами.

На петрогенетических и дискриминационных диаграммах мафических пород (рис. 4) ФТС Эж. концентрируются в следующих полях: на диаграммах  $La/10 - Y/15 - Nb/8$  [Cabanis, Lecolle, 1989] и  $Zr/4 - Nb \times 2 - Y$  [Wood, 1980] – в поле базальтов *E-MORB* типа; на диаграмме  $Zr - Ti/100 - Y \times 3$  [Pearce, Cann, 1973] – в полях А, В толеитов островных дуг и океанического ложа; на диаграмме  $V - Ti/1000$  [Shervais, 1982] – в поле базальтов срединно-океанических хребтов и базальтов задуговых

Таблица 2. / Table 2.

## Результаты ICP-MS анализа эклогитов и гранатовых амфиболитов. /

## Results of ICP MS analysis of eclogites and garnet amphibolites).

Элементы в г/т / Elements in ppm	Номера проб / Sample Numbers				
	67\18	70\18	73\18	75\18	76\18
<i>Li</i>	10,2	7,1	8,2	10,6	7,8
<i>Be</i>	0,5	0,3	0,3	0,8	0,3
<i>Sc</i>	46,0	40,9	42,8	47,4	46,3
<i>Ti</i>	4917	3079	5600	8320	1484
<i>V</i>	311	202	371	320	226
<i>Cr</i>	126,4	252,2	68,4	333,8	126,2
<i>Mn</i>	1391	1747	1527	1778	1118
<i>Co</i>	39,6	50,2	39,3	40,8	29,5
<i>Ni</i>	66,2	151,7	38,1	141,9	34,6
<i>Cu</i>	53,7	28,5	69,4	53,9	70,2
<i>Zn</i>	102,3	100,0	90,9	112,5	77,2
<i>Rb</i>	2,5	2,3	6,8	7,3	4,7
<i>Sr</i>	492	120	529	169	54
<i>Y</i>	16,0	10,5	9,1	30,9	9,3
<i>Zr</i>	9,3	6,5	7,3	9,8	9,7
<i>Nb</i>	1,1	0,2	0,3	2,4	0,2
<i>Mo</i>	1,3	1,1	1,2	1,0	1,2
<i>Ag</i>	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Cd</i>	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
<i>Cs</i>	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6
<i>Ba</i>	1592	45	143	83	113
<i>La</i>	4,5	1,0	1,6	6,7	1,3
<i>Ce</i>	11,8	3,3	4,1	19,5	3,9
<i>Pr</i>	1,7	0,6	0,6	3,0	0,6
<i>Nd</i>	9,2	3,6	3,7	15,6	3,4
<i>Sm</i>	2,6	1,3	1,3	4,6	1,1
<i>Eu</i>	1,6	0,7	1,3	1,5	0,5
<i>Gd</i>	3,1	1,6	1,6	5,0	1,3
<i>Tb</i>	0,5	0,3	0,3	1,0	0,3
<i>Dy</i>	3,2	2,2	1,9	5,9	1,8
<i>Ho</i>	0,7	0,5	0,4	1,3	0,4
<i>Er</i>	2,0	1,3	1,1	3,8	1,2
<i>Tm</i>	0,3	0,2	0,2	0,5	0,2
<i>Yb</i>	1,9	1,3	1,0	3,7	1,2
<i>Lu</i>	0,3	0,2	0,2	0,5	0,2
<i>Hf</i>	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4
<i>Ta</i>	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0
<i>W</i>	0,4	0,4	0,4	0,6	0,3
<i>Pb</i>	24	19	20	21	16
<i>Th</i>	0,4	0,0	0,1	0,8	0,2
<i>U</i>	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2
$\Sigma REE$	43,4	18,2	19,1	72,6	17,3

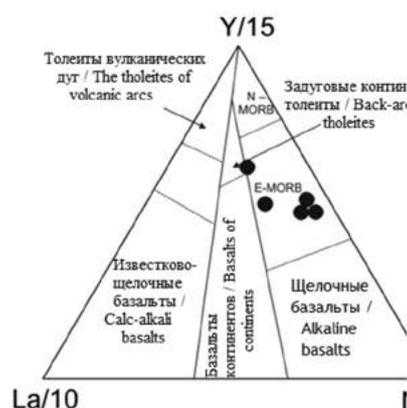


Рис. 4-1.  $La/10 - Y/15 - Nb/8$ . /  
Fig. 4.1.  $La/10 - Y/15 - Nb/8$

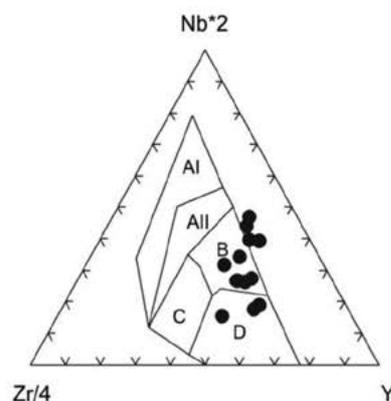


Рис. 4-2.  $Zr/4 - Nb \times 2 - Y$ . /  
Fig. 4-2.  $Zr/4 - Nb \times 2 - Y$

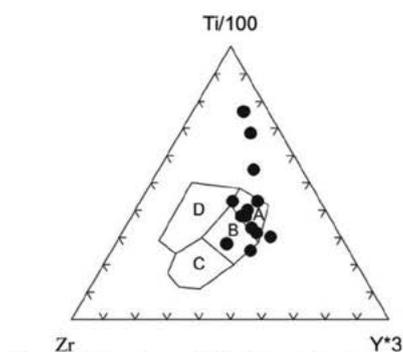


Рис. 4-3.  $Zr - Ti/100 - Y \times 3$ . /  
Fig. 4-3.  $Zr - Ti/100 - Y \times 3$

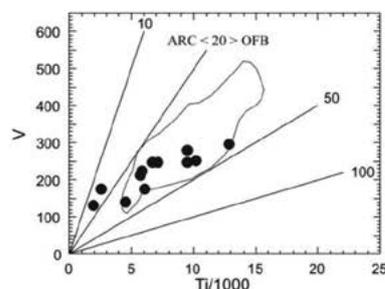


Рис. 4-4.  $V - Ti/1000$ . /  
Fig. 4-4.  $V - Ti/1000$

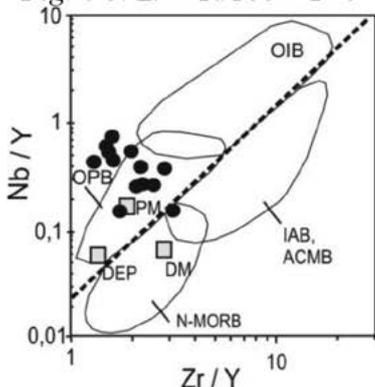


Рис. 4-5.  $Nb/Y - Zr/Y$ . /  
Fig. 4-5.  $Nb/Y - Zr/Y$

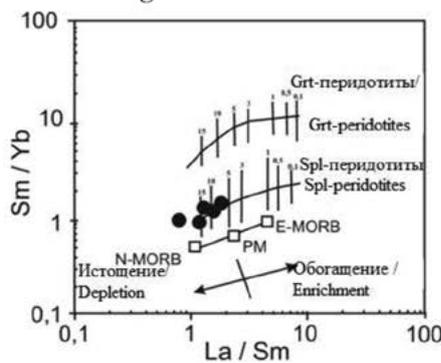


Рис. 4-6.  $Sm/Yb - La/Sm$ . /  
Fig. 4-6.  $Sm/Yb - La/Sm$

Рис. 4. Составы эцлогитов на петрогенетических и дискриминационных диаграммах. /  
Fig. 4. Composition of eclogites on the petrogenetic and discriminational diagrams

бассейнов (MORB и BAB) [Скляр и др., 2001]; на диаграмме разграничения мантийных источников  $Nb/Y-Zr/Y$  [Condie, 2005] – в поле OPB – базальтов океанических плато вблизи с точкой PM (компоненты примитивной мантии); на диаграмме  $Sm/Yb-La/Sm$  ФТС Эк., группируются вблизи тренда плавления шпинелевых перидотитов [Школьник и др., 2009].  $Ni/Co$  отношения в Эк., варьирующие в пределах 0,8-5,0  $\Sigma/n$  2,9, характерных для мантийных выделок, в нашем случае варьируют в пределах 2,5-5,0. Редкоземельные элементы (табл. 2) нормированные по хондриту

[San, McDonough, 1989] образуют спектр линий близких *N-MORB* с положительной европиевой аномалией (рис. 5).  $La_n/Yb_n$  отношение (показатель степени фракционирования *REE*) равен 0,6-1,7;  $La_n/Sm_n = 0,5-1,1$ ;  $Gd_n/Yb_n = 0,9-1,3$ . Величина  $Eu/Eu^*$  где  $(Eu^* = (Sm_n + Gd_n)/2)$  составляет 0,95-2,75.  $\sum REE$  17-72 г/т,  $\Sigma/n$  34 г/т. Концентрации несовместимых элементов нормированных по *N-MORB* [San, McDonough, 1989], образуют спектр криволинейных линий, располагающихся вдоль профиля *N-MORB*. В Эк. отмечаются: 1 – незначительное повышение содержаний гидромагматофильных элементов *Ba, U, Sr, K, Rb*; 2 – отрицательные аномалии высокозарядных элементов *Nb, Ta, Zr, Hf* и слабая негативная аномалия *Ti*. Для уточнения геохимической специализации Эк, составлены ранжированные ряды кларков концентрации ( $K_k > 1,1$ ) имеющие следующий вид: *Pb* 3,3, *Ni* 1,3, *Ba* 1,3, *Co* 1,2, *Zn* 1,2, *Cu* 0,8. Их геохимическое сравнение с породами близкого петрогеохимического типа, двенадцати геодинамических обстановок [Гусев и др., 1999] показывает, что они хорошо сопоставимы с базальтами задуговых котловин (окраинные моря) и срединно-океанических хребтов. Геохимическая специализация сидерофильная.

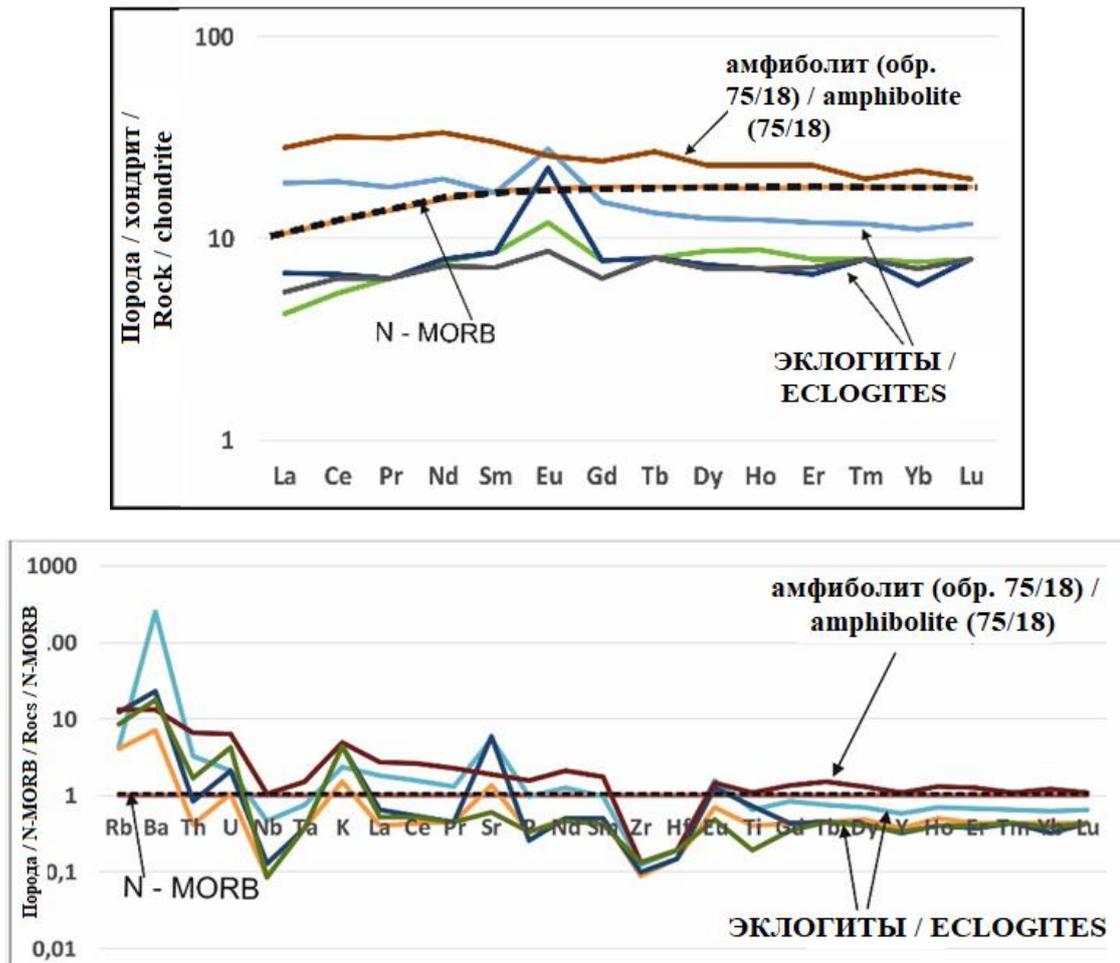


Рис. 5. Составы эклогитов на спайдер диаграммах.

Концентрации *REE* нормированные к хондриту, концентрации несовместимых элементов нормированные к *N-MORB*, по [San, McDonough, 1989]. /

Fig. 5. Composition of eclogites on the spaiider-diagrames.

Contents of *REE* were normalaized to chondrite; contents of incompatible elements were normalaized to *N-MORB*, acording [San, McDonough, 1989].

## Результаты и их обсуждение

В изученных образцах не выявлено реликтов первичных микроструктур, указывающих на исходную природу пород. Известно, что в глубоко-метаморфизованных образованиях, в которых отсутствуют реликты первичных структур и текстур, петрохимические методы воссоздания первичной природы пород в сочетании с геохимическими данными, являются практически единственно возможными.

Вопрос об условиях образования Эк. обычно решается на основании современных экспериментальных данных по устойчивости минералов и переходу габбро в эклогит. Образование собственно Эк. фиксируется по исчезновению плагиоклаза и появлению ассоциации гранат + омфацит. При температуре 1100°C такой переход в благоприятных по химизму породах проходит в интервале давлений от 13,5 до 20-22,5 кбар, а при температуре около 600°C – в интервале 8-15 кбар. Ограниченное распространение Эк. в обнаженных разрезах метаморфических комплексов, в сравнении с распространением пород типа габбро или базальтов, объясняется низкой скоростью реакции превращения габбро (базальта) в Эк., протекающего при низких температурах и давлениях. По-видимому, условия обеспечивающие переход в Эк, возникают на умеренных глубинах (10-15 км) и лишь изредка, возможно, в результате локальных сверхдавлений и местных повышений температуры, объяснимых сдвиговыми напряжениями, или кратковременными резкими повышениями давления в момент смены знака движения отдельных блоков земной коры, а также в результате автоклавного эффекта [Кушев, Виноградов, 1979]. Расчеты проведенные на основании гранат-клинопироксенового термометра, определяют интервал температур стабильности наблюдаемой ассоциации гранат + омфацит в Эк. Большой Лабы в пределах 580-650°C. Приблизительные оценки, на основе экспериментальных данных А. Л. Перчука по растворимости жадеитов в клинопироксенах, дают максимальные давления при формировании наблюдаемого парагенезиса порядка 13,5 кбар, минимальное 8,5 кбар [Шенгелия и др., 1991].

Известно, что по составу среди Эк. различают троктолитовый и базальтовый типы, критериями для их выделения являются магнезиальность, содержание  $TiO_2$  и щелочность. В троктолитовом и базальтовом типах эти величины соответственно равны  $MgO / (FeO + 2Fe_2O_3)$  (мол. кол.) 2-7,5 и 0,5-2;  $TiO_2$  0,1-0,8 и 0,8-7;  $Na_2O$  (вес %) 0,5-2 и 2-4. Эклогиты троктолитового типа богаты глиноземом и по химическому составу сопоставимы с габброидами офиолитовой ассоциации, в то время как Эк. базальтового типа по составу близки к различным базальтам [Удовкина, 1985]. В изученных породах эти усредненные показатели соответствуют базальтовому типу: 1,3; 1,2; 2,9. На диаграмме В. В. Закруткина (рис. 2-1), используемой для определения первичной природы метаморфических пород, ФТС Эк., концентрируются в области магматических пород. На классификационных диаграммах, учитывающих отношения петрогенных оксидов  $(Na^2 + K_2O) - SiO_2$  (рис. 2-2) и редких элементов  $(Zr / TiO_2 \times 10^{-4}) - Nb/Y$  (рис. 2-3) они располагаются в поле базальтов. Отношение изотопов  $^{87}Sr / ^{86}Sr \pm 2\sigma = 0.703505 \pm 15$  соответствует океаническим базальтам ( $^{87}Sr / ^{86}Sr \pm 2\sigma = 0,703-0,704$ ).

Таким образом, можно предположить, что протолитом изученных Эк. служили магматические породы основного состава. Исходя из мощности наблюдаемых геологических тел, варьирующей от дециметров, до первых десятков метров, пред-

ставляется логичным считать, что породы имели вулканическую природу и включали объекты эффузивного (лавы) и эксплозивного (туфы) характера. Компактное положение ФТС на диаграммах концентраций петрогенных компонентов (рис. 3), низкая величина  $U/Th$  отношения  $\leq 1,0$  указывают на неизменность состава пород наложенными процессами и изохимический тип метаморфических преобразований, при котором перераспределение элементов происходило на незначительные расстояния, не нарушая исходных соотношений в валовых пробах. Этот вывод подтверждается достаточно закономерным поведением ФТС на дискриминационных (рис. 4) и спайдер (рис. 5) диаграммах и позволяет, на наш взгляд с большой долей вероятности, рассмотреть геодинамическую природу изученных объектов.

По-видимому, Эк. образовались по умеренно-титанистым, умеренно-глиноземистым, умеренно-магнезиальным, низко-калиевым вулканитам основного состава с натровым типом щелочности, которые являлись производными расплава образовавшегося при 8-15% плавлении шпинелевых перидотитов (рис. 4-6). Низкие значения  $Mg\# = 0,55$  указывают на возможные явления дифференциации этого расплава. Положительные европиевая (рис. 5)  $Eu/Eu^* = 0,95-2,75$  и стронциевая аномалии допускают изначальную аккумуляцию плагиоклаза в вулканитах. Анализ петрогенетических диаграмм (рис. 4) показывает, что ФТС Эк. чаще всего группируются в полях базальтов океанических хребтов, океанического ложа, задуговых бассейнов, и реже – низко-калиевых толеитов островных дуг. Несовместимые элементы и *REE* нормированные по *N-MORB* и хондриту [San, McDonough, 1989], образуют спектры линий, близких к *N-MORB* (рис. 5) и, в тоже время, отличаются от них четкими отрицательными аномалиями высокозарядных элементов *Nb*, *Ta*, *Zr*, *Hf*. Известно, что отрицательные аномалии этих элементов характерны для надсубдукционных, островодужных расплавов образующихся при плавлении пород мантийного клина с участием флюида и расплавов субдуцирующейся океанической коры. Следует отметить, что в исследованных породах имеет место лишь незначительное повышение содержаний флюид мобильных элементов и практическое отсутствие характерной для островодужных расплавов титановой аномалии. Полученные результаты на наш взгляд, более всего соответствуют условиям задугового бассейна.

Исходя из изложенного выше и с учетом палеотектонических реконструкций Кавказского региона [Адамия и др., 1989], можно предположить, что в раннем палеозое, на северной окраине Палео-Тетиса существовала сложная геодинамическая система, включающая: две субдукционные зоны, две островные дуги, а также окраинное море и морской бассейн рифтогенного типа. Вулканиты основного состава, изливавшиеся на дне междуугового бассейна (краевого моря БК), в тылу Закавказской островной дуги, или в пределах интрадугового рифта СФЗ ПХ в тылу островной дуги БК, имели характеристики близкие к базальтам *MORB* типа и метки надсубдукционных образований. С течением времени они были вовлечены в геотектонические процессы и, погрузившись на умеренные глубины в пределах развинутой в этот период земной коры, в результате локальных сверхдавлений и местных повышений температуры, претерпели эклогитовое перерождение. В дальнейшем, в период формирования сложно деформированной аллохтонной структуры Передового хребта, а также в результате позднегерцинских, киммерийских и альпийских движений, и эрозионной деятельности рек Эк., оказались на современной поверхности.

## Выводы

Изучены петрохимические и геохимические особенности Эк., в разрезах пород «балканской» и «лабарданской» свит, развитых в СФЗ ПХ БК. Показано, что они являются Эк. базальтового типа, образовавшимися по умеренно-титанистым, умеренно-глиноземистым и умеренно-магнезиальным, низко-калиевым базальтам при  $T = 580-650^{\circ}\text{C}$  и  $P = 8,5-13,5$  кбар. Предполагается, что исходный расплав, из которого образованы Эк., формировался при 8-15% плавлении шпинелевых перидотитов.  $Ni/Co$  отношение  $\Sigma/n = 2,9$  соответствует показателю мантийных выплавов, варьирующему в пределах 2,5-5,0. Низкие значения  $Mg\# = 0,55$  указывают на возможные явления предварительной дифференциации расплава. Положительные европиевая ( $Eu/Eu^* = 0,95-2,75$ ) и стронциевая аномалии допускают изначальную аккумуляцию плагиоклаза в вулканитах. Несовместимые элементы и *REE*, нормированные по *N-MORB* и хондриту [San, McDonough, 1989], образуют спектры линий, близких к базальтам *MORB* типа и в то же время отличаются от последних присутствием отрицательных аномалий высокозарядных элементов (Nb, Ta, Zr, Hf). На основании анализа диаграмм и геохимических данных и с учетом известных палеотектонических реконструкций Кавказского региона сделано предположение о том, что протолитом при их образовании являлись вулканиты накопившиеся в раннепалеозойское время в краевом море БК в тылу Закавказской островной дуги, или в пределах интрадугового рифта ПХ в тылу островной дуги БК.

## Литература

1. Адамия Ш. А., Габуня Г. Л., Кутелия З. А. и др. Характерные черты тектоники Кавказа. // Сб. научн. трудов «Геодинамика Кавказа». – М.: Наука, 1989. – С. 3-15.
2. Афанасьев Г. Д., Плошко В. В., Шпорт Н. П. Эклогит Передового хребта Северного Кавказа. // Доклады АН СССР. – 1969. – Т. 187. №6. – С. 1379-1382.
3. Гусев Г. С., Кудрявцев Ю. К., Гушин А. В. и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.
4. Добрецов Н. Л., Соболев Н. В., Шацкий В. С., и др. Эклогиты и глаукофановые сланцы в складчатых областях. – Новосибирск: Наука, 1989. – 217 с.
5. Закруткин В. В. Основные парачарнокиты. – Ростов-на-Дону: Изд. Рост. ун-та, 1981. – 216 с.
6. Кушев В. Г. Виноградов Д. П. Метаморфогенные эклогиты. – Новосибирск: Наука, 1978. – 105 с.
7. Лебедев В. А., Чернышев И. В., Чугаев А. В. и др. Геохронология извержений и источники вещества материнских магм вулкана Эльбрус (Большой Кавказ): результаты К-Ar и Sr-Nd-Pb изотопных исследований. // Геохимия. – 2010. – №1. – С. 45-73.
8. Плошко В. В., Шпорт Н. П. Формация эклогитов Большого Кавказа. // Изв. АН СССР. Сер. Геол. – 1974. – С. 60-71.
9. Плошко В. В., Шпорт Н. П., Князева Д. Н. Новые находки эклогитов на Кавказе. // ДАН СССР. – 1977. – Т. 236. №5. – С. 1196-1198.
10. Скляр Е. В., Гладкочуб Д. П., Донская Т. В. и др. Интерпретация геохимических данных. – М.: Центр «Интеграция», 2001. – 273 с.
11. Татришвили Н. Ф. Об открытии эклогитов на Большом Кавказе. // ДАН СССР. – 1970. – Т. 190. №4. – С. 944-946.
12. Удовкина Н. Г. Эклогиты СССР. – М.: Наука, 1985. – 257 с.
13. Шенгелия Д. М., Кориковский С. П., Чичинадзе Г. Л. и др. Петрология метаморфических комплексов Большого Кавказа. – М.: Наука, 1991. – 221 с.

14. Школьник С. И., Резницкий Л. З., Беличенко В. Г., Бараш И. Г. Геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация метавулканитов Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион). // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50. №9. – С. 1013-1024.
15. Cabanis B., lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour ladiscrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de mélange et/ou contamination crustale. // *C.R. Acad. Sci. Ser. II*. – 1989. – V. 309. – Pp. 2023-2029.
16. Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. – *Lithos*. – 2005. – V. 79. – Pp. 491-504.
17. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1973. – V. 19. – Pp. 290-300.
18. Shervais J. W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1982. – V. 59. – Pp. 101-118.
19. Sun S. S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // *Geol. Spec. Publ.* – 1989. – No. 42. – Pp. 313-345.
20. Wood D.A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1980. – V. 50. – Pp. 11-30.

## References

1. Adamiya Sh.A., Gabuniya G.L., Kuteliya Z.A., et al. Characteristic features of Caucasus tectonics. In: Proceedings “Geodynamics of the Caucasus”. Moscow. Nauka, 1989. pp. 3-15. (In Russ.)
2. Afanas'ev G. D., Ploshko V.V., Shport N.P. Eclogite of Peredovoi Range of the North Caucasus. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1969. Vol. 187. No. 6. pp. 1379-1382. (In Russ.)
3. Gusev G. S., Kudryavtsev Yu.K., Gushchin A.V. et al. Geochemical and metallogenic specialization of structural-material complexes. St. Petersburg, VSEGEI, 1999. 514 p. (In Russ.)
4. Dobretsov N.L., Sobolev N.V., Shatskii V.S. et al. Eclogites and glaucophane schists in folded areas. Novosibirsk. Nauka, 1989. 217 p. (In Russ.)
5. Zakrutkin V.V. The main paracharnokites. Rostov-on-Don. Publishing House Rostov University, 1981. 216 p. (In Russ.)
6. Kushev V.G., Vinogradov D.P. Metamorphogenic eclogites. Novosibirsk. Nauka, 1978. 105 p. (In Russ.)
7. Lebedev V.A., Chernyshev I.V., Chugaev A.V. et al. Geochronology of eruptions and sources of maternal magma from the Elbrus volcano (Greater Caucasus): results of K-Ar and Sr-Nd-Pb isotope studies. *Geochemistry*. 2010. No. 1. pp. 45-73. (In Russ.)
8. Ploshko V.V., Shport N.P. The eclogite formation of the Greater Caucasus. In: *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Geol.* 1974. pp. 60-71. (In Russ.)
9. Ploshko V.V., Shport N.P., Knyazeva D.N. New finds of eclogites in the Caucasus. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1977. Vol. 236. No. 5. pp. 1196-1198. (In Russ.)
10. Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V. et al. Interpretation of geochemical data. Moscow. Center “Integratsiya”, 2001. 273 p. (In Russ.)
11. Tatrishvili N.F. About the discovery of eclogites in the Greater Caucasus. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1970. Vol. 190. No. 4. pp. 944-946. (In Russ.)
12. Udovkina N. G. Eclogites of the USSR. Moscow. Nauka, 1985. 257 p. (In Russ.)
13. Shengeliya D.M., Korikovskii S.P., Chichinadze G.L. et al. Petrology of metamorphic complexes of the Greater Caucasus. Moscow. Nauka, 1991. 221 p. (In Russ.)
14. 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 Tunkinsk terrane (Baikal-Khubsugul region). *Geology and geophysics*. 2009. Vol. 50. No. 9. pp. 1013-1024. (In Russ.)

15. Cabanis B., lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour ladiscrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus de mélange et/ou contamination crustale. C. R. Acad. Sci. Ser. II. 1989. Vol. 309. pp. 2023-2029.
16. 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.
17. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth Planet. Sci. Lett. 1973. Vol. 19. pp. 290-300.
18. Shervais J.W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. Earth Planet. Sci. Lett. 1982. Vol. 59. pp. 101-118.
19. Sun S. S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. Geol. Spec. Publ. 1989. No. 42. pp. 313-345.
20. Wood D.A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth Planet. Sci. Lett. 1980. Vol. 50. pp. 11-30.

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.243

DOI: [10.46698/VNC.2020.58.70.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.58.70.002)

Оригинальная статья

## Складчатая структура южного склона Большого Кавказа в пересечении ущелья реки Ксани

Т. В. Гиоргобиани<sup>1, 2</sup>, Д. П. Закарая<sup>3</sup><sup>1</sup>Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили, Грузия, 0179, г. Тбилиси, пр. Чавчавадзе, 1;<sup>2</sup>Геологический институт им. А.И. Джанелидзе, Грузия, 0186, г. Тбилиси, ул. Политковской, 31, e-mail: ciala\_gugava@mail.ru;<sup>3</sup>НЮЛ «Геологи», Грузия, Тбилиси, 0174, ул. Я. Николадзе 5, e-mail: d\_zakara@yahoo.com*Статья поступила: 01.04.2020, доработана: 08.06.2020, одобрена в печать: 11.06.2020*

**Резюме: Актуальность работы.** В статье рассмотрена складчатая структура Большого Кавказа в пересечении ущелья р. Ксани, которая все еще недостаточно изучена. Вместе с тем исследование складчатости Большого Кавказа имеет решающее значение для выяснения условий формирования современной складчатой структуры региона. **Цель работы.** Установление важных особенностей складчатости Большого Кавказа необходимых для выявления причин и механизмов образования его структуры, представляющих еще не до конца решенную проблему. **Методика** исследований заключалась в весьма детальной зарисовке складчатости региона вдоль ущелья р. Ксани в масштабе 1:1000, что позволяло фиксировать все особенности изучаемой структуры. Составленный при полевых исследованиях разрез был уменьшен до 1:50000 масштаба. Полученный геолого-структурный профиль достаточно полно и точно отражает основные черты структурного строения региона. **Результаты.** В изученном разрезе установлен ряд новых важных особенностей складчатой структуры, сложенной из мезозойско-кайнозойских толщ. Выявлена многопорядковость и разновозрастность складчатых структур и их субширотное простирание. Структуры первого порядка являются более ранними складками и представлены асимметричными наклоненными на юг сильно сжатыми складками, шириной 1-3 км. Более поздние складки высоких порядков, осложняющие крупные структуры, тоже тесно сжаты, асимметричны и характеризуются падением осей складок на север. Размер их колеблется в широких пределах – от 0.5 м до нескольких десятков метров. Субширотная ориентировка складчатости указывает на то, что она сформировалась в другой обстановке деформации, чем основная северо-западная структура Большого Кавказа. **Обсуждение результатов и выводы.** Установленный характер складчатости свидетельствует о различном генезисе структур в процессе двухэтапной разноплановой деформации региона. Выяснено, что на первом доверхнеорогенном этапе дислокации (юра-средний миоцен) Кавказ испытал северо-восточное тангенциальное сжатие, вызванное придвиганием и прижатием Черноморско-Закавказского микроконтинента к Большому Кавказу. В результате в регионе была сформирована основная линейная складчатая структура северо-западного простирания, крупные региональные разломы и слоевой кливаж. На втором позднеорогенном этапе деформации (поздний миоцен-антропоген) складчатая структура Большого Кавказа испытывала косое субмеридиональное горизонтальное сжатие. Установлено, что причиной деформации явилось долготное придвигание Ксанского шоля, блока микроконтинента и его внедрение в складчатую структуру Большого Кавказа. Эти дислокации способствовали возникновению в регионе наложенной на раннюю структуру поздней малой складчатости, мелких разрывов скалывания и секущего кливажа субширотного направления. Сделан вывод, что в указанных условиях, разными механизмами дислокации была образована современная сложная складчатая структура южного склона Большого Кавказа в пересечении ущелья р. Ксани в альпийском цикле тектогенеза региона.

**Ключевые слова:** Большой Кавказ, Ксани, складчатая структура, этапы деформации, механизм формирования, геодинамика, тангенциальное сжатие, зональность структуры, фазы складчатости.

**Для цитирования:** Гиоргобиани Т. В., Закарая Д. П. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 22-37. DOI: 10.46698/VNC.2020.58.70.002.

---

---

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

---

---

DOI: [10.46698/VNC.2020.58.70.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.58.70.002)

Original paper

## Folding Structure of the South Slope of the Great Caucasus in Crossing the Gorge of the River Ksani

T. V. Giorgobiani <sup>1,2</sup>, D. P. Zakaraia <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 1 Chavchavadze Ave., Tbilisi 0179, Georgia;

<sup>2</sup>Al. Djanelidze Geological Institute, 31 A. Politkovskaia Str., Tbilisi 1086, Georgia, e-mail: ciala\_gugava@mail.ru

<sup>3</sup>NPLE "Geologi", Georgia, 0174, Tbilisi, I. Nikoladze str., 5, e-mail: d\_zakara@yahoo.com

*Received: 01.04.2020, revised: 08.06.2020, accepted: 11.06.2020*

**Abstract: Relevance.** The article considers the folded structure of the Greater Caucasus at the intersection of the gorge of the river Ksani, who is still not well understood. At the same time, the study of the folding of the Greater Caucasus has crucial significance for the determination of the conditions of formation of the modern folded structure of the region. **Aim.** The establishment of important features of the Greater Caucasus folding essential for identification of the reason and mechanisms of its structure formation, which are not yet fully resolved problem. The research **methodology** was a very detailed sketching of the folding of the region along the river Ksani gorge in a scale of 1:1000, which allowed to record all the features of the studied structure. The section compiled during field studies was reduced to 1:50000 scale. The resulting geological and structural profile sufficiently fully and accurately reflects the main features of the structural construction of the region. **Results.** In the studied section, a number of new important features of the folded structure of its Mesozoic-Cenozoic strata are established. First of all is revealed, it should be noted that the fold structures are multi-order and of different ages and of sublatitudinal strike. The first-order structures are earlier folds and are represented by asymmetric southwardly declined highly compressed 1-3 km wide folds. Complicating later large structures folds of higher orders are also tightly compressed, asymmetric with the axes dipping to the north. Their sizes vary widely – from 0.5 m to several tens of meters. The sublatitudinal strike of the folding indicates that it formed in a different deformation environment than the main northwestern structure of the Greater Caucasus. **Discussion of the results and conclusions.** Established character of folding indicates a different genesis of the structures during the two-stage diverse deformation of the region. It was found that at the first suprahorogenic stage of dislocation (Jurassic-Middle Miocene), the Caucasus experienced northeast tangential contraction caused by the pulling and pressing of the Black Sea-Transcaucasian microcontinent to the Greater Caucasus. As a result, the main linear folded structure of the northwestern strike, large regional faults, and layered cleavage were formed in the region. At the second latehorogenic stage of deformation (Late Miocene-Anthropogene), the folded structure of the Greater Caucasus experienced oblique submeridional horizontal compression. It is established that the cause of the deformation was the longitudinal movement of the Ksani schol, a block of the microcontinent and its emplacement into the folded structure of the Greater Caucasus. These dislocations in the region contribute generation of the late low folding superimposed on the early structure, small shear faults, and crosscutting cleavage of the sub-latitudinal direction. It is concluded that, under indicated conditions, by different dislocation mechanisms was formed the modern complex folded structure of the southern slope of the Greater Caucasus at the intersection of the river Ksani gorge during the alpine cycle of regional tectogenesis.

**Keywords:** Greater Caucasus, Ksani, folded structure, deformation stages, formation mechanism, geodynamics, tangential compression, structure zonality, folding phases.

**For citation:** Giorgobiani T. V., Zakaraia D. P. Folding Structure of the South Slope of the Great Caucasus in Crossing the Gorge of the River Ksani. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (2): 22-37. DOI: 10.46698/VNC.2020.58.70.002.

## Введение

Рассматриваемая территория Большого Кавказа расположена в его южной краевой части вдоль границы с Картлийской подзоной Куринской молассовой впадины Закавказской межгорной области. В схеме тектонического расчленения Грузии изученный регион в основном входит в Жинвали-Гомборскую подзону Местиа-Тианетской тектонической зоны складчатой системы Большого Кавказа (БК). С севера эта подзона граничит с более широкой и протяженной Шови-Пасанаурской подзоной названной тектонической зоны [Гамкрелидзе, 1964].

Несмотря на хорошую геологическую изученность БК, характерные особенности его складчатой структуры, все еще недостаточно выявлены. Поэтому она в настоящее время нуждается в дальнейшем более детальном и всестороннем исследовании. Вместе с тем установление характера складчатости БК имеет решающее значение для выяснения механизмов и геодинамики современной структуры рассматриваемого региона.

Река Ксани вкрест пересекает обе подзоны Местиа-Тианетской зоны, а также прилегающую к ней с юга Картлийскую молассовую депрессию, расположенную на Черноморско-Закавказском (ЧЗ) микроконтиненте (микроплите). Наши исследования были проведены на участке ущелья р. Ксани между сс. Икоти и Ларгвисси, охватывающем целиком Жинвали-Гомборскую подзону, а также краевые части смежных с ней подзон. Геологическое строение участка приведено на карте (рис. 1).

Слагающие рассматриваемую полосу мезозойско-кайнозойские толщи протягиваются в целом в субширотном направлении вдоль ущелья р. Ксани, меняя простирания за его пределами на юго-западное и на северо-западное.

Данная территория была детально изучена авторами с целью установления основных особенностей складчатой структуры южного склона Большого Кавказа. Данная работа была проведена по общей программе региональных исследований, предусматривающая изучение складчатости и механизма формирования складчатой системы Большого Кавказа.

## Методы исследования

Методика исследования заключалась в весьма детальной, почти непрерывной зарисовке складчатой структуры, в основном, вдоль автомобильной дороги, а иногда и в русле р. Ксани и ее притоков. Масштаб этих зарисовок (1:1000) был выбран так, чтобы отразить почти все особенности исследуемой складчатой структуры. При этом изучались морфология и размеры складок в зависимости от литологического состава пород, мощности слоев и места расположения в структуре, а также закономерности соотношения мелких и крупных складок. Исследования складчатости сопровождалась систематическими наблюдениями над кливажом и разрывными нарушениями разного масштаба.

В процессе изучения тектонической структуры района, нами был составлен геолого-структурный профиль-разрез, протяженностью 12,2 км. Этот разрез, изобра-

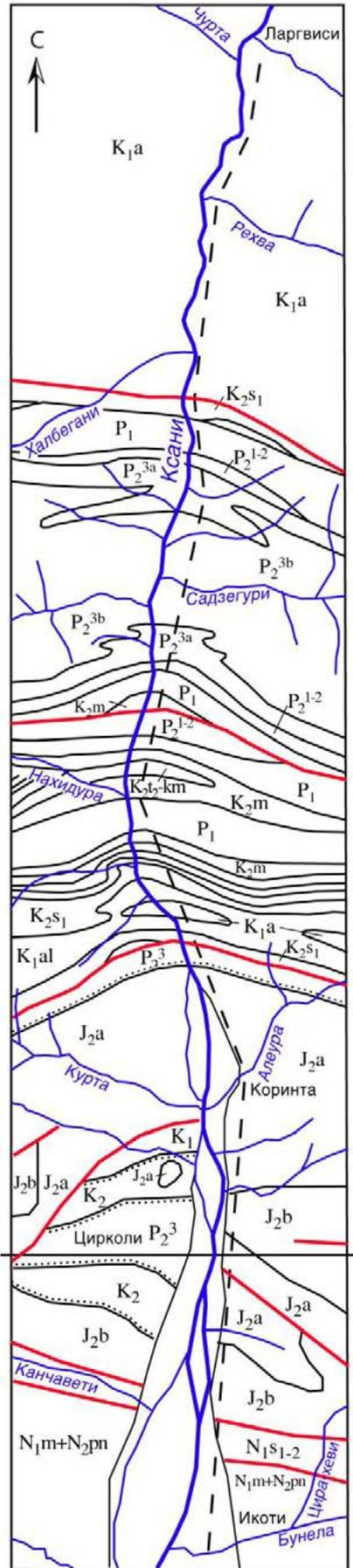


Рис. 1. Геологическая карта южного склона Большого Кавказа вдоль ущелья р. Ксани

**N<sub>1m</sub>-N<sub>2pn</sub>** – Миоцен-Плиоцен. Мэотис-понт. **N<sub>1s1-2</sub>** – Миоцен. Нижний и средний сармат. Палеоген. **P<sub>2</sub><sup>3b</sup>** – Верхний эоцен. Верхняя свита. **P<sub>2</sub><sup>3a</sup>** – Верхний эоцен. Нижняя свита. **P<sub>2</sub><sup>1-2</sup>** – Нижний и средний эоцен. **P<sub>1</sub>** – Палеоген. Верхний мел. **K<sub>2m</sub>** – Маастрихт. **K<sub>2</sub>-km** – Турон-кампан. **K<sub>2s2</sub>** – Верхний сеноман. **K<sub>2s1</sub>** – Нижний сеноман. **K<sub>2</sub>** – Нерасчлененный. Нижний мел. **K<sub>1al</sub>** – Альб. **K<sub>1a</sub>** – Апп. **K<sub>1</sub>** – Нерасчлененный. Средняя юра. **J<sub>2b</sub>** – Байос. **J<sub>2a</sub>** – Аален. Толстые линии – разломы. Пунктир – линия геолого-структурного профиля. /

Fig. 1. Geological map of the southern slope of the Greater Caucasus along the gorge of the river Ksani. **N<sub>1m</sub>-N<sub>2pn</sub>** – Miocene-Pliocene. Meotis Pont. **N<sub>1s1-2</sub>** – Miocene. Lower and middle Sarmatian. Paleogene. **P<sub>2</sub><sup>3b</sup>** – Upper Eocene. Upper Suite. **P<sub>2</sub><sup>3a</sup>** – Upper Eocene. Lower Suite. **P<sub>2</sub><sup>1-2</sup>** – Lower and Middle Eocene. **P<sub>1</sub>** – Paleocene. Upper Cretaceous. **K<sub>2</sub>-km** – Turon – Campan. **K<sub>2s2</sub>** – Upper Cenomanian. **K<sub>2s1</sub>** – Lower Cenomanian. **K<sub>2</sub>** – Unpartitioned. Lower Cretaceous. **K<sub>1al</sub>** – Alb. **K<sub>1a</sub>** – Apt. **K<sub>1</sub>** – Unpartitioned. Middle Jurassic. **J<sub>2b</sub>** – Bayos. **J<sub>2a</sub>** – Aalen. Thick lines are faults. The dotted line is the line of the geological and structural profile.

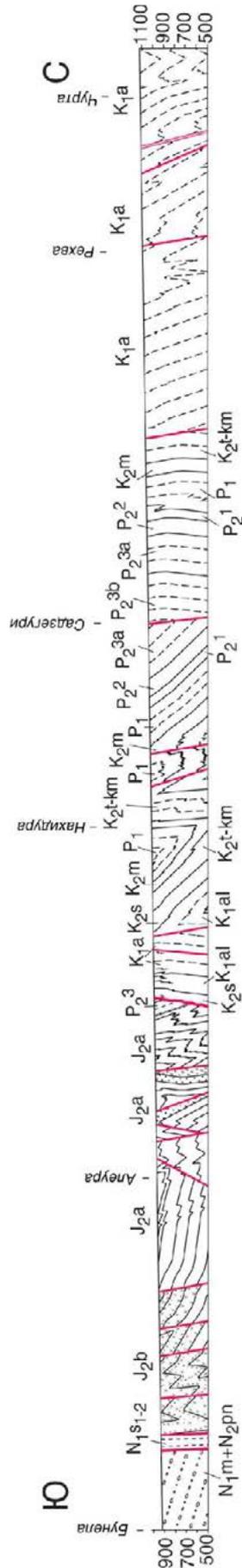


Рис. 2. Геолого-структурный разрез южного склона Большого Кавказа в пересечении ущелья р. Ксани. /

Fig. 2. Geological and structural section of the southern slope of the Greater Caucasus at the intersection of the gorge of the river. Ksani.

женный в крупном масштабе, громоздок и плохо обозрим. Поэтому он был уменьшен до масштаба 1:50000, с сохранением по возможности относительных размеров и морфологии складок (рис. 2). Несмотря на некоторую упрощенность рисовки, особенно сложнодислоцированных участков, в своей принципиальной основе разрез довольно полно и точно отражает основные особенности складчатой структуры Ксанского пересечения южного склона БК. Поэтому по нему определялись общая морфология складчатости и характер крупных разрывных нарушений, а также уточнялись мощности отдельных стратиграфических единиц мезозойско-кайнозойских отложений изученной полосы.

Рассматриваемый регион в разные годы исследовали [Адамия, 1958; Варенцов, 1950; Вассоевич, 1941; Гамкрелидзе, 1964; Канделаки, 1975; Кахадзе, Канделаки, 1946; Шириашвили и др., 1960] и многие другие геологи, которые внесли большой вклад в изучение геологического строения, в том числе тектонической структуры этой и соседних с ней территорий. На основе проведенных исследований авторами получены новые материалы о складчатой структуре южного склона БК и механизмах ее формирования. Они существенно отличаются от современных представлений, изложенных в литературе по этой проблеме [Adamia, 1975; Adamia et al., 1977, 2017; Ershov, 2004; Gamkrelidze, 1986, 1997; Gamkrelidze, Giorgobiani, 1990; Philip et al., 1989]. В предлагаемой статье нет возможности рассмотреть мнения, которые высказывались перечисленными авторами по этому вопросу. Интересующихся данными читателей мы отсылаем к приложенному списку публикаций.

### Складчатая структура

Складчатая структура данного пересечения являлась предметом наших специальных исследований и, естественно, заслуживает более подробной характеристики. Описание складчатости региона приводится по профилю (рис. 2) с юга на север по стратиграфическим подразделениям, выделенным на геологической карте (рис. 1). При этом основное внимание уделено тем структурным элементам, которые ранее были изучены недостаточно или не рассматривались вообще.

Разрез начинается от левого притока р. Ксани Бунела, где за с. Икоти обнажена мэотис-понтская конгломератовая толща. Она имеет субширотное ( $280^\circ$ ) простирание и нечетко выраженную слоистость, которая полого (до  $20^\circ$ ) наклонена на север. Далее вдоль профиля обнажения не наблюдаются, но к востоку от разреза в правом притоке р. Бунела Цира-Хеви выходят глины и песчаники ниже-среднего сармата. Они соприкасаются с мэотис-понтскими отложениями тектонически, по крутопадающему ( $85^\circ$ ) на север взбросу. Сарматская толща, залегающая субвертикально ( $85\text{--}88^\circ\text{С}$ ) и имеющая субширотное ( $270\text{--}275^\circ$ ) простирание, продолжается выше по притоку на расстоянии 150 м, после чего выходят туфо-брекчии байоса. Контакт между этими толщами не наблюдается и скорее всего он представлен крутопадающим ( $80\text{--}85^\circ$ ) на север разломом.

Далее выше по течению р. Цира-Хеви обнажены туфобрекчии, туфы и туфопесчаники байоса, которые круто ( $80\text{--}85^\circ$ ) наклонены на север. Протяженность вулканогенных пород байоса здесь составляет 120 м. Севернее по притоку через 90 м фиксируется антиклинальный перегиб пластов, за которым обнажено его пологое крыло, падающее под углом  $40^\circ$  на север. Оно протягивается на 120 м и в конце срезается крутым ( $85^\circ$ ) наклоненным на север взбросом.

Далее описание складчатой структуры этого пересечения дано по наблюдениям вдоль левого борта ущелья р. Ксани. В начале этого отрезка профиля обнажены песчано-глинистые отложения аалена, которые имеют субширотное простирание и по-

логий ( $40\text{--}50^\circ$ ) наклон к северу. Ааленская толща протягивается по разрезу на расстояние 650 м, где проходит крутопадающий ( $80^\circ$ ) на север взброс. Средняя часть участка нарушена крутым ( $80^\circ$ ) наклоненным на север разломом. В первом блоке, протяженностью 400 м, развиты наклоненные на юг сильно сжатые складки, размерами от нескольких десятков метров до 150 м. Во втором блоке, шириной 250 м, ааленские отложения слагают пологую ( $40\text{--}50^\circ$ ) моноклиналию.

Далее по профилю, вновь обнажена вулканогенная толща байоса, которая прослеживается на расстоянии 340 м и в общем моноклиналию падает под углами  $35\text{--}45^\circ$  на север. На этом участке выходы отложений байоса расположены высоко по склону ущелья и поэтому труднодоступны для наблюдения. Кроме того, установление элементов залегания вулканогенной толщи не всегда представляется возможным. На некоторых местах разреза простирания слоев изменяются от субширотного до субмеридионального. В связи с этим на профиле наклон пластов показан несколько в искаженном виде. В конце этого отрезка проходит крутопадающий ( $80^\circ$ ) на север взброс, за которым расположены отложения ааленского возраста. Далее складчатая структура меняет свое простирание с субширотного на северо-западное ( $320\text{--}330^\circ$ ), а затем на субмеридиональное ( $345\text{--}360^\circ$ ). Такое простирание структуры продолжается до левого притока р. Ксани Алеура на протяжении почти 1,2 км. Развитое в пределах этого участка долготное направление складчатости, ааленские песчано-глинистые отложения, в целом наклонены под углами  $40\text{--}50^\circ$ , но уже на восток. В связи с субпараллельностью линии профиля и простирания складчатости ее структуры на разрезе представляет пологую ( $5\text{--}10^\circ$ ), наклоненную на север моноклиналию. На некоторых участках разреза она осложнена сильно сжатыми складками шириной от нескольких десятков метров до 100 м.

Осевые поверхности их субвертикальны или падают на восток под углами  $60\text{--}80^\circ$ . Особенно часто мелкие складки развиты вблизи р. Алеура, где происходит изменение простирания структур с субмеридионального на северо-западное. В глинистых слоях ааленской толщи развит несовершенный кливаж параллельный напластованию, с толщиной пластин 3-10 мм.

Далее на север за р. Алеура на протяжении 600 м продолжают выходы ааленских отложений. Это толща в целом также имеет моноклиналию структуру, наклоненную на север под углами  $45\text{--}60^\circ$ , которая местами осложнена дополнительной многопорядковой складчатостью. Здесь развиты, как почти симметричные, так и асимметричные сильно сжатые структуры, с падением осевых поверхностей под углами  $60\text{--}80^\circ$ . Они осложняют в основном пологопадающие слои или замки сравнительно крупных складок, шириной до 70 м. Мелкие складки имеют разные размеры – от 0,5-1 м до 2-30 м. В пологонаклонных пластах аргиллитов наблюдается едва заметный, параллельный напластованию кливаж с толщиной пластин 3-10 мм. На крутых крыльях складчатых структур в глинистых сланцах развит совершенный кливаж параллельный слоистости, толщина пластин которого составляет 1-5 мм. На этом сложноскладчатом участке профиля расположены три крупных разлома, из которых один круто ( $75^\circ$ ) падает на север, а два наклонены на юг под углами  $60\text{--}80^\circ$ .

Завершает этот интервал мощная (более 70 м) пачка толстослоистых, мощностью 0,5-5,0 м, песчаников, которая по крутопадающему ( $75^\circ$ ) на север разлому контактирует с другой толщей глинистых сланцев и песчаников. Суммарная мощность пород в зоне разлома достигает 330 м. С севера они ограничиваются крутопадающим ( $85^\circ$ ) разломом.

Далее за разломом тонкослоистая ааленская терригенная толща, имеющая субширотное ( $260\text{--}275^\circ$ ) простирание круто ( $80\text{--}85^\circ$ ) падает на север. Общее крутое падение слоев осложнено многочисленными сильно сжатыми, нередко почти изоклинальными, угловатыми, малыми складками разного порядка. Они имеют узкие острые замки и крутые крылья, изменчивые размеры. Мощность их меняется в больших пределах – от первых метров до 5-20 м. Они, как правило, асимметричны и опрокинуты на юг, осевые поверхности их под углами  $65\text{--}70^\circ$  наклонены на север. Эти пликативные мелкие структуры, очевидно, образовались в результате вдоль пластовых сдвиговых смещений, возникающих в обстановке косоугольного сжатия субвертикальной моноклинали.

Далее на север на ааленские отложения трансгрессивно залегают отложения верхнего эоцена, мощностью около 100 м, которые представлены крутыми ( $70\text{--}80^\circ$ ) моноклинально падающими на север пластами. Они сложены аргиллитами, мергелями, алевролитами, тонко- и мелкозернистыми песчаниками, иногда известковистыми. В этой толще развит кливаж параллельный напластованию, толщины пластинок которого составляют 1-5 мм. В верхней части они переходят в микситовый комплекс, который содержит многочисленные включения различных пород, более древних, чем вмещающие образования. Последние представлены обломками, валунами и глыбами, главным образом, верхнеюрских рифогенных известняков, а также алевролитов, аргиллитов, песчаников ааленской толщи и очень редко порфиритов байоса. Матрикс в брекчиях имеет тот же состав, что и обломки. Размеры микситового материала достигают в длину 5 м, в ширину 3 м. Вверху этих отложений расположены большие блоки верхнеюрских известняков, размеры которых составляют десятки метров в поперечнике. Этот глыбовый комплекс по своему внутреннему строению принадлежит к классу тектоногравитационных микситов [Леонов, 2007].

К северу микситовый комплекс сменяет верхнемеловая-нижнесеноманская флишевая толща. Видимый контакт между ними субвертикальный, но неровной изогнутой формы, который на глубине, возможно, имеет крутое (до  $80^\circ$ ) падение на юг.

Обнажающиеся севернее нижнесеноманские отложения слагают южное крутое крыло наклоненной на юг крупной антиклинали. Толща, имеющая в общем субширотное ( $260\text{--}275^\circ$ ) простирание и крутое ( $80\text{--}85^\circ$ ) южное падение сильно дислоцирована. Это выражается в развитии мелких дополнительных складок, представленных многопорядковыми структурами, размер которых колеблется в широких пределах – 0,5-8 м.

Далее по профилю на север сеноманские породы постепенно переходят в альбские отложения. Эта толща тоже имеет близширотное простирание, залегают субвертикально и в основном под углом  $85^\circ$  наклонена на север. Крутопадающие пачки пород осложнены мелкими разномасштабными тесно сжатыми складками, шириной 1-5 м. Они имеют узкие острые замки и, как правило, опрокинуты на юг. Осевые плоскости их падают на север под углами  $70\text{--}80^\circ$ . Дополнительная складчатость, очевидно, представляет собой складки волочения, возникшие в результате вдоль пластового сдвигового перемещения субвертикальной толщи в процессе сильного косоугольного горизонтального сжатия. В пологих крыльях мелких складок развит секущий пласты аргиллитов довольно интенсивный кливаж, простирание которого  $265^\circ$ , угол падения  $80^\circ\text{СЗ}$ . В крутых ( $85^\circ$ ) слоях в глинистых породах отмечается кливаж параллельный напластованию.

Севернее по разрезу альбские породы сменяются аптскими отложениями, которые имеют близширотные ( $260\text{--}275^\circ$ ) простирания и крутые ( $80^\circ$ ) падения на

север. В аргиллитовых слоях развит кливаж, поверхности которого, в основном, параллельны напластованию. Но одновременно имеются аномальные участки, где в глинистых породах наблюдается секущий кливаж, который залегает вертикально, либо очень круто ( $85-88^\circ$ ) наклонен на юг. Толщина их пластин колеблется в пределах 0,5-3 мм. Моноклиальная структура крутого крыла антиклинали на этом участке местами осложнена мелкими, шириной первые метры, редко до 15 м, сильно сжатыми складками. Осевые поверхности их, в основном, под углами  $60-70^\circ$ , наклонены на север.

Далее на север отложения апта срезаны по крутопадающему ( $80^\circ$ ) на север разлому, за которым вновь выходит альбская толща. Она слагает замковую часть крупной антиклинали, которая имеет узкую угловидную форму с крутым ( $80^\circ$ ) южным и более пологим ( $55^\circ$ ) падающим на север крыльями. Альбская толща, слагающая пологое крыло смежной синклинали, прослеживается на север на протяжении около 70 м и затем согласно сменяется отложениями сеноманского возраста. Последние залегают моноклиально, с падениями слоев под углами  $35-50^\circ$  на север. В пластах аргиллитов параллельно напластованию развит слоевой кливаж. Местами наблюдается интенсивная деформация толщи, которая выражается в образовании мелкой, шириной 0,5-5 м, дополнительной тесно сжатой, иногда изоклиальной, наклоненной на юг складчатости.

Далее на север по профилю сеноманские породы сменяет турон-кампанская карбонатная толща. Она простирается субширотно ( $265-280^\circ$ ) и полого ( $40-45^\circ$ ) моноклиально наклонена на север. Кливаж развит селективно, только в аргиллитах и мергелях. Поверхности их расположены параллельно слоистости, но наблюдается и секущее их расположение. Толщина пластинок колеблется в пределах 1-3 мм.

Далее в пологом крыле синклинали выходят маастрихтские и палеоценовые флишевые отложения, которые имеют субширотные ( $260-280^\circ$ ) простирания и пологие падения ( $40-45^\circ$ ) на север. Кливаж, который развит только в слоях аргиллитов и мергелях в основном параллелен напластованию. Толщина пластин кливажа составляет 1-3 мм, редко достигает 5 мм. Но наряду с этим встречаются участки, где кливажные плоскости занимают резко секущее положение по отношению к слоистости. Пологое крыло структуры часто осложнено тесно сжатыми складками, с крутыми ( $65-80^\circ$ ) крыльями и узкими острыми замками, ширина которых составляет 1-3 м.

Затем по разрезу на север обнажено ядро синклинали, сложенное нижнепалеогеновой толщей. Оно осложнено дополнительными мелкими, размером до 5 м, сильно сжатыми, складками с острыми замками и крутыми крыльями. Складки опрокинуты на юг, осевые плоскости их падают на север под углами  $50-55^\circ$ .

Крутое крыло синклинали, расположенное напротив правого притока р. Ксанди Нахидура, представлено палеоценовыми и маастрихтскими отложениями. Они представлены опрокинутым на юг пластами, которые имеют субширотные ( $260-275^\circ$ ) простирания и крутые ( $80-85^\circ$ ) падения на север. В аргиллитовых и мергеловых слоях отмечаются круто ( $70-80^\circ$ ) наклоненные на север поверхности кливажа, секущие слоистость и также ориентированные субширотно. Характерной особенностью этого крыла синклинали является широкое развитие в нем пачек с дополнительными изгибами пластов по падению, особенно часто встречаемые в тонкослоистых породах. Наблюдается также осложнение крутых слоев сильно сжатыми мелкими складками с узкими замками, шириной первые метры.

Далее на север на профиле выходят турон-кампанские флишевые отложения, которые слагают крутое смежное крыло описанной выше синклинали и располо-

женной севернее антиклинали. На крутом крыле антиклинали простирание пластов  $270-280^\circ$ , падение  $80-85^\circ$  СВ. Плоскости кливажа пересекают слои в тонкозернистых и мергелистых породах под углами  $55-80^\circ$  СВ, в зависимости от литологического состава пластов. На отдельных участках профиля опрокинутое крутое крыло антиклинали осложнено мелкими единичными сильно сжатыми складками с узкими замками, иногда имеющими острые стреловидные формы. Размер их колеблется в пределах 1-5 м. Кроме того в разрезе отмечается узкие зоны складчатости, шириной 30-50 м, в которых развиты тесно сжатые, опрокинутые на юг складки, размером 5-10 м, редко до 20 м. Осевые поверхности этих структур падают на север под углами  $55-60^\circ$ . Севернее по профилю, в турон-кампанских отложениях обнажен замок антиклинали, который имеет сильно сжатую узкую остроугольную морфологию. Далее в пологом крыле антиклинали простирание слоев представляет  $280-300^\circ$ , падения  $50-65^\circ$  на северо-восток. Кливаж развит селективно и отмечается только в мергелях, где он параллелен напластованию, а в известняках и карбонатных песчаниках кливаж не наблюдается. Протяженность пологого крыла составляет только 100 м. Большая же часть его срезана крутопадающим ( $75^\circ$ ) на север сбросом, за которым расположена Садзегурская синклинали.

Южная краевая часть пологого крыла Садзегурской синклинали к северу от разлома на протяжении 300 м осложнена мелкой разнопорядковой складчатостью. Складчатая зона сложена асимметричными наклонными и опрокинутыми на юг и почти симметричными сильно сжатыми складками, шириной 5-15 м. Они в свою очередь осложнены многочисленными более мелкими, размером 0,3-3 м, складками с острыми и узкими замками и крутыми, иногда почти параллельными крыльями. Последние в основном развиты на пологих крыльях крупных структур, но нередко осложняют замковые части складок и их крутые крылья. Простираения складчатых структур субширотные. Крылья складок всех порядков падают под углами  $50-85^\circ$  на север и на юг. Осевые плоскости большинства структур круто ( $60-85^\circ$ ) наклонены на север, редко залегают субвертикально.

Необычное расположение кливажа наблюдается в мелких дополнительных складках, развитых в пологом крыле Садзегурской синклинали ([Гиоргобиани, Закарая, 2003]). На пологих крыльях складок отмечается возникший ранее слоевой кливаж параллельный напластованию, а на крутых фиксируется секущий кливаж, образованный позже в обстановке меридионального сжатия.

К северу эта палеогеновая складчатая зона ограничена крутым ( $80^\circ$ ) падающим на север разломом, по которому маастрихтские отложения взброшены на нижнепалеогеновую толщу. Амплитуда перемещения составляет около 100 м. Верхнемеловые породы также сильно дислоцированы и представлены тесно сжатыми многопорядковыми, аналогичными с палеогеном, складчатыми структурами, продолжающимися на расстоянии 100 м.

Далее по профилю на протяжении более 1,2 км обнажена ниже- и среднепалеогеновая флишевая толща, слагающая южное пологое крыло Садзегурской синклинали. Представлена она моноклинально залегающими слоями, которые имеют субширотные ( $255-275^\circ$ ) простирания и северные падения под углами  $45-55^\circ$  и сложены в основном темно-серыми аргиллитами с прослоями песчаников. В однообразно залегающих пластах селективно развит кливаж параллельный слоистости толщи в глинистых сланцах. Толщина их пластинок в зависимости от литологического состава прослоев колеблется в пределах 1-3 мм, редко до 5 мм.

Ядро Садзегурской синклинали обнажено на правом борту ущелья р. Ксани напротив с. Садзегури. Здесь проходит крутопадающий ( $85^\circ$ ) на север сброс вдоль осевой плоскости синклинали.

Северное крутое крыло Садзегурской асимметричной наклоненной на юг синклинали, протяженностью 1,75 км, в целом, характеризуется субвертикальным моноклиналильным строением. Оно представлено толщей переслаивания от темно-серых до черных аргиллитов и серых мелкозернистых песчаников. Простираение слоистости в северной части структуры субширотное ( $275^\circ$ ), угол от  $60^\circ$  СВ до субвертикального. Кливаж селективный и развит только в глинистых сланцах. Поверхность кливажа параллельна плоскостям напластования и толщина их пластинок составляет 1-5 мм.

В средней части крутого крыла синклинали на протяжении 100 м наблюдается осложняющая его мелкая складчатость. Складки имеют узкие острые замки и крутые крылья. Они опрокинуты на юг и осевые плоскости их под углами  $70-80^\circ$  падают на север, а ширина структур составляет 5-30 м. На пологих крыльях складок отмечается развитие секущего кливажа, а на крутом развит более ранний слоевой кливаж. Эти структуры, вероятно, представляют собой складки волочения, возникшие путем сдвигового скольжения при косом сжатии крутозалегающей толщи [Ги-оргобиани, Закарая, 2003].

Северное крыло Садзегурской синклинали протягивается по профилю далее на север до крутого ( $80^\circ$ ) падающего на север разлома, вдоль которой взброшена аптская флишевая толща, относящаяся к Шови-Пасанаурской подзоне. Аптские отложения слагают здесь южное пологое крыло крупной синклинали, которая представляет собой круто ( $60-70^\circ$ ) наклоненную на север моноклинали, имеющую субширотное ( $265-280^\circ$ ) простираение. Местами ее структура осложнена дополнительными мелкими сильно сжатыми угловатыми складками, а также небольшими флексурами, шириной 1-5 м. В глинистых слоях, развит интенсивный секущий кливаж, аналогичного пластам направления, с толщиной пластин 1-3 мм.

Далее на север на протяжении 0,5 км, наблюдается сильно дислоцированное ядро синклинали, с развитием тесно сжатой многопорядковой складчатости, которая имеет меняющиеся размеры и различную морфологию. Пологие крылья структур падают под углами  $45-65^\circ$ , иногда до  $75^\circ$ , а крутые –  $70-85^\circ$ . Ширина складок колеблется в больших пределах от 0,5 до 20 м в мелких складках и от 30 до 130 м в крупных структурах. Мелкие складки осложняют как пологие, в основном, крылья, так и замки более крупных складок. В большинстве случаев наклоны осевых плоскостей складок северные под углами  $70-80^\circ$ , также наблюдаются складки с субвертикальными осевыми поверхностями.

Затем севернее до левого притока р. Ксани Рехва наблюдается моноклинали представляющая северное крыло антиклинали. Элементы залегания пластов – простираение  $280^\circ$ , падение  $45^\circ$  СВ, кливажа – простираение  $265-270^\circ$  угол наклона  $65^\circ$  на северо-восток. Вдоль р. Рехва, вероятно, проходит крупный разлом, по которому северное крыло нарушения взброшено на южное.

Далее за мостом на р. Рехва, на протяжении 250 м, наблюдается мелкоскладчатый участок симметричных и асимметричных складок, ширина которых колеблется в интервале 1-10 м, иногда до 20 м. Они сильно сжаты, имеют узкие замки и крутые крылья, с субвертикальными осевыми плоскостями или крутыми ( $70-80^\circ$ ) их падениями на север. На этом отрезке профиля развит интенсивный крутой секущий кливаж субширотного ( $265-280^\circ$ ) простираения, который под углами  $60-85^\circ$  падает на север.

Далее по профилю наблюдается моноклиальное залегание пород, протяженностью около 700 м. Элементы залегания слоев – простирание  $285^\circ$ , падение  $55-60^\circ$  СВ. Кливаж пересекает эти слои под более крутыми углами – простирание  $290^\circ$  и падение –  $70-75^\circ$  СВ. Толщина их пластинок кливажа, который развит только в глинистых породах, составляет 2-7 мм. Моноклиально падающие на север слои местами осложнены дополнительными мелкими складками, размером 1-1,5 м, иногда более крупными структурами шириной – до 70 м. Моноклиальное падение пород заканчивается у крутого ( $80^\circ$ ) разлома, падающего на север и представляющего собой взброс с поднятым северным крылом.

Сразу же за разломом обнажен участок развития мелкой, очевидно, приразломной складчатости, протяженностью более 150 м. Ширина складок составляет от 1-3 м до 10-30 м. Они, в основном, почти симметричны и их осевые плоскости очень круто ( $85^\circ$ ) наклонены на север. В дислоцированной толще распространен субширотный ( $260-280^\circ$ ) секущий кливаж, падающий на север под углами  $70-85^\circ$ .

Севернее, на расстоянии около 400 м, аптская толща залегает моноклиально и под углами  $50-60^\circ$  падает на север. Структура рассечена крутыми ( $60-70^\circ$ ) секущими слои поверхностями кливажа, которые падают на север и развиты только в глинистых сланцах.

Далее на север, на протяжении почти 400 м, до конца профиля наблюдается сильно дислоцированный участок, осложненный разнопорядковой складчатостью. Крупные складки имеют ширину 100-250 м и крутые ( $60-70^\circ$ ) крылья. Осевые плоскости их наклонены на север под углами  $80-85^\circ$ . Пологие крылья структур местами осложнены мелкими (1-20 м) дополнительными тесно сжатыми угловатыми складками, осевые плоскости которых под углами ( $60-80^\circ$ ) падают на север. В складках развит крутой ( $75-85^\circ$ ) кливаж субширотного ( $265-275^\circ$ ) простирания, но только в глинистых сланцах, с толщиной пластинок 1-3-5 мм. Описанная структура, вероятно, представляет собой часть сильно дислоцированного ядра крупной синклинальной складки.

Заканчивая описание геолого-структурного профиля, следует отметить широкое развитие в среднеюрско-палеогеновых толщах изученной территории мелких разрывов скальвания. Провести их детальную характеристику вдоль разреза не позволяет объем статьи, поэтому здесь приводятся только присущие им важные особенности.

Разрывы скальвания пересекают складчатые структуры и связанные с ними поверхности разновидного кливажа. В отличие от крупных разломов разрывы скальвания имеют значительно меньшие размеры, углы наклона и более различную кинематику. Они образуют в мезозойско-кайнозойских толщах системы новейших в основном прямолинейных мелких разрывов, имеющих субмеридиональные простирания.

Среди сколовых нарушений выделяются пологие и крутые разрывы, падающие на север или на юг. Углы наклона пологих мелких разрывов скальвания меняются от  $10^\circ$  до  $45^\circ$ , а крутых – достигают  $70-85^\circ$ . Иногда в изученном разрезе наблюдаются разрывы скальвания изогнутой листрической формы [Giorgobiani, Zakaraia, 2006, 2010, 2013]. Длина сколовых разрывов незначительна и составляет 3-10 м, а иногда – 15-30 м. Амплитуды перемещения вдоль этих разрывов колеблются в пределах от нескольких сантиметров до десятков сантиметров, редко достигают первых метров.

Крутые разрывы по характеру перемещений представляют собой взбросы или сбросы. Кинематика смещения вдоль пологих разрывов более разнообразна. По

ним, кроме выше названных, отмечаются надвиговые или обратные поддвиговые движения.

Мелкие разломы скалывания развиты в складчатых толщах в виде единичных или системных, падающих на юг или на север структур. Нередко встречается сопряженная диагональная система сколовых нарушений.

Разрывы скалывания представляют собой новейшие образования, наложенные на раннюю и более позднюю складчатые структуры. Возникают сколовые разрывы при тангенциальном сжатии уже консолидированной жесткой складчатой системы, по поверхностям максимальных скалывающих напряжений (Ажгирей, 1966; Заика-Новацкий, Казаков, 1989).

### Обсуждение результатов

В изученном пересечении установлен ряд важнейших особенностей складчато-разрывных структур и кливажа слагающих его толщ.

В первую очередь следует отметить многопорядковость, неодновременность и различный генезис складчатых структур и субширотные их простирания. Пликативные структуры первого порядка в данном разрезе являются более ранними образованиями и представлены асимметричными, наклоненными или опрокинутыми на юг, сильно сжатыми складками, шириной от 1 до 3 км. Складки второго и более высоких порядков, осложняющие крупные структуры, также тесно сжаты, с узкими острыми замками и крутыми крыльями. Размеры структур колеблются в широких пределах от 0,5 м до нескольких десятков метров, редко достигающие первых сотен метров. Они также, в основном, асимметричны и наклонены или опрокинуты на юг.

Наложение дополнительной мелкой складчатости и сокращение первичной ширины складок происходило в основном за счет смятия пологих крыльев, редко их замков. На крутых крыльях складок, осложняющая их мелкая складчатость, представляет собой складки волочения, которая возникла в результате сдвиговых смещений вдоль пластов. В моноклинально круто залегающих слоях иногда наблюдается дополнительная дислоцированность, выраженная в изгибании пластов по падению, имеющих различную морфологию. Это свидетельствует об их образовании в результате поздних деформаций. В пределах изученного профиля отмечается ряд крупных региональных нарушений субширотного направления, взбросового и сбросового характера, разграничивающих крупные тектонические структуры и стратиграфические комплексы. Кроме того, в складчатой структуре широко развиты более мелкие пологие и крутые субширотные разрывы скалывания различной кинематики. Среди сколовых нарушений иногда встречаются разрывы листрической формы, что указывает на последующие их деформации, испытанные полугими ранее возникшими прямолинейными сколами [Гиоргобиани, Закарая, 2000]. Образованы мелкие нарушения после того, когда деформации пород путем складчатых дислокаций исчерпали себя и на дальнейшее сжатие, складчатые и до предела раздавленные толщи, реагировали формированием сколовых разрывов.

В тектонической структуре изученного профиля распространен кливаж двух типов, развитый только в глинистых породах. Первый является более ранним образованием и представлен слоевым кливажом, параллельным напластованию и получившим развитие только в крупных складках. Второй тип, в основном распространенный в дополнительных мелких складках, является более поздней текстурой и представлен исключительно секущим кливажом субширотного простирания.

## Заключение

Особенности складчатой структуры изученного пересечения свидетельствуют о различном ее генезисе, происходящем в процессе двухэтапной разноплановой деформации слагающих его толщ. На первом раннеорогенном этапе дислокации (юра-средний миоцен) Кавказ испытал северо-восточное тангенциальное сжатие, вызванное придвиганием и прижатием ЧЗ микроконтинента к БК. В результате в регионе была сформирована основная линейная складчатая структура северо-западного простирания, крупные региональные разломы и слоевой кливаж. На втором позднеорогенном или новейшем этапе деформации (поздний миоцен-антропоген) складчатая структура БК испытывала косое субмеридиональное горизонтальное сжатие. Причиной деформации явилось долготное придвигание Ксанского шоля, блока ЧЗ микроконтинента и его внедрение в складчатую структуру БК [Гиоргобиани, 1999, 2005]. Смена направления тангенциального сжатия способствовала возникновению в регионе, наложенной на раннюю структуру, поздней малой складчатости субширотной ориентации, мелких разрывов скалывания и секущего кливажа субширотной ориентировки.

Перечисленные выше особенности складчатой структуры изученной территории БК свидетельствуют о неоднократных, разноплановых, последовательно накладывающихся друг на друга, складчатых деформациях слагающих ее толщ. В таких условиях, разными механизмами была образована современная сложная складчатая структура южного склона БК на протяжении ущелья р. Ксани, в альпийском цикле тектогенеза региона.

## Литература

1. Адамия Ш.А. Материалы о геологическом строении предгорий Большого Кавказа между Бассейном р. Малой Лиахви и меридианом г. Душети. – Тбилиси: Мецниереба, 1958. – 34 с.
2. Ажгирей Г.Д. Структурная геология. – М.: Изд-во Московского университета, 1966. – 348 с.
3. Варенцов М.И. Геологическое строение и нефтеносность западной части Куринской депрессии. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 258 с.
4. Вассоевич Н.Б. Геологический очерк северо-западной части Кахетии и восточной части Эрцо-Тианетского района. Азнефтеразведка. Фонды ГУ Грузии. – 1941.
5. Гамкрелидзе П.Д. Тектоника. // Геология СССР. Т.Х. Ч. 1. Грузинская ССР. Геологическое строение. – М.: Недра, 1964. – С. 453-491.
6. Гиоргобиани Т.В. Шолевая тектоника Большого Кавказа и прилегающего Закавказья. // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма: Мат. Совещ. Т. 1. – М.: ГЕОС, 1999. – С. 178-181.
7. Гиоргобиани Т.В. Альпийская коллизионная геодинамика Большого Кавказа и прилегающего Закавказья. // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 143-146.
8. Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. К вопросу о происхождении листрических разломов. // Тр. ГИН АН Грузии. Нов. сер. – 2000. – Вып. 115. – С. 215-226.
9. Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Коллизионный кливаж Центрального Кавказа. // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «ГЕО», 2003. – С. 280-282.
10. Заика-Новацкий В.С., Казаков А.Н. Структурный анализ и основы структурной геологии. – Киев: Выща Школа, 1989. – 279 с.
11. Канделаки Д.Н. История геологического развития предгорий Большого Кавказа (междуречье Лиахви и Иори). // Автореф. кандид. дисс. – 1975. – 25 с.

12. Кахадзе И. Р., Канделаки Н. А. Геологическое описание листа К-38-ХУ (Душети). Фонды УГ ГССР. – Тбилиси. – 1946.
13. Леонов М. Г. Тектоногравитационные микситы центрального сегмента Южного склона Большого Кавказа. // Большой Кавказ в альпийскую эпоху. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 231-250.
14. Шириашивили О. И., Вашакидзе И. Г. и др. Геологическое описание бассейнов рр. Малая Лиакви, Меджуда, Лехура и Ксани (отчет Лиаквской г/с партии, листа К-38-65-Б, по работам 1959 г.). Фонды ГУ ГССР. – Тбилиси. – 1960. – 340 с.
15. Adamia S. A. Plate tectonic and evolution of the Alpine system. Discussion. // *Bul. Geol. Soc. America*. – 1975. – V. 86. – pp. 15-17.
16. Adamia S. A., Lortkipanidze M. B., Zakariadze G. S. Evolution of an active continental margin exemplified by the Alpine history of the Caucasus. // *Tectonophysics*. – 1977. – V. 40. No. 3-4. – pp. 183-199.
17. Adamia S. A., Chkhotua T. G., Gvartadze T. T., Lebanidze Z. A., Lursmanashvili N. D., Sadradze N. G., Zakaraia D. P., Zakariadze G. S. Tectonic setting of Georgia-Eastern Black Sea: a review. // *The Geological Society of London*. – 2017. – pp. 11-40.
18. Ershov, A. V. Newest geodynamics of Caucasian-Arabian-East-African region / A. V. Ershov, A. M. Nikishin. // *Geotectonica*. – 2004. – No. 2. – pp. 55-72.
19. Gamkrelidze I. P. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time. // *Tectonophysics*. – 1986. – No. 127. – pp. 261-277.
20. Gamkrelidze I. P. Geologic structure and evolution of the Republic of Georgia. // *Encyclopedia of European and Asian Regional Geology*. Publ. Chapman & Hall. – 1997. – pp. 256-261.
21. Gamkrelidze I. P., Giorgobiani T. V. Kinematics of the Alpine deformation of the Caucasus and adjacent areas. *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. – Rotterdam. – 1990. – pp. 183-186.
22. Giorgobiani T., Zakaraia D. Listric Faults Structure in Folded-faulted Regions. // XVIIIth Congress of Carpathian-Balkan Geological Association. Belgrade. September 3-6. – 2006. – pp. 178-181.
23. 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.
24. Giorgobiani T., Zakaraia D. The Newest and Modern Tectonics of the Greater Caucasus and of the Adjacent Transcaucasus. // 1st International Conference and Workshop. Caucasus Active Tectonics and Magmatism. Hazards and Resources. 29 August-3 September. – Tbilisi. – 2013. – pp. 17-18.
25. Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision. // *Tectonophysics*. – 1989. – V. 161. – pp. 1-21.

## References

1. Adamia Sh. A. Materials on the geological structure of the foothills of the Greater Caucasus between the River Basin of Lesser Liakhvi and the meridian of Dusheti. Tbilisi. Metzniereba, 1958. 34 p. (In Russ.)
2. Azhgirey G. D. Structural geology. Moscow. Publishing House of Moscow University, 1966. 348 p. (In Russ.)
3. Varentsov M. I. Geological structure and oil content of the western part of the Kurinsk depression. Moscow-Leningrad. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1950. 258 p. (In Russ.)
4. Vassoevich N. B. Geological profile of the northwestern part of Kakheti and the eastern part of Ertso-Tianeti region. *Aznefterazvedka*. Funds of the GD of Georgia. 1941. (In Russ.)
5. Gamkrelidze P. D. Tectonics. Geology of the USSR. Vol. X. Part 1. Georgian SSR. Geological structure. Moscow. Nedra, 1964. pp. 453-491. (In Russ.)

6. Giorgobiani T.V. Shol tectonics of the Greater Caucasus and adjacent Transcaucasia. Tectonics, geodynamics and processes of magmatism and metamorphism: Proceedings of session. Vol. 1. Moscow. GEOS, 1999. pp. 178-181. (In Russ.)
7. Giorgobiani T.V. Alpine collision geodynamics of the Greater Caucasus and adjacent Transcaucasia. Tectonics of the Earth's crust and mantle. Tectonic patterns of the location of minerals. Vol. 1. Moscow. GEOS, 2005. pp. 143-146. (In Russ.)
8. Giorgobiani T.V., Zakaraya D.P. To the question of the origin of listric faults. In: Proceedings of GIN AN of Georgia. New ser. 2000. Issue 115. pp. 215-226. (In Russ.)
9. Giorgobiani T.V., Zakaraya D.P. Collision cleavage of the Central Caucasus. Stress-strain state and seismicity of the lithosphere. Novosibirsk. Publishing House of the SB RAS. Branch "GEO", 2003. pp. 280-282. (In Russ.)
10. Zaika-Novatsky V.S., Kazakov A.N. Structural analysis and the fundamentals of structural geology. Kiev. Vyscha Shkola, 1989. 279 p. (In Russ.)
11. Kandelaki D.N. The history of the geological development of the foothills of the Greater Caucasus (between the Liakhvi and Iori rivers). Abstract. Candidate diss. 1975. 25 p. (In Russ.)
12. Kakhadze I.R., Kandelaki N.A. Geological description of the sheet K-38-HU (Dusheti). Funds of the DG GSSR. Tbilisi. 1946. (In Russ.)
13. Leonov M.G. Tectonogravity mixites of the central segment of the southern slope of the Greater Caucasus. The Greater Caucasus in the Alpine era. Moscow. GEOS, 2007. pp. 231-250. (In Russ.)
14. Shiriazhvili O.I., Vashakidze I.G. et al. Geological description of the basins of the river Malaya Liakhvi, Medzhuda, Lekhura and Ksani (report of the Liakhva geological party, sheet K-38-65-B, on the works of 1959). Funds of the GD GSSR. Tbilisi. 1960. 340 p. (In Russ.)
15. Adamia S.A. Plate tectonic and evolution of the Alpine system. Discussion. Bul. Geol. Soc. America. 1975. Vol. 86. pp. 15-17.
16. Adamia S.A., Lortkipanidze M.B., Zakariadze G.S. Evolution of an active continental margin exemplified by the Alpine history of the Caucasus. Tectonophysics. 1977. Vol. 40. No. 3-4. – pp. 183-199.
17. Adamia S.A., Chkhotua T.G., Gvartadze T.T., Lebanidze Z.A., Lursmanashvili N.D., Sadradze N.G., Zakaraia D.P., Zakariadze G.S. Tectonic setting of Georgia-Eastern Black Sea: a review. The Geological Society of London. 2017. pp. 11-40.
18. Ershov, A. V., Nikishin. A. M. Newest geodynamics of Caucasian-Arabian-East-African region. Geotectonica. 2004. No. 2. pp. 55-72.
19. Gamkrelidze I.P. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time. Tectonophysics. 1986. No. 127. pp. 261-277.
20. Gamkrelidze I.P. Geologic structure and evolution of the Republic of Georgia. Encyclopedia of European and Asian Regional Geology. Publ. Chapman&Hall. 1997. pp. 256-261.
21. Gamkrelidze I.P., Giorgobiani T.V. Kinematics of the Alpine deformation of the Caucasus and adjacent areas. Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Rotterdam. 1990. pp. 183-186.
22. Giorgobiani T., Zakaraia D. Listric Faults Structure in Folded-faulted Regions. XVIIIth Congress of Carpathian-Balkan Geological Association. Belgrade. September 3-6. 2006. pp. 178-181.
23. 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.
24. Giorgobiani T., Zakaraia D. The Newest and Modern Tectonics of the Grater Caucasus and of the Adjacent Transcaucasia. 1st International Conference and Workshop. Caucasus Active Tectonics and Magmatism. Hazards and Resources. 29 August-3 September. Tbilisi. 2013. pp. 17-18.
25. Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision. Tectonophysics. 1989. Vol. 161. pp. 1-21.

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 549.01+551.248.1 (470.621)

DOI: [10.46698/VNC.2020.21.55.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.21.55.003)

Оригинальная статья

Акцессорные хромшпинелиды серпентинитов  
тектонического меланжа Даховского поднятия  
(Большой Кавказ)Ю. В. Попов <sup>1</sup>, О. Е. Пустовит <sup>2</sup>, В. А. Терещенко <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Россия, 344103,  
г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40, e-mail: popov@sfedu. ru;  
<sup>2</sup>ООО «ГеоБазисПроект», Россия, 344018, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Текучева, д. 246, офис 39.

Статья поступила: 01.04.2020, доработана: 21.05.2020, одобрена в печать: 24.05.2020

**Резюме: Актуальность работы.** Особенности морфологии и состава хромшпинелидов имеют важное значение для решения ряда геологических задач: от реконструкции состава субстрата родоначальных расплавов и физико-химических условий их эволюции, установления приуроченности магматических комплексов к геодинамическим обстановкам до оценки минерагенического потенциала ультрабазитовых массивов. **Цель работы** – изучение акцессорных хромшпинелидов из серпентинитов тектонического меланжа на северном фланге Даховского кристаллического выступа, входящего в состав тектонической зоны Передового хребта Большого Кавказа, выделение сохранивших исходный состав хромшпинелидов и установление условий их образования. **Методы исследования:** электронно-зондовый микроанализ и электронная микроскопия, статистический анализ результатов измерений. **Результаты работы.** Выделены хромшпинелиды с вторичными изменениями и сохранившие исходный состав. В ходе сопровождавшей обдукцию серпентинизации ультрабазитов (с образованием лизардит-хризотиловой ассоциации) хромшпинелиды частично трансформировались из субферрихромитов в хромиты, что сопровождалось перераспределением алюминия и магния (и обогащением внутренних зон хромом) в значительной части зерен и это в целом типично для условий низкотемпературного метаморфизма. Эти изменения выражены в образовании внешних обогащенных алюминием зон ( $Al_2O_3$  более 10 вес.%) и его выносом из внутренних частей (где содержание  $Al_2O_3$  неравномерное – от вариаций в пределах зерна в диапазоне 4.5-9 вес.% до менее 2% вес.% в сильно измененных разностях). Анализ корреляционных связей между элементами и переход в Cr-обогащенную шпинель указывают на преобладание двухвалентной формы железа во флюидах, что типично для восстановительных условий и высокого соотношения флюид/порода. Последующие изменения проявлены в образовании магнетитовых оторочек в окислительных условиях при интенсивной фильтрации в серпентинитах высокотемпературных гидротермальных растворов. Этот завершающий этап трансформации хромшпинелидов следует связывать с концом этапа герцинской коллизии, когда фрагменты апогипербазитовых тел, оторванные от офиолитового меланжа, были причленены к краю Даховского блока кристалликума, интенсивно дислоцированы и прорваны малыми интрузиями завершающей фазы гранитоидного магматизма. Интенсивное дробление и циркуляция растворов проявлены в формировании нескольких генераций магнетита, образующих тонкие пересекающиеся прожилки в серпентинитах. Первичный состав хромшпинелидов (соответствующий субферрохромитам с Cr# 0.80-0.81) указывает на их близость к типу офиолитов супра- или надсубдукционных зон (SSZ), в частности к гарцбургитовым офиолитам фронтальных частей островных дуг, ультрабазиты которых образуются в условиях плавления деплиторированной гарцбургитовой мантии.

**Ключевые слова:** Даховский выступ, серпентинитовый меланж, офиолиты, хромшпинелиды.

**Для цитирования:** Попов Ю. В., Пустовит О. Е., Терещенко В. А. Акцессорные хромшпинелиды серпентинитов тектонического меланжа Даховского поднятия (Большой Кавказ). *Геология и Геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 38-55. DOI: 10.46698/VNC.2020.21.55.003.

DOI: [10.46698/VNC.2020.21.55.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.21.55.003)

Original paper

## Accessory chrome spinels of serpentinites of tectonic melange of the Dakhov uplift (Greater Caucasus)

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

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

<sup>2</sup>GeoBazisProect Ltd, 139 building B, office 7, Tekucheva Str., Rostov-on-Don 344018, Russian Federation

Received: 01.04.2020, revised: 21.05.2020, accepted: 24.05.2020

**Abstract: Relevance.** Features of the morphology and composition of chrome spinels are important for solving a number of geological problems: from reconstructing the composition of the substrate of the initial melts and the physicochemical conditions of their evolution, establishing the confinement of magmatic complexes to geodynamic settings, and assessing the mineralogenic potential of ultrabasite massifs. **Aim.** Studying of accessory chrome spinels from serpentinites of tectonic melange on the northern flank of the Dakhovsky crystalline protrusion, which is part of the tectonic zone of the Front range of the Greater Caucasus, identify the chromium spinels that retained their original composition and determination the conditions of their formation. **Methods.** Electron probe microanalysis and electron microscopy, statistical analysis of measurement results. **Results.** Groups of grains with secondary changes and groups that retained the original composition have been distinguished. During the serpentinization of ultrabasites accompanying the obduction (with the formation of lysardite-chrysotile association), chrome spinels partially transformed from subferrichromites to chromites, it was accompanied by a redistribution of aluminum and magnesium (and enrichment of the inner zones with chromium) in a significant part of the grains and it is generally typical for conditions of low-temperature metamorphism. These changes are typical in the formation of external zones enriched with aluminum ( $Al_2O_3$  more than 9 wt.%) and its removal from the internal parts (where the  $Al_2O_3$  content is uneven – from variations within the grain in the range of 4.5-9 wt.% to less than 2% wt.% In greatly modified differences). The transition to Cr-enriched spinel and an analysis of the correlation between the elements indicate the predominance of the divalent form of iron in the fluids, which is typical for reducing conditions and a high fluid / rock ratio. Subsequent changes can be seen in the formation of magnetite rims under oxidizing conditions during intensive filtration of high-temperature hydrothermal solutions in serpentinites. This final stage of the transformation of chrome spinels should be associated with the end of the Hercynian collision stage, when fragments of apogiperbasite bodies torn from the ophiolite melange were attached to the edge of the Dakhov block of the crystallinum, intensively deployed and broken through by small intrusions of the final phase of granitoid magmatism. Intensive crushing and circulation of solutions can be seen in the formation of several generations of magnetite, forming thin intersecting streaks in serpentinite. The primary composition of chrome spinels (corresponding to subferrochromites, Cr# 0.80-0.81) indicates their proximity to the type of ophiolites of supra- or suprasubduction zones (SSZ), in particular, to harzburgite ophiolites of the frontal parts of island arcs, ultrabasites of which are formed under conditions of melting of the deplicated harzburgite mantle.

**Keywords:** Dakhovsky ledge, serpentinite melange, ophiolite, chrome spinelids.

**For citation:** Popov Yu. V., Pustovit O. E., Tereshchenko V. A. Accessory chrome spinels of serpentinites of tectonic melange of the Dakhov uplift (Greater Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. 10 (2): 38-55. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.21.55.003.

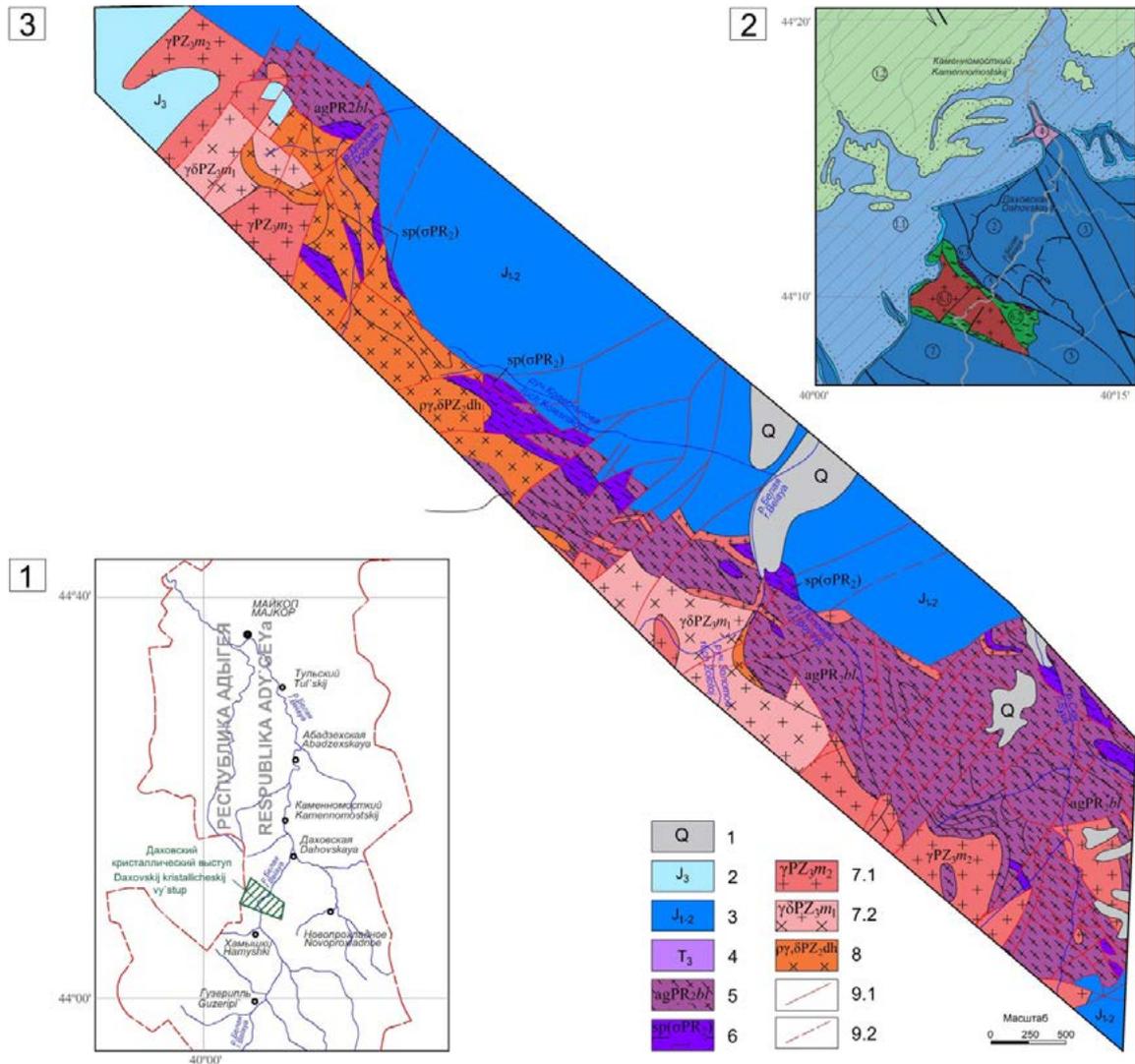


Рис. 1. Положение и геологическое строение территории: **1** – положение Даховского поднятия; **2** – тектоническая схема (геологические структуры, обозначенные на схеме: 1 – Северо-Кавказская моноклиналь: 1.1. – область развития келловей – верхнеюрских пород, 1.2. – область развития меловых пород; 2-7 – Лабино-Малкинская зона прерывистой складчатости: 2 – Догуакская покровно-складчатая зона ( $J_{1,2}$ ), 3 – Сахрайская зона сдвигово-надвиговых дислокаций ( $J_{1,2}$ ), 4 – Руфабгинский выступ (гранитоидный массив –  $PZ_{2,3}$ ; осадочный комплекс -T); 5 – Даховская антиклиналь ( $J_{1,2}$ ); 6 – Даховский выступ: 6.1 – гранитоидный массив ( $PZ_{2,3}$ ), 6.2. – метаморфическая толща балканского комплекса ( $PR_2?$ ), 6.3 – серпентиниты апогипербазитовые ( $PR_2?$ ); 7 – Дудугушская синклиналь ( $J_{1,2}$ ); **3** – геологическая карта северного фланга Даховского поднятия (по Менькову В. М., Качурину В. Ф. (1964 г.) с дополнениями): 1 – четвертичные образования, 2 – келловей – кимериджский осадочный комплекс (известняки, доломиты, песчаники, гравелиты, конгломераты); 3 – ниже – среднеюрский осадочный комплекс (аргиллиты, алевролиты, песчаники), 4 – верхнетриасовый комплекс (известняки, песчаники), 5 – балканский метаморфический комплекс (амфиболиты, амфиболовые гнейсы), 6 – серпентиниты апогипербазитовые беденского комплекса, 7.1 – малкинский гранитоидный комплекс (граниты), 7.1 – малкинский гранитоидный комплекс (гранодиориты), 8 – даховский гранитоидный комплекс (плагιοграниты, диориты), 9 – разломы прослеженные, 9.2 – разломы предполагаемые. /

Fig. 1. The location and geological structure of the territory: **1** – the position of the Dakhovsky uplift; **2** – tectonic diagram (geological structures, which indicated in the diagram: 1 – North Caucasian monocline: 1.1. – area of development of Callovian – Upper Jurassic rocks, 1.2. – area of development of Cretaceous rocks; 2-7 – Labino-Malkinsky zone of discontinuous folding: 2 – Doguakskaya integument-folded zone ( $J_{1,2}$ ), 3 – Sakhrayskaya zone of strike-slip-thrust dislocations ( $J_{1,2}$ ), 4 – Rufabginskiy ledge

(granitoid massif –  $PZ_{2-3}$ ; sedimentary complex -T); 5 – Dakhovskaya anticline ( $J_{1-2}$ ); 6 – Dakhovsky ledge: 6.1 – granitoid massif ( $PZ_{2-3}$ ), 6.2. – metamorphic series of the Balkan complex ( $PR_2?$ ), 6.3 – apoultramafic serpentinites ( $PR_2?$ ); 7 – Dudugushskaya syncline ( $J_{1-2}$ ); **3 – geological map of the northern flank of the Dakhovsky Uplift** (according to Men'kov V. M., Kachurin V. F. (1964) with additions): 1 – Quaternary formations, 2 – Callovian – Kimmeridge sedimentary complex (limestones, dolomites, sandstones, gravelites, conglomerates); 3 – the Lower – Middle Jurassic sedimentary complex (mudstones, siltstones, sandstones), 4 – the Upper Triassic complex (limestones, sandstones), 5 – the Balkan metamorphic complex ( $PR_2?$ , amphibolites, amphibole gneisses), 6 – apoultramafic serpentinites of the Bedhenian complex, 7.1 – Malkinsky granitoid complex (granites), 7.1 – Malkinsky granitoid complex (granodiorites), 8 – Dakhovsky granitoid complex (plagiogranites, diorites), 9 – traced faults, 9.2 – alleged faults.

## Введение

Особенности морфологии и состава хромшпинелидов имеют важное значение для решения целого ряда геологических задач: от реконструкции состава субстрата родоначальных расплавов и физико-химических условий их эволюции [Irvine, 1967; Sen et al., 2005; Kamenetsky et al., 2001 и др.], установления приуроченности магматических комплексов к геодинамическим обстановкам [Dick, Bullen, 1984; Barnes, Roeder, 2001 и др.] до оценки минерагенического потенциала ультрабазитовых массивов [Павлов и др., 1968; Hock et al., 1986; Юричев, 2016 и др.]. Эти минералы сохраняются при серпентинизации, что определяет их особое значение при изучении сильно метаморфизованных комплексов. Вместе с тем, использование типоморфных особенностей хромшпинелидов, состав которых весьма чувствителен к изменению внешних условий [Irvine, 1965], затруднено наложением нескольких этапов их преобразований, что определяет необходимость проведения детальных исследований и тщательного анализа природы наблюдаемых особенностей минералов.

## Цель работы

В работе приводятся результаты изучения акцессорных хромшпинелидов из серпентинитов тектонического меланжа, обнаженных на северном фланге Даховского выступа герцинского кристалликума Большого Кавказа в бассейне р. Белой (рис. 1). Поднятие входит в систему Шахан-Аибгинско-Даховской докелловейской складчато-разрывной зоны, рассматриваемой как аллохтонный блок герцинских комплексов [Государственная геологическая карта..., 2004]. Взаимоотношения серпентинитов с кристаллическими породами Даховского поднятия и осадочными толщами указывает на начало формирования меланжа на коллизионном позднегерцинском этапе развития территории синхронно с завершающим позднепалеозойским гранитодным магматизмом [Попов и др., 2019] и последующие деформации, захватывающие осадочные толщи триаса и нижней-средней юры [Ненахов и др., 2019].

## Методы исследований

Изучение микростроения и элементного состава хромшпинелидов проводилось в напыленных углеродом аншлифах методами электронно-зондовых исследований, включающими проведение количественного микроанализа и элементное картирование. Исследования выполнены на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU, оснащенный системами энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT и волнодисперсионного анализа INCA Wave 700. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 kV с использованием стандартов «Micro-

Analysis Consultants Ltd.». Изображения получены в обратно-рассеянных электронах (BE): фазы и участки, отличающиеся более высоким относительным средним атомным номером, окрашены в более светлый оттенок. Измерения выполнены с учетом методических рекомендаций, изложенных в работе [Reed, 2005]. Проанализировано 20 зерен, характеризующих разные стадии преобразования хромшпинелидов.

Расчет  $Fe^{3+}$  выполнен исходя из стехиометрических соображений согласно [Droop, 1987]. Учитывая малый объем выборки и отличия распределений величин от нормального, статистическая обработка результатов элементного анализа проведена методами непараметрической статистики.

### Геологическое положение и состав серпентинитов

Выходы серпентинитов в составе Даховского кристаллического поднятия образуют полосу, протягивающуюся от р. Сюк и её притоков (б. Берёзовая и др.) в область нижнего течения р. Липовой и далее на левобережье р. Белой, где прослеживаются в руч. Колесникова и среднем течении р. Догуако (рис. 1.3). Серпентиниты, будучи связанными с зонами крупных разломов, образуют линзовидные тела в плане шириной до нескольких десятков метров и протяжённостью до 0,5 км. Их выходы разбиты на блоки, которые, в свою очередь, рассечены разломами, трассируемыми зеркалами скольжения с серпентиновым и карбонатно-тальковым материалом; порода обычно сильно перемята, разлинзована, превращена в тектонические брекчии и катаклазиты. На некоторых участках наблюдается чередование пластин серпентинитов и амфиболовых пород метаморфического комплекса; среди серпентинитов отмечаются линзы родинитов пренит-вюаньтитового состава и округленные блоки гранат-амфибол-полевошпатовых пород. Тела серпентинитов секутся жилами и дайками позднегерцинских коллизионных лейкократовых гранитов малкинского интрузивного комплекса (в ущелье р. Сюк и р. Липовой) и заключают их фрагменты в виде тектонических обдавышей. Активные магматические контакты сопровождаются мало-мощными экзоконтактовыми зонами с хлоритом и тонкими асбестовыми жилками.

Породы нацело серпентинизированы, и реликтовые ассоциации прогрессивного этапа не сохранились. Присутствуют ассоциации с разным соотношением минеральных видов серпентинов: от магнетит-хризотил-лизардитовых до магнетит-хризотил-антигоритовых (обычно с хлоритом, тремолитом, тальком (до 2-3%), карбонатами, принадлежащим к ассоциациям разных этапов минералообразования). Серпентиниты разного состава ассоциируют в виде тектонических пластин или линз. Лизардит-хризотилловые разности пользуются преимущественным развитием близ тектонических контактов с амфиболитами и среднегерцинскими диоритами (б. Коваленко); хлорит- и антигоритсодержащие – в зонах наибольшего влияния сопряжённых с гранитоидными интрузиями флюидных потоков, в них редко присутствуют тонкие зонки приконтактового оталькования.

### Результаты

Зерна хромшпинелидов имеют размер до 1 мм, разбиты трещинами, заполненными серпентином или хлоритом. Практически все зерна имеют прожилки и тонкие реакционные каемки (хорошо выраженные как области с повышенной атомной плотностью на изображениях в обратно-рассеянных электронах (рис. 2)), сложенные магнетитом с незначительным содержанием хрома (табл. 1, анализы 2, 7). По краю каймы магнетит образует выросты, развивающиеся среди серпентинов или обрамляющих тонких хлорит-серпентиновых оторочек.

Таблица 1. / Table 1.

Состав хромшпинелидов из серпентинитов Даховского поднятия (в вес. %).  
 Места проведения микроанализов указаны на рисунке 2. /  
 The composition of chrome spinels from serpentinites of the Dakhovsky Uplift (in wt. %).  
 The microanalysis sites are indicated in Fig. 2.

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	CoO	NiO	ZnO	Итого	Cr#	Mg#
σ	0,15	0,13	0,07	0,07	0,05	0,43	0,15	0,30	0,04	0,06	0,12			
1	7,33	5,76	-	0,14	0,33	58,94	0,72	25,99	0,02	0,06	0,06	99,35	0,87	0,39
2	1,51	-	0,54	-	-	4,12	0,07	93,36	-	-	-	99,60	1,00	0,08
3	5,85	1,52	-	-	0,28	64,84	0,55	25,97	0,07	0,26	0,31	99,65	0,97	0,32
4	5,57	1	-	0,07	0,17	65,15	0,74	26,4	0,25	-	0,37	99,72	0,98	0,31
5	6,51	5,98	-	0,11	0,39	57,38	0,68	28,41	0,17	0,06	0,19	99,89	0,87	0,34
6	5,55	1,72	-	0,03	0,13	63,99	0,83	26,58	0,34	0,10	0,32	99,57	0,96	0,31
7	3,30	-	0,93	-	-	2,05	0,07	92,17	0,38	-	-	98,91	1,00	0,17
8	5,66	2,12	-	0,03	0,19	64,46	0,71	26,33	0,22	0,08	0,24	100,04	0,95	0,31
9	6,34	4,47	-	0,13	0,30	57,00	0,60	30,65	0,03	0,02	0,05	99,59	0,90	0,33
10	5,58	4,59	-	0,21	0,6	58,05	0,79	29,79	0,29	0,09	0,23	100,22	0,89	0,30
11	7,62	8,88	-	-	0,26	56,47	0,66	24,79	0,2	-	0,43	99,31	0,81	0,40
12	7,46	8,74	0,19	0,01	0,25	55,04	0,52	26,18	0,25	0,18	-	98,82	0,81	0,39
13	6,7	5,37	-	-	0,26	59	0,83	27,46	0,2	-	0,1	99,92	0,88	0,36
14	5,96	9,03	-	0,77	0,6	53,9	0,7	27,89	0,2	-	0,44	99,49	0,80	0,31
15	6,62	9,17	-	0,35	0,21	54,17	0,65	28,32	0,12	0,02	0,23	99,86	0,80	0,34

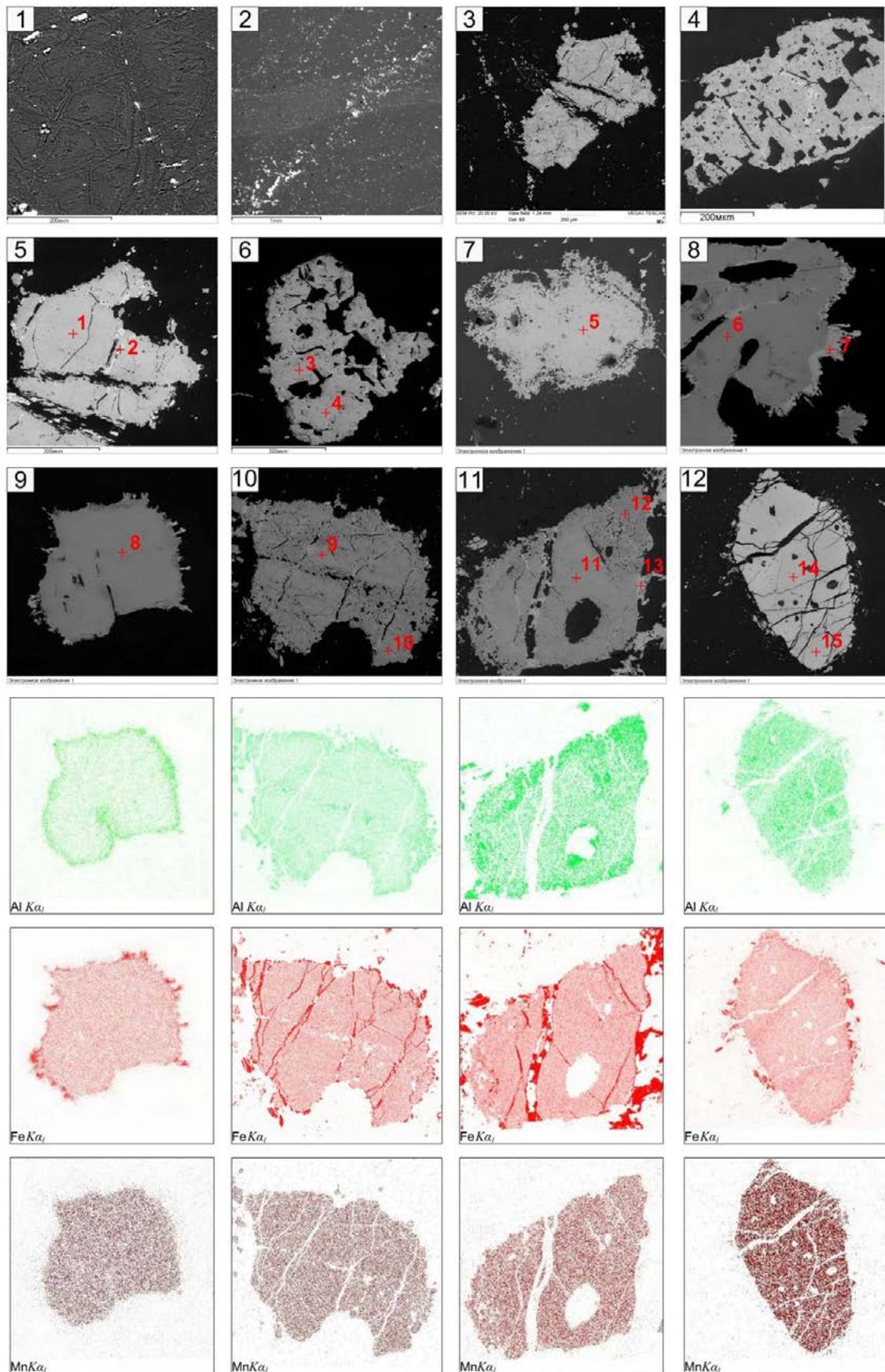


Рис. 2. Строение серпентинитов и хромипинелидов: 1 – типичное строение петельчатого lizardитового серпентинита, 2 – несколько генераций магнетита в хризотил-антигоритовом

серпентините, 3-12 – строение хромшпинелидов (изображение BE), указаны места проведения микроанализа, для зерен 9-12 приведены рентгеновские карты распределения алюминия, железа и марганца (излучение  $K\alpha_1$ ).

Fig. 2. Structure of serpentinites and chrome spinels: 1 – typical texture of looped lysardite serpentinite, 2 – several generations of magnetite in chrysotile antigorite serpentinite, 3-12 – structure of chrome spinels (BE image), microanalysis sites have been indicated, for grains 9-12, X-ray distribution maps of aluminum, iron, and manganese ( $K\alpha_1$  radiation).

Методами элементного картирования выявляется выраженная в разной мере зональность, проявленная в первую очередь в распределении алюминия и железа (рис. 2.9-12). Практически в всех зернах хорошо развиты магнетитовые каемки (при этом хромомagnetитовые зоны практически отсутствуют), содержащие повышенное количество кобальта (до 0,3-0,4 вес.%) и иногда кремния (возможно, частично связанного с присутствием в зоне генерации аналитического сигнала субмикронных примесей силикатов). Наряду с этим, выявляется второй тип зональности, выраженной в распределении алюминия. В разных зернах наблюдается постепенный переход от его однородного распределения (с содержанием  $Al_2O_3$  8,5-9,5 вес.%) (рис. 2.12), через образование «облачных» зон во внутренних частях зерен ( $Al_2O_3$  ~4,5-9 вес.%) с тенденцией к обогащению периферических частей (рис. 2.10-11) к контрастному распределению с образованием насыщенных алюминием ( $Al_2O_3$  более 10 вес.%) периферических примыкающим к магнетитовым каемкам зон (рис. 2.9) и резко обедненных внутренних частей ( $Al_2O_3$  менее 2 вес.%). Наименьшая глиноземистость присуща агрегатам мелких зерен (анализы 4, 6 в табл. 1), образующих тесные срастания с силикатами (хлорит-серпентиновым агрегатом, замещающим первичные фазы).

Статистический анализ составов хромшпинелидов (табл. 3, рис. 3) указывает, что распределение алюминия тесно связано с распределением магния (и менее определено – с ванадием, для которого вариации содержаний относительно невелики и близки к погрешности измерений (табл. 1, 2)). При этом магний связан значимой обратной корреляционной зависимостью с железом, алюминий – с хромом. Такие связи можно объяснить замещением в структуре хромшпинелидов  $Mg^{2+}$  на  $Fe^{2+}$  и

Таблица 2. / Table. 2.

**Описательные статистики состава хромшпинелидов (N = 25). /  
Descriptive statistics of the composition of chrome spinels (N = 25)**

Переменная / Variable	Среднее / Average	Медиана / Median	Ст. откл. / St. deviation	Дисперсия / Dispersion	Асимметрия / Asymmetry	Экссесс/ Excess
MgO	6,47	6,04	1,00	1,01	1,14	0,39
$Al_2O_3$	6,22	5,76	2,70	7,27	-0,12	-0,59
$TiO_2$	0,20	0,12	0,24	0,06	1,51	1,25
$V_2O_3$	0,37	0,31	0,16	0,03	0,46	-1,17
$Cr_2O_3$	56,19	55,98	4,79	22,93	0,30	0,25
MnO	0,71	0,72	0,13	0,02	-0,18	-1,04
FeO	27,89	28,17	2,28	5,18	-0,68	0,56
CoO	0,19	0,20	0,13	0,02	-0,32	-1,23
NiO	0,04	0,00	0,07	0,00	2,09	4,85
ZnO	0,25	0,23	0,13	0,02	-0,10	-0,97

( $\text{Cr}^{3+} + \text{Al}^{3+}$ ) на  $\text{Fe}^{3+}$ . Поскольку  $\text{Fe}^{3+}$  замещает  $\text{Cr}^{3+}$ , то увеличение или уменьшение содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  зависит от наличия  $\text{Fe}^{3+}$  во флюиде или растворе (Barra et al., 2014). При высоком соотношении флюид/порода, когда флюиды сильно восстанавливаются, преобладает  $\text{Fe}^{2+}$ , входящее в структуру с образованием Cr-обогащенной шпинели (хромитов, а не хроммагнетитов) [Gervilla et al., 2012], что наблюдается в изучаемых образцах (рис. 4.1). Следует отметить, наиболее инертным среди макроэлементов является марганец (рис. 2.9-12, табл. 2). Содержание цинка значительно варьирует, но его распределение не обнаруживает определенной закономерности, что может объясняться сочетанием нескольких управляющих его распределением факторов [Силаев и др., 2008].

Таблица 3. / Table 3.

**Коэффициенты корреляции элементов в хромшпинелидах (без магнетитовых оторочек) – значения ранговых корреляций Спирмена; отмеченные корреляции значимы на уровне  $p < 0.05$ . / The correlation coefficients of elements in chrome spinels (without magnetite rims) are meanings of Spearman's rank correlations; marked correlations are significant at the level  $p < 0.05$ .**

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	CoO	NiO	ZnO
MgO	1,00	<b>0,61</b>	-0,27	0,15	-0,17	-0,34	<b>-0,52</b>	-0,33	-0,33	-0,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,61</b>	1,00	0,02	<b>0,62</b>	<b>-0,76</b>	-0,23	-0,12	-0,34	-0,35	0,04
TiO <sub>2</sub>	-0,27	0,02	1,00	<b>0,56</b>	-0,38	-0,27	0,13	0,22	-0,20	0,15
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	<b>0,62</b>	<b>0,56</b>	1,00	<b>-0,65</b>	-0,08	0,18	-0,10	-0,16	0,10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,17	<b>-0,76</b>	-0,38	<b>-0,65</b>	1,00	0,23	-0,27	0,19	0,24	-0,06
MnO	-0,34	-0,23	-0,27	-0,08	0,23	1,00	0,25	0,18	0,03	0,04
FeO	<b>-0,52</b>	-0,12	0,13	0,18	-0,27	0,25	1,00	0,31	0,23	-0,24
CoO	-0,33	-0,34	0,22	-0,10	0,19	0,18	0,31	1,00	-0,06	-0,10
NiO	-0,33	-0,35	-0,20	-0,16	0,24	0,03	0,23	-0,06	1,00	0,05
ZnO	-0,33	0,04	0,15	0,10	-0,06	0,04	-0,24	-0,10	0,05	1,00

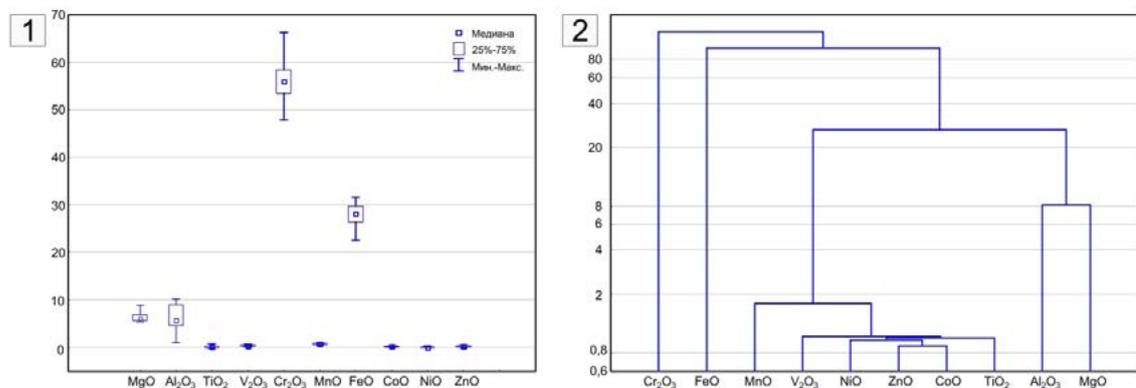


Рис. 3. Результаты статистической обработки данных элементного анализа хромшпинелидов: 1 – основные описательные статистики; 2 – дендрограмма (метод одиночной связи; указаны евклидовы расстояния, шкала логарифмическая).

Fig. 3. Results of statistical processing of data of elemental analysis of chrome spinels: 1 – main descriptive statistics; 2 – dendrogram (single connection method; Euclidean distances have been indicated, the scale is logarithmic).

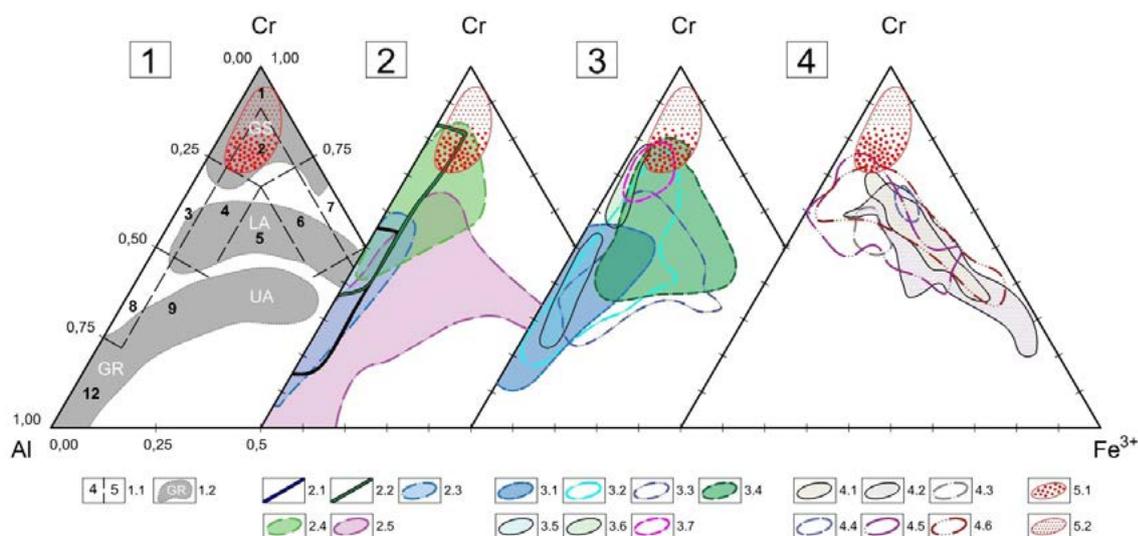


Рис. 4. Положение составов хромшпинелидов (внутренние области) на диаграммах Al – Cr – Fe<sup>3+</sup>: 1.1 – поля составов на классификационной диаграмме (в соответствии с номенклатурой, разработанной Н. В. Павловым: 1- хромиты, 2 – субферрихромиты, 3 – алюмохромиты, 4 – субферриалюмохромиты, 5 – ферриалюмохромиты, 6 – субалюмоферрихромиты, 7 – феррихромиты, 8 – хромпикотиты, 9 – субферрихромпикотиты); 1.2 – стадии метаморфизма: GS – зеленосланцевая, LA – низкотемпературная амфиболитовая, UA – высокотемпературная амфиболитовая, GR – гранулитовая (по [Saumur, Hattori, 2012]); 2-3 – составы хромшпинелидов из пород разных геодинамических обстановок (по [Barnes, Roeder, 2001; Dick, Bullen, 1984; Zaeimnia et al., 2017, Ghazi, 2011]): 2.1 – перидотиты островных дуг, 2.2 – абиссальные перидотиты, 2.3 – ультрамафиты COX, 2.4 – ультрамафиты глубоководных желобов, 2.5 – ксенолиты ультрамафитов из базальтов, 3.1 – абиссальные перидотиты, 3.2 – океаническое дно, 3.3 – океанические острова, 3.4 – островные дуги; 3.5 – ультрамафитовые массивы срединных хребтов Атлантического и Индийского океанов, 3.6 – конические подводные горы (серпентинитовые диапирсы) фронтальных частей Марианской и Идзу-Бонинской островных дуг, 3.7 – Нидарские перидотиты; 4 – составы хромшпинелидов платиноносных массивов (по [Гущин, Гусев, 2012]): 4.1 – дуниты концентрически-зональных Конжаковского, Косьвинского и Нижнетагильского массивов Платиноносного пояса Урала; 4.2 – массивы аляскинского типа запада Северной Америки; 4.3 – дуниты Сарановского массива (Средний Урал), 4.4 – Гальмоэнанский массив (Корякское нагорье), 4.5- хромитонесные расслоенные интрузии; 4.6 – концентрически-зональные массивы; 5 – составы внутренних частей хромшпинелидов серпентинитов Даховского поднятия: 5.1 – исходные субферрихромиты; 5.2 – измененные части зерен.

Fig. 4. The position of the compositions of chrome spinels (internal parts) on the diagrams Al – Cr – Fe<sup>3+</sup>: 1.1 – fields of compositions in the classification diagram (in accordance with the nomenclature developed by N. In. Pavlov: 1 – chromites, 2 – subferrichromites, 3 – alumochromite, 4 – subferrialumochromite, 5 – ferrialumochromite, 6 – subalumoferrichromite, 7 – ferrichromite, 8 – chromepicotite, 9 – subferrichromepicotite.); 1.2 – metamorphic grade: GS – green, LA – low-temperature amphibolite, UA – high temperature amphibolite, GR – granulite (at [Saumur, Hattori, 2012]); 2-3 – the compositions of chrome spinels from rocks of different geodynamic settings (for [Barnes, Roeder, 2001; Dick and Bullen, 1984; Zaeimnia et al., 2017, Ghazi, 2011]): 2.1 – forearc peridotites, 2.2 – abyssal peridotites, 2.3 – ultramafites of MOR, 2.4 – ultramafites deepwater trenches, 2.5 – xenoliths of ultramafites from basalts, 3.1 – abyssal peridotites, 3.2 – ocean bottom, 3.3 – oceanic islands, 3.4 – island arcs; 3.5 – ultramafic massifs of the median ridges of the Atlantic and Indian oceans, 3.6 – conical seamounts (serpentinite diapirs) of frontal parts of the Mariana and Izu-Buninsky island arcs, 3.7 – Nidar peridotites; 4 – the compositions of chrome spinels of platinum-bearing massifs (according to [Gushchin, Gusev, 2012]): 4.1 – the dunites concentrically zoned Konjak, Kosva and Nizhny Tagil massifs of the Platinum belt of the Urals; 4.2 – Alaskan type massifs of Western of North America; 4.3 – dunites of Saranov massif (Middle Urals), 4.4 – Galmoenansky array (Koryak highlands), 4.5 – chromite-bearing layered intrusions; 4.6 – concentric-zonal massifs; 5 – the compositions of the inner parts of chrome spinels of serpentinite Dakhov Uplift: 5.1 – initial subferrichromites; 5.2 – modified parts of the grains.

## Обсуждение

Зональность хромшпинелидов, как известно [Плаксенко, 1989], может иметь разную природу и являться как следствием кристаллизации из меняющегося по составу кристаллизующегося расплава и реакции выделившихся хромшпинелидов с интеркумулусной жидкостью, либо просачивающимися бонинитовыми или базальтовыми расплавами, так и следствием аллохимических преобразований в ходе низкотемпературной серпентинизации в коровых условиях. В последнем случае её образование наиболее выразительно фиксируется развитием тонких хроммагнетитовых или магнетитовых каемок, свидетельствующих о перекристаллизации краевых частей в условиях корового метаморфизма, роста фугитивности кислорода и наличия воды в кристаллизующей среде [Roeder, Schulze, 2008]. Такой характер зональности обычен и присущ всем зернам изучаемых даховских хромшпинелидов. Образование обогащенных алюминием зон в периферических частях зерен может объясняться интенсивным его выносом гидротермальными растворами в соответствии со схемой преобразований: Cr-шпинель + Fe<sup>3+</sup> + H<sub>2</sub>O → феррихромит + Al<sup>3+</sup> + H<sub>2</sub>O, серпентин + Al<sup>3+</sup> + H<sub>2</sub>O → клинохлор [Iyer et al., 2008].

Среди изученных хромшпинелидов выделяется группа ранней генерации (часть зерен которой претерпели хрупкие деформации, разбиты на фрагменты между которыми развиваются серпентины с вторичным образованным в ходе лизардитизации магнетитом (рис. 2.3,5), характеризуются однородным составом внутренних областей без признаков зональности или её незначительным проявлением только в периферических частях зерен (рис. 2.11-12; анализы 11, 12, 14, 15 в табл. 1), которая может быть использована для петрогенетических реконструкций. Центральные области таких хромшпинелидов соответствуют субферрохромитам (рис. 4.1). Для них значение Cr# укладывается в интервал ~0,80-0,81, Mg# ~0,35-0,40, содержание NiO не превышает ~0,2 вес. %.

Составы хромшпинелидов уверенно указывают на принадлежность к ультрабазитам офиолитового комплекса (рис. 4.2) и типу офиолитов супра- или надсубдукционных зон (SSZ), ассоциирующих с островодужными комплексами [Pearce et al., 1984]. Составы укладываются в поля составов, типичные для хромшпинелидов преддуговых офиолитов (forearc peridotite), в том числе серпентинитовых диапиров фронтальных частей Марианской и Идзу-Бонинской островных дуг, и отождествляемых с ними офиолитовых ассоциаций складчатых поясов, например, Нидарского комплекса Неотетиса (в Северном Пакистане и Индии) [Ahmad et al., 2008] (рис. 4.3). Повышенная хромистость (до ~0,81) свидетельствует о высоких степенях плавления субстрата, что также характерно для офиолитов надсубдукционных зон (SSZ), образующихся при участии субдукционного водного флюида, повышающего степень плавления [Parkinson, Pearce, 1998] метасоматически преобразованной деплтированной гарцбургитовой мантии [Dilek, Furnes, 2011] (офиолиты гарцбургитового типа [Ishiwatari, 1985]). На соответствие составов субстрата субдукционным условиям указывает и отношение содержания титана и глинозёма хромшпинелидов (рис. 5).

Фигуративные точки составов изучаемых даховских хромшпинелидов располагаются вне полей типичных хромитоносных комплексов (рис. 4.4), что согласуется с низкой хромитоносностью серпентинитов Передового хребта Большого Кавказа.

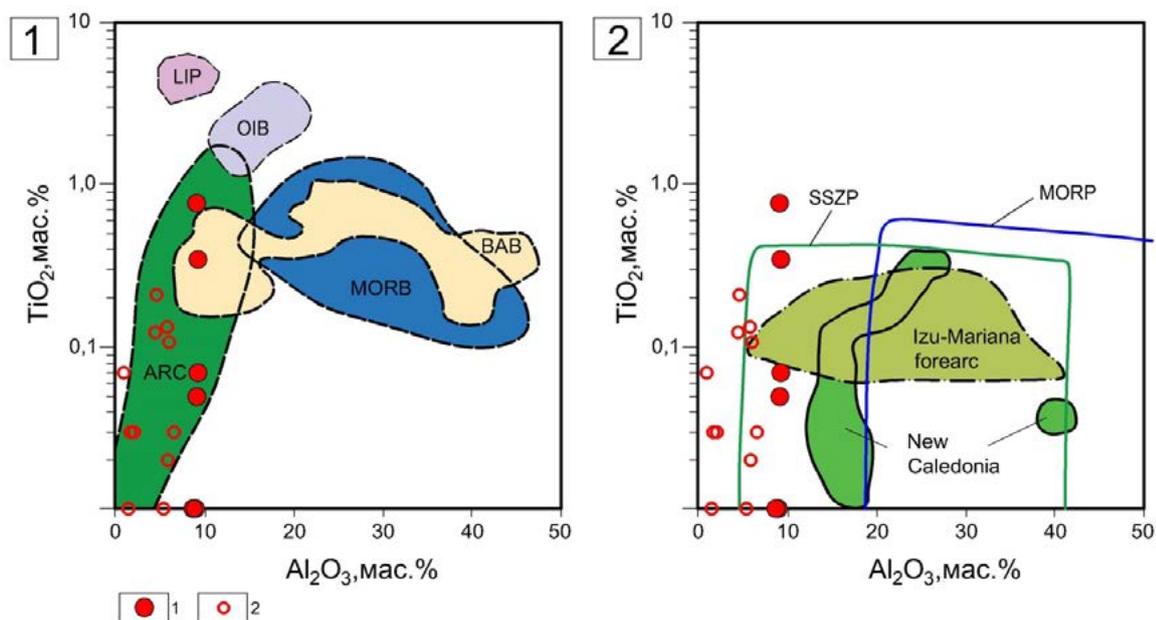


Рис. 5. Положение составов хромшпинелидов (внутренние области) относительно полей составов типичных геодинамических обстановок (по Ghazi et al., 2011; Kamenetsky, Crawford, Meffre, 2001; Rollinson, Adetunji, 2015): LIP – базальты крупных изверженных провинций; OIB – базальты океанических островов; ARC – островодужные базальты; BAB – базальты задуговых бассейнов; MORB – базальты срединно-океанических хребтов; SSZP – океанические надсубдукционные перidotиты. Составы внутренних частей хромшпинелидов серпентинитов Даховского поднятия: 1 – исходные; 2 – измененные части зерен.

Fig. 5. The position of the compositions of chrome spinels (inner parts) relative to the composition fields of typical geodynamic settings (according to Ghazi et al., 2011; Kamenetsky, Crawford, Meffre, 2001; Rollinson, Adetunji, 2015): LIP – basalts of large erupted provinces; OIB – basalts of oceanic islands; ARC – island arc basalts; MORB – basalts of middle-ocean ridges; SSZP – oceanic suprasubduction peridotites. Compositions of the internal parts of chrome spinels of serpentinites of the Dakhovsky Uplift: 1 – initial subferrichromites; 2 – modified parts of the grains.

## Выводы

Первичный состав хромшпинелидов рассматриваемого комплекса западной части тектонической зоны Передового хребта Большого Кавказа, в целом относимых к беденскому плутоническому комплексу, указывает на их близость к типу офиолитов супра- или надсубдукционных зон (SSZ). Изменчивость составов хромшпинелидов в офиолитовых комплексах [Rollinson, Adetunji, 2015] не позволяет уверенно детализировать условия формирования (исходя из имеющихся данных), но в качестве аргументированной гипотезы можно рассматривать близость к гарцбургитовым офиолитам фронтальных частей островных дуг (при отличии от офиолитов задуговых бассейнов (рис. 5.1)). На основании изучения реликтовых минералов протолит беденских серпентинитов определяется как гарцбургитовый [Снежко, 1985]. В породах устанавливаются реликты оливина (обычно замещенного в центральных частях  $\alpha$ -лизарлитом, в основной массе –  $\beta$ -лизарлитом с пылевидным магнетитом (рис. 2.1)) и ромбического пироксена.

Принадлежность к субдукционной обстановке согласуются с присутствием высокобарических метаморфических ассоциаций (сформировавшихся при давлении до  $\sim 0,8-0,95$  GPa не позднее  $353 \pm 3$  Ma) в тектонически ассоциирующих с сер-

пентинитами метапородах [Korikovskiy et al., 2004; Somin et al., 2007] и эклогитов (сформировавшихся при давлении более 1.6 GPa не позднее  $322 \pm 14$  Ma) среди пород Блыбского поднятия [Philippot et al., 2001], занимающего аналогичную даховским позицию с структуре Передового хребта. В целом, покровно-складчатая аккреционная структура Передового хребта, содержащая офиолиты и образующие тектонические покровы комплексы пород, связанных с разными геодинамическими обстановками (в том числе островодужными), сформировалась между серединой турне и поздним визе и претерпела последующие интенсивные деформации на протяжении индосинийского цикла [Омельченко и др., 2017].

В ходе сопровождавшей обдукцию серпентинизации ультрабазитов (с образованием лизардит-хризотиловой ассоциации) хромшпинелиды частично трансформировались из субферрихромитов в хромиты, что сопровождалось перераспределением алюминия и магния в значительной части зерен и в целом типично для условий низкотемпературного метаморфизма при относительно низком давлении воды в системе [Candia, Gaspar, 1997]. Отсутствие хорошо выраженных оторочек хроммагнетита вокруг богатых алюминием внешних зон указывает на отсутствие последующего длительного прогрева пород [Kapsiotis, 2014]. Но при этом четко выражены магнетитовые оторочки, формирующиеся в окислительных условиях при интенсивной фильтрации в серпентинитах гидротермальных растворов (с температурой выше  $300^{\circ}\text{C}$ ) и высоком значении соотношения флюид / порода [Ahmed, Surour, 2016]. Для таких условий также типично образование зерен хромшпинелидов с «атолловым» строением (рис. 2.7) и присутствие  $\text{SiO}_2$  в оторочках [Frost, Beard, 2007; Ahmed, Surour, 2016]. Этот завершающий этап трансформации хромшпинелидов следует связывать с концом этапа герцинской коллизии, когда фрагменты апогипербазитовых тел, оторванные от офиолитового меланжа, были причленены к краю Даховского блока кристалликума, интенсивно дислоцированы и прорваны малыми интрузиями завершающей фазы гранитоидного магматизма. Интенсивное дробление и циркуляция растворов проявлены в формировании нескольких генераций магнетита, образующих тонкие пересекающиеся прожилки в хризотил-антигоритовых серпентинитах (рис. 2.2), иногда рассекающих крупные зерна хромшпинелидов (рис. 2.3). Следует отметить, что высокая активность гидротермальных растворов согласуется с насыщенностью флюидами завершающих порций гранитоидного расплава, с внедрением которых связана грейзенизация пород Даховского выступа [Попов, Пустовит, 2011].

Таким образом, состав акцессорных хромшпинелидов Даховского выступа отражает несколько последовательных этапов трансформации апогипербазитов тектонического меланжа: от образования ранних субферрихромитов в условиях плавления деплитированной гарцбургитовой мантии в субдукционной обстановке до метаморфических преобразований в ходе обдукции и гидротермально-метасоматической переработки под действием гранитоидных интрузий.

## Литература

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Кавказская. Лист L – 37 – XXXV. – Майкоп. – Объяснительная записка. – 2004.
2. Гущин А.В., Гусев Г.С. Место платиноносных массивов в группе уральских ультрамафитов: диагностическая роль хромшпинелидов // Разведка и охрана недр. – 2012. – №2. – С. 24-29.

3. Ненахов В. М., Жабин А. В., Никитин А. В., Бондаренко С. В. Внутренне строение тектонической зоны северного обрамления Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2019. – № 1. – С. 5-14.
4. Омельченко В. Л., Рябов Г. В., Исаев В. С. Тектоника и история развития зоны Передового хребта Большого Кавказа // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 1. – С. 40-56.
5. Павлов Н. В., Кравченко Г. Г., Чупрынина И. И. Хромиты Кемпирсайского плутона. – Москва: Наука, 1968. – 179 с.
6. Плаксенко А. Н. Типоморфизм акцессорных хромшпинелидов ультрамафит-мафитовых магматических формаций. – Воронеж, Изд-во ВГУ. – 1989. – 224 с.
7. Попов Ю. В., Жабин А. В., Пустовит О. Е. Минеральный состав серпентинитов тектонического меланжа Даховского кристаллического выступа (Большой Кавказ) // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 4. – С. 38-48. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44487.
8. Попов Ю. В., Пустовит О. Е. Минеральный состав и закономерности локализации кварц-молибденитового жильного оруденения Даховского рудного узла (Северо-Западный Кавказ) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2011. – № 5 (165). – С. 70-73.
9. Силаев В. И., Шабалин В. Н., Голубева И. И., Хазова А. Ф., Белоусова Е. А. О цинк-содержащих и цинкистых хромшпинелидах Тимано-Уральского региона // Вестник ИГ КНЦ УрО РАН. – 2008. – № 8. – С. 6-16.
10. Снежко Е. А. Петрохимические типы ультрабазитов Северного Кавказа и их структурная позиция. – М.: ВИНТИ, – 1985. – Деп. рук. № 7884-85. – 162 с.
11. Юричев А. Н. Критерии регионального и локального прогнозирования потенциальной хромитоносности подиморфных ультрамафитовых массивов складчатых областей // Руды и металлы. – 2016. – № 3. – С. 5-14.
12. Ahmad, T., Tanaka, T., Sachan, H. K., Asahara, Y., Islam, R., Khanna, P. P. Geochemical and isotopic constraints on the age and origin of the Nidar Ophiolitic Complex, Ladakh, India: Implications for the Neo-Tethyan subduction along the Indus suture zone. // Tectonophysics. 2008. – Vol. 451 (1-4). – pp. 206-224. DOI: 10.1016/j.tecto.2007.11.049
13. Ahmed A. H., Surour A. A. Fluid-related modifications of Cr-spinel and olivine from ophiolitic peridotites by contact metamorphism of granitic intrusions in the Ablah area, Saudi Arabia // Journal of Asian Earth Sciences. urnal of Asian Earth Sciences. – 2016. – Vol. 122. – pp. 58-79. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.03.010
14. Barnes S. J., Roeder P. L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. J. Petrol. – 2001. – Vol. 42. – pp. 2279-2302.
15. Barra, F., Gervilla, F., Hernández, E., Reich, M., Padrón-Navarta, J., González-Jiménez, J. Alteration patterns of chromian spinels from La Cabaña peridotite, south-central Chile. // Mineral. Petrol. – 2014. – Vol. 108. – pp. 819-836.
16. Candia, M. A. F., Gaspar, J. C. Chromian spinels in metamorphosed ultramafic rocks from Mangabal I and II complexes, Goiás, Brazil // Mineralogy and Petrology. – 1997. – Vol. 60 (1-2). – pp. 27-40. DOI: 10.1007/BF01163133
17. Dick, H. J. B., Bullen, T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1984. – Vol. 86 (1). – pp. 54-76. DOI: 10.1007/BF00373711
18. Dilek, Y., Furnes, H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere // Bulletin of the Geological Society of America. – 2011. – Vol. 123 (3-4). – pp. 387-411. DOI: 10.1130/B30446.1
19. Droop, G. T. R. A general equation for estimating Fe<sup>3+</sup> concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria // Mineralogical Magazine. – 1987. – Vol. 51 (3). – pp. 431-435.

20. Frost, B. R., Beard, J.S. Erratum: On silica activity and serpentinization (*Journal of Petrology*) // *Journal of Petrology*. – 2008. – Vol. 49 (6). – p. 1253. DOI: 10.1093/petrology/egn026
21. Gervilla, F., Padrón-Navarta, J. A., Kerestedjian, T., Sergeeva, I., González-Jiménez, J. M., Fanlo, I. Formation of ferrian chromite in podiform chromitites from the Golyamo Kamenyane serpentinite, Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: A two-stage process // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2012. – Vol. 164 (4). – pp. 643-657. DOI: 10.1007/s00410-012-0763-3.
22. Ghazi J.M., Moazzen M., Rahghoshay M., Moghadam H.S. The geodynamic setting of the Nain ophiolites, Central Iran: evidence from chromian spinels in the chromitites and associated rocks. *Ophioliti*. – 2011. – Vol. 36. No 1. – pp. 59-76.
23. Hock M., Friedrich G., Plueger W.L., Wichowski A. Refractory – and metallurgical-type chromite ores, Zambales Ophiolite, Luzon, Philippines // *Mineralium Deposita*. – 1986. – Vol. 21. – pp. 190-199.
24. Irvine, T.N. Chromian Spinel As a Petrogenetic Indicator, Part 2 Petrologic Applications. // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1967. – No. 4. – pp. 71-103
25. Irvine, T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part 1. Theory // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1965. – No. 2. – pp. 648-671.
26. Ishiwatari, A. Alpine ophiolites: product of low-degree mantle melting in a Mesozoic transcurrent rift zone // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1985. – Vol. 76 (1-2). – pp. 93-108. DOI: 10.1016/0012-821X (85) 90151-7
27. Iyer, K., Austrheim, H., John, T., Jamtveit, B., Serpentinization of the oceanic lithosphere and some geochemical consequences: constraints from the Leka ophiolite complex, Norway. // *Chem. Geol.* – 2008. – Vol. 249. – pp. 66-90.
28. Kamenetsky, V. S., Crawford, A. J., Meffre, S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: An empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. // *Journal of Petrology*. – 2001. – Vol. 42 (4). – pp. 655-671.
29. Kapsiotis, A. Composition and alteration of cr-spinels from milia and pefki serpentinized mantle peridotites (pindos ophiolite complex, greece). // *Geologica Carpathica*. – 2014. – Vol. 65 (1). – pp. 83-95. DOI: 10.2478/geoca-2013-0006
30. Korikovskiy S.P., Somin M.L., Korsakov S.G. High-pressure symplectitic garnet-clinopyroxene-margarite-muscovite-clinozoisite amphibolites of the Dakhov Block, Northern Caucasus: Genesis and composition of reaction textures. // *Doklady Earth Sciences*. – 2004. – T. 397. No. 6. – pp. 778-782.
31. Parkinson, I. J., Pearce, J.A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting // *Journal of Petrology*. – 1998. – Vol. 39 (9). – pp. 1577-1618. DOI: 10.1093/petroj/39.9.1577
32. Pearce, J. A., Lippard, S. J., and Roberts, S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites / Kokelaar, B. P., and Howells, M. F., eds., *Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins: Geological Society of London Special Publication*. – 1984. – No. 16. – pp. 77-94.
33. Philippot, P., Blichert-Toft, J., Perchuk, A., Costa, S., Gerasimov, V. Lu-Hf and Ar-Ar chronometry supports extreme rate of subduction zone metamorphism deduced from geospeedometry // *Tectonophysics*. – 2001. – Vol. 342 (1-2). – pp. 23-38. DOI: 10.1016/S0040-1951 (01) 00155-X
34. Reed S.J. B. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press. – 2005. – 232 p.
35. Rollinson, H., Adetunji, J. The geochemistry and oxidation state of podiform chromitites from the mantle section of the Oman ophiolite: A review // *Gondwana Research*. – 2015. – Vol. 27 (2). – pp. 543-554. DOI: 10.1016/j. gr. 2013.07.013.
36. Roeder, P. L., Schulze, D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite // *Journal of Petrology*. – 2008. – Vol. 49 (8). – pp. 1473-1495. DOI: 10.1093/petrology/egn034.

37. Saumur, B. M., Hattori, K. Zoned Cr-spinel and ferritchromite alteration in forearc mantle serpentinites of the Rio San Juan Complex, Dominican Republic // *Mineralogical Magazine*. – 2012. – Vol. 77 (1). pp. 117-136. DOI: 10.1180/minmag. 2013.077.1.11
38. Sen A.K., Sharma P.K., Mohanty D., Ghosh T.K. Composition of Cr-spinel – an ore genetic indicator of Kathpal Chromite Deposit, Sukinda Ultramafic Complex, Orissa, India // *Current Science*. – 2005. – Vol. 88. – pp. 1547-1550.
39. Somin M.L., Levchenkov O.A., Kotov A.B., Makeev A.F., Komarov A.N., Ro N.I., Lavrishchev V.A., Lebedev V.A. The Paleozoic age of high-pressure metamorphic rocks in the Dakhov Salient, northwestern Caucasus: Results of U-Pb geochronological investigations. // *Doklady Earth Sciences*. – 2007. – T. 416. No. 1. – pp. 1018-1021.
40. Zaeimnia, F., Kananian, A., Arai, S., Mirmohammadi, M., Imamalipour, A., Khedr, M. Z., Miura, M., Abbou-Kebir, K. Mineral chemistry and petrogenesis of chromitites from the Khoy ophiolite complex, Northwestern Iran: Implications for aggregation of two ophiolites // *Island Arc*. – 2017. – Vol. 26 (6). No. e12211. DOI: 10.1111/iar. 12211

## References

1. The state geological map of the Russian Federation on a scale of 1: 200000. Second edition. Caucasian series. Sheet L 37. XXXV. Maykop. Explanatory note. 2004. (In Russ.)
2. Gushchin A. V., Gusev G. S. Place of platiniferous massifs in the group of Ural ultramafites: diagnostic role of chrome spinels. *Exploration and protection of mineral resources*. 2012. No. 2. pp. 24-29. (In Russ.)
3. Nenakhov V.M., Zhabin A.V., Nikitin A.V., Bondarenko S.V. The internal structure of the tectonic zone of the Northern framing of Dakhovsky crystalline massif (Western Caucasus). *Herald of the Voronezh state University. Series: Geology*. 2019. No. 1. pp. 5-14. (In Russ.)
4. Omelchenko V.L., Ryabov V.G., Isaev V.S., Tectonics and history of development of zone of the Front range of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 40-56. (In Russ.)
5. Pavlov N. V., Kravchenko G.G., Chuprynnina I.I. Chromites of the Kempirsai pluton. Moscow. Nauka, 1968. 179 p. (In Russ.)
6. Plaksenko A.N. Typomorphism of accessory chrome spinels ultramafite-mafite igneous formations. Voronezh, Publishing house of Voronezh state University. 1989. 224 p. (In Russ.)
7. Popov Y.V., Zhabin A.V. Pustovit O.E. Mineral composition of serpentinites of the tectonic melange of the Dakhovsky crystalline protrusion (Greater Caucasus) // *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. V. 9. No. 4. Pp. 38-48. DOI: 10.23671/VNC. 2019.4.44487. (In Russ.)
8. Popov Y. V., Pustovit O. E. Mineral composition and regularities of localization of quartz-molybdenite vein mineralization Dakhovsky ore cluster (North-West Caucasus). *News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural Sciences*. 2011. Vol. 165. No. 5 (165). Pp. 70-73. (In Russ.)
9. Silaev V.I., Shabalin V.N., Golubeva I.I., Khazova F.A., Belousova E.A. About zinc-containing and zinkisch the chrome spinels of the Timan-Ural region. *Bulletin of the IG KSC UD RAS*. 2008. No. 8. Pp. 6-16. (In Russ.)
10. Snezhko E.A. Petrochemical types of ultrabasites of the North Caucasus and their structural position. Moscow. VINITI. 1985. Vol. 162. DEP. hands. No. 7884-85. (In Russ.)
11. Yurichev A N. Criteria of regional and local prediction of chromite ore potential in podiform ultramafic massifs of folded regions. *Ores and metals*. 2016. No. 3. pp. 5-14. (In Russ.)
12. Ahmad T., Tanaka T., Sachan H.K., Asahara Y., Islam R., Khanna P.P. Geochemical and isotopic constraints on the age and origin of the Nidar Ophiolitic Complex, Ladakh, India: Implications for the Neo-Tethyan subduction along the Indus suture zone. *Tectonophysics*. 2008. Vol. 451 (1-4). pp. 206-224. DOI: 10.1016/j. tecto. 2007.11.049

13. Ahmed A.H., Surour A.A. Fluid-related modifications of Cr-spinel and olivine from ophiolitic peridotites by contact metamorphism of granitic intrusions in the Ablah area, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. Vol. 122. pp. 58-79. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.03.010
14. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *J. Petrol.* 2001. Vol. 42. pp. 2279-2302.
15. Barra F., Gervilla F., Hernández E., Reich M., Padrón-Navarta J., González-Jiménez J. Alteration patterns of chromian spinels from La Cabaña peridotite, south-central Chile. *Mineral. Petrol.* 2014. Vol. 108. pp. 819-836.
16. Candia M.A. F., Gaspar J.C. Chromian spinels in metamorphosed ultramafic rocks from Mangabal I and II complexes, Goiás, Brazil. *Mineralogy and Petrology*. 1997. Vol. 60 (1-2). pp. 27-40. DOI: 10.1007/BF01163133
17. Dick H.J. B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol. 86 (1). pp. 54-76. DOI: 10.1007/BF00373711
18. Dilek Y., Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Bulletin of the Geological Society of America*. 2011. Vol. 123 (3-4). pp. 387-411. DOI: 10.1130/B30446.1
19. Droop G.T. R. A general equation for estimating Fe<sup>3+</sup> concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*. 1987. Vol. 51 (3). pp. 431-435.
20. Frost B.R., Beard J.S. Erratum: On silica activity and serpentinization (*Journal of Petrology*). *Journal of Petrology*. 2008. Vol. 49 (6). pp. 1253. DOI: 10.1093/petrology/egn026
21. Gervilla F., Padrón-Navarta J.A., Kerestedjian T., Sergeeva I., González-Jiménez J.M., Fanlo I. Formation of ferrian chromite in podiform chromitites from the Golyamo Kamenyane serpentinite, Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: A two-stage process. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2012. Vol. 164 (4). pp. 643-657. DOI: 10.1007/s00410-012-0763-3.
22. Ghazi J.M., Moazzen M., Rahghoshay M., Moghadam H. S. The geodynamic setting of the Nain ophiolites, Central Iran: evidence from chromian spinels in the chromitites and associated rocks. *Ofioliti*. 2011. Vol. 36. No 1. pp. 59-76.
23. Hock M., Friedrich G., Plueger W.L., Wichowski A. Refractory- and metallurgical-type chromite ores, Zambales Ophiolite, Luzon, Philippines. *Mineralium Deposita*. 1986. Vol. 21. pp. 190-199.
24. Irvine T.N. Chromian Spinel As a Petrogenetic Indicator, Part 2 Petrologic Applications. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1967. No. 4. pp. 71-103.
25. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator; Part 1, Theory. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1965. No. 2. pp. 648-671.
26. Ishiwatari A. Alpine ophiolites: product of low-degree mantle melting in a Mesozoic transcurrent rift zone. *Earth and Planetary Science Letters*. 1985. Vol. 76 (1-2). pp. 93-108. DOI: 10.1016/0012-821X(85) 90151-7
27. Iyer K., Austrheim H., John T., Jamtveit B., Serpentinization of the oceanic lithosphere and some geochemical consequences: constraints from the Leka ophiolite complex, Norway. *Chem. Geol.* 2008. Vol. 249. pp. 66-90.
28. Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: An empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42 (4). pp. 655-671.
29. Kapsiotis, A. Composition and alteration of cr-spinels from milia and pefki serpentinitized mantle peridotites (pindos ophiolite complex, greece). *Geologica Carpathica*. 2014. Vol. 65 (1). pp. 83-95. DOI: 10.2478/geoca-2013-0006
30. Korikovskiy S.P., Somn M.L., Korsakov S.G. High-pressure symplectitic garnet-clinopyroxene-margarite-muscovite-clinozoisite amphibolites of the Dakhov Block, Northern

Caucasus: Genesis and composition of reaction textures. Reports Earth Sciences. 2004. T. 397. No. 6. pp. 778-782.

31. Parkinson I.J., Pearce J.A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. Journal of Petrology. 1998. Vol. 39 (9). pp. 1577-1618. DOI: 10.1093/etroj/39.9.1577

32. Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. Kokelaar, B. P., and Howells, M. F., eds., Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins: Geological Society of London Special Publication. 1984. No. 16. pp. 77-94.

33. Philippot P., Blichert-Toft J., Perchuk A., Costa S., Gerasimov V. Lu-Hf and Ar-Ar chronometry supports extreme rate of subduction zone metamorphism deduced from geospeedometry. Tectonophysics. 2001. Vol. 342 (1-2). pp. 23-38. DOI: 10.1016/S0040-1951(01) 00155-X

34. Reed S.J. B. Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology. Cambridge University Press. 2005. 232 p.

35. Rollinson H., Adetunji J. The geochemistry and oxidation state of podiform chromitites from the mantle section of the Oman ophiolite: A review. Gondwana Research. 2015. Vol. 27 (2). pp. 543-554. DOI: 10.1016/j. gr. 2013.07.013.

36. Roeder, P. L., Schulze, D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite. Journal of Petrology. 2008. Vol. 49 (8). pp. 1473-1495. DOI: 10.1093/etrology/egn034.

37. Saumur, B. M., Hattori, K. Zoned Cr-spinel and ferritchromite alteration in forearc mantle serpentinites of the Rio San Juan Complex, Dominican Republic. Mineralogical Magazine. 2012. Vol. 77 (1). pp. 117-136. DOI: 10.1180/minmag. 2013.077.1.11

38. Sen A.K., Sharma P.K., Mohanty D., Ghosh T.K. Composition of Cr-spinel – an ore genetic indicator of Kathpal Chromite Deposit, Sukinda Ultramafic Complex, Orissa, India. Current Science. 2005. Vol. 88. pp. 1547-1550.

39. Somin M.L., Levchenkov O.A., Kotov A.B., Makeev A.F., Komarov A.N., Ro N.I., Lavrishchev V.A., Lebedev V.A. The Paleozoic age of high-pressure metamorphic rocks in the Dakhov Salient, northwestern Caucasus: Results of U-Pb geochronological investigations. Doklady Earth Sciences. 2007. T. 416. No. 1. pp. 1018-1021.

40. Zaeimnia F., Kananian A., Arai S., Mirmohammadi M., Imamalipour A., Khedr M.Z., Miura M., Abbou-Kebir K. Mineral chemistry and petrogenesis of chromitites from the Khoy ophiolite complex, Northwestern Iran: Implications for aggregation of two ophiolites. Island Arc. 2017. Vol. 26 (6). No. e12211. DOI: 10.1111/iar. 12211

УДК 556.34

DOI: [10.46698/VNC.2020.45.55.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.45.55.004)

Оригинальная статья

## Гидрогеохимические особенности Северо-Осетинского артезианского бассейна

А. К. Джгамадзе<sup>ID</sup>, Р. Р. Гогичев<sup>ID</sup>

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: avtandil51@mail.ru

Статья поступила: 16.03.2020, доработана: 01.06.2020, одобрена в печать: 05.06.2020

**Резюме: Актуальность работы.** Проблема загрязнения питьевых вод является очень актуальной для урбанизированных территорий планеты. Подземные воды Северо-Осетинского артезианского бассейна сегодня являются одним из основных источников, обеспечивающих население Республики пресной водой. Вместе с тем подземные воды бассейна уязвимы, мало защищены от техногенного воздействия. Наличие на территории РСО-Алания предприятий горнопромышленного, металлургического и др. производств негативно сказывается на качестве подземных вод. В статье рассматривается его современное состояние. **Цель работы** – изучение техногенного воздействия на подземные воды, использование подземных вод Северо-Осетинского артезианского бассейна, его гидрогеохимические показатели. **Методы исследования.** Гидрологические и гидрохимические исследования водоносного комплекса, проведенные за последние десятилетия в гидрогеологических скважинах, которые были пробурены с целью водоснабжения населения и промышленных предприятий столицы республики, показывают, что качество подземных вод соответствует требованиям, предъявляемым к питьевой воде. **Результаты работ.** Изменение качества артезианских вод бассейна происходит под влиянием интенсивности их добычи, как непосредственно из бассейна, так и в зоне питания водоносного комплекса. На Редантском месторождении отмечается понижение уровня воды эксплуатируемого водоносного горизонта, а также засорение скважин. Расположение Орджоникидзевского месторождения (выше Редантского) способствует низкому уровню выхода сульфидных вод на поверхность. Высокая интенсивность эксплуатации Орджоникидзевского месторождения приводит к понижению уровня вод в продуктивном водоносном горизонте, который приводит к смешению минеральных вод с водами, в которых имеется высокое содержание солей, от чего меняется ионный состав подземных вод, их оттоку в сторону формирования водоносного комплекса отложений рухсдзуар Северо-Осетинского артезианского бассейна. Также большое влияние на формирование химического состава вод оказывает бессистемная эксплуатация водоносного горизонта в северо-восточной части Владикавказа.

**Ключевые слова:** артезианский бассейн, рухсдзуар, водоносный горизонт, подземные воды, геолого-гидрогеологический разрез.

**Для цитирования:** Джгамадзе А.К., Гогичев Р.Р. Гидрогеохимические особенности Северо-Осетинского артезианского бассейна. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 56-70. DOI: 10.46698/VNC.2020.45.55.004.

DOI: [10.46698/VNC.2020.45.55.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.45.55.004)

Original paper

## Hydrogeochemical features of the North Ossetian artesian basin

A. K. Dzhgamadze , R. R. Gogichev 

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: avtandil51@mail.ru

Received: 16.03.2020, revised: 01.06.2020, accepted: 05.06.2020

**Abstract: Relevance.** The problem of drinking water is very vulnerable to the urban areas of the planet. Groundwater of the North Ossetian artesian basin today is one of the main sources providing the population of the Republic with fresh water. At the same time, the underground waters of the basin are vulnerable, poorly protected from anthropogenic impact. The presence on the territory of North Ossetia-Alania of mining, metallurgical, and other enterprises negatively affects the quality of groundwater. The article discusses its current state. **The aim of the work** is to study the impact of the ground water use in the North Ossetian artesian basin and its hydrogeochemical parameters. **Methods.** Hydrological and hydrochemical studies conducted in recent years in hydrogeological wells, which were drilled to supply the population and industrial enterprises of the capital in republic show that the quality of groundwater meets the requirements for drinking water. **Results.** The change in the quality of artesian waters of the basin occurs under the influence of the intensity of their extraction, both directly from the basin and in the recharge zone of the aquifer. At the Redant field, a decrease in the level of exploited aquifer is noted. The location of the Ordzhonikidze field (above Redant) contributes to a low level of sulfide water output on the surface. The high intensity of exploitation leads to a decrease in the water level in the productive aquifer, which leads to a mixed content of mineral waters and water in which there is a salt content, which changes the ionic composition of groundwater, and their outflow towards the formation of rukhsdzuar aquifer complexes of the Ossetian artesian basin. Great influence on the chemical composition of water has a patternless exploitation of the aquifer in the north-eastern part of Vladikavkaz.

**Keywords:** artesian basin, rukhsdzuar, aquifer, groundwater, geological and hydrogeological section.

**For citation:** Dzhgamadze A. K., Gogichev R. R. Hydrogeochemical features of the North Ossetian artesian basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2020. 10 (1): 56-70. DOI: 10.46698/VNC.2020.45.55.004.

### Введение

К концу двадцатого столетия экологические направления геологии прочно заняли одно из ведущих мест в многочисленных теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в рамках наук о Земле. В особой мере это относится к экологической гидрогеологии, призванной выявлять, рационально использовать и охранять наиболее ценный сырьевой ресурс и компонент геологической среды – подземные воды. Достаточно упомянуть здесь защиту качества питьевых водных ресурсов; выявление, оценку и прогноз процессов загрязнения подземных вод, как одного из техногенно – уязвимых компонентов среды, реабилитацию загрязненных подземных вод, в том числе, в районах крупных экологических катастроф [Алборов и др., 2013; Бондырев, Заалишвили, 2003; Бурдзиева, Заалишвили, 2009; Бурдзиева

и др., 2012, 2014; Заалишвили, 1996; Заалишвили, Рогожин, 2010; Заалишвили и др., 2006, 2008, 2010, 2013а, б].

Значительное воздействие на состояние территории и, в целом, на окружающую среду г. Владикавказа оказывает горнодобывающая деятельность. Кроме того, регион относится к сейсмически активным регионам, что увеличивает ожидаемое экологическое воздействие на окружающую среду. При этом необходимо отметить, что город, являясь современной урбанизированной территорией, активно развивается, находя все новые районы, не всегда экологически надежные [Заалишвили, 2014; Заалишвили, Кранцфельд, 2014; Заалишвили и др., 2015; Шемпелев и др., 2017; Baluch, Hashmi, 2019].

На территории Республики Северная Осетия-Алания техногенно-уязвимым компонентом геологической среды являются пресные подземные воды Северо-Осетинского артезианского бассейна. Уязвимость обусловлена недостаточной защищенностью подземных вод и техногенной нагрузкой территории, состояние которой не исключено формируется на уровне нано-размерных частиц загрязнителей [Burdzieva et al., 2016; Grigorkina et al., 2017; Hou Wei et al., 2019; Kozuskanich et al., 2014; Rosca et al., 2020].

Проблема загрязненности водных горизонтов обуславливается подверженностью их значительным антропогенным воздействиям хорошо известным в мире [Hou Wei et al., 2019; Kozuskanich et al., 2014; Rosca et al., 2020]. Особенности глубинного строения региона обуславливают активные геодинамические движения, что еще больше осложняет ситуацию [Шемпелев и др., 2017; Shempelev et al., 2017]. В последние годы идут активные работы по цифровизации инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий с активным использованием ГИС-технологий [Заалишвили и др., 2015; Shempelev et al., 2017]. Разработка единой модели геоинформационной системы городского планирования и интеграции позволит ускорить изучение состояния на основе современных подходов [Zaalishvili et al., 2016, 2018].

Гидрогеологические условия Северо-Осетинской наклонной равнины обусловлены местоположением ее в зоне сочленения структур Большого Кавказа и Терско-Каспийского передового прогиба.

Осетинская наклонная равнина, к которой приурочен одноименный артезианский бассейн, представляет собой глубокую впадину, заполненную валунно-галечниковыми отложениями. Абсолютные отметки равнины колеблются в пределах 800-320 м.

Северо-Осетинский артезианский бассейн сложен толщей рыхлых терригенных отложений от миоцена до современных, подстилаемых пачкой водоупорных пород нижнего и среднего сармата и майкопской серии.

Ресурсы подземных вод формируются в областях выходов водопроницаемых пород на дневную поверхность. Основными источниками питания для водоносных горизонтов (комплексов) являются атмосферные осадки и воды рек, расчленяющих Осетинскую наклонную равнину: Камбилеевки, Терека, Гизельдона, Фиагдона, Ардона, Урсдона, Уруха и др. Водосборная площадь, с которой сливается поверхностный сток во впадину, составляет около 6000 км<sup>2</sup>. Четвертичные аллювиально-флювиогляциальные (селевые) отложения в пределах Северо-Осетинского артезианского бассейна залегают на площади 1500 км<sup>2</sup>.

Северо-Осетинский артезианский бассейн представляет собой огромный резервуар, на 25% выполненный подземными водами. Этот резервуар постоянно

пополняется грунтовыми водами протекающих в аллювиальных отложениях рек. Кроме того, разливающиеся по поверхности равнины речные воды, а также выпадающие атмосферные осадки в довольно значительной части расходуют свой поток на инфильтрацию в крупнопористый песчано-гравийно-галечниковый материал, заполняющий котловину. Этими поступлениями и определяется непрерывное восполнение эксплуатационных ресурсов подземных вод, формирующихся в рыхлых отложениях впадины.

Единственным выходом из Осетинского артезианского бассейна для поверхностных и подземных вод являются «Эльхотовские ворота», пропиленные водами р. Терек в Сунженском (Мало-Кабардинском) хребте.

### Гидрогеологические условия города Владикавказа

В гидрогеологическом отношении, достаточно изучены водоносные горизонты четвертичных образований и акчагыл-апшерона (свиты рухсдзуар). Наибольший практический интерес представляют воды аллювиально-флювиогляциальных отложений ниже-верхнеплейстоценового возраста, эксплуатацией которых обеспечивается централизованное водоснабжение населенных пунктов Осетинской наклонной равнины. Ниже приводится характеристика водоносных горизонтов и комплексов, развитых в пределах бассейна (рис. 1).

*Водоносный горизонт современных аллювиальных отложений ( $Q_{IV}$ )* прослеживается в долинах рек и балок в виде узких полос. Водовмещающие породы представлены валунно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем. Воды пресные (минерализация 0,2–0,5 г/дм<sup>3</sup>), по химическому составу гидрокарбонатные магниево-кальциевые.

Мощность аллювия в долинах рек составляет от 10 до 40 м (рр. Камбилеевка, Ардон) до 80–180 м (р. Терек у с. Редант). Глубина залегания грунтовых вод колеблется от 0 до 1–2 м. Естественная разгрузка грунтовых вод происходит путем их выклинивания в виде родников или непосредственно в реки. Аллювиальные отложения характеризуются значительной водообильностью ( $K_{\phi} = 25–88$  м/сутки).

Воды пресные (минерализация 0,2–0,5 г/дм<sup>3</sup>), по химическому составу гидрокарбонатные магниево-кальциевые. Горизонт имеет большое практическое значение.

*Водоносный горизонт ниже-верхнечетвертичных отложений ( $afQ_{I-III}$ )* имеет широкое развитие в равнинной части территории артезианского бассейна. Водовмещающей является мощная толща валунно-гравийно-галечниковых отложений с песчаным и песчано-глинистым заполнителем. Питание водоносного горизонта по всей площади распространения четвертичных отложений осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и вод поверхностных водотоков. Естественная разгрузка подземных вод горизонта осуществляется в речную сеть в виде родников, а также путем оттока за пределы бассейна через «Эльхотовские ворота».

По химическому составу воды нерасчлененных ниже-верхнеплейстоценовых отложений гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые, пресные с минерализацией 0,3–0,8 г/дм<sup>3</sup>.

Согласно работе «Оценка обеспеченности населения Российской Федерации ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения (РСО-Алания)» прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод в районе развития безнапорных подземных вод в отложениях четвертичного возраста Осетинского артезианского бассейна оцениваются в количестве 1211 тыс. м<sup>3</sup>/сутки.

Воды четвертичных отложений Северо-Осетинского артезианского бассейна являются основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения для городов Беслан, Ардон, Дигора и других населенных пунктов.

*Водоносный комплекс плиоцен-эоплейстоценовых (акчагыл-апшеронских) отложений ( $N_2^2a-Q_{Eap}$ )* распространен на северных склонах Лесистого хребта и далее простирается сплошным чехлом под четверичными отложениями и обнажается на южном склоне Сунженского хребта.

Водовмещающими породами свиты рухсдзуар являются валунно-галечниковые отложения с песчаным или песчано-глинистым заполнителем.

Глубина залегания уровня подземных вод уменьшается по мере удаления от южного борта бассейна к северу от 90-130 м (г. Владикавказ) до 10-50 м (г. г. Беслан, Ардон).

Питание водоносного комплекса происходит за счет атмосферных осадков, выпадающих в области выходов отложений акчагыл-апшерона на дневную поверхность.

Подземные воды Северо-Осетинского артезианского бассейна, являющегося основным источником питьевого водоснабжения населенных пунктов, расположенных в пределах равнины, в том числе столицы Республики г. Владикавказа, недостаточно защищены от загрязнения из-за отсутствия в разрезе выдержанных водоупорных слоев. На территории функционируют многочисленные предприятия горнодобывающей, металлургической и перерабатывающей промышленности. Природоохранные мероприятия промышленных предприятий не всегда удовлетворяют требованиям по охране окружающей среды, в том числе водного бассейна территории (подземные воды, поверхностные водотоки), что в итоге может привести к возникновению негативных необратимых процессов.

Тем не менее, за последние 30 лет в подземных водах в юго-восточной части Северо-Осетинского артезианского бассейна произошли серьезные качественные изменения в сторону увеличения содержания некоторых химических компонентов (рис. 2). Конкретно, эти изменения наблюдаются в северной части Промышленного муниципального округа города Владикавказа, где сосредоточены промышленные предприятия, в том числе металлургической промышленности. Подземные воды на этой территории залегают на глубинах от 145 м до 100 м. Вся зона аэрации представлена валунно-галечными образованиями с песчано-глинистым заполнителем, характеризующимися высокими фильтрационными свойствами (коэффициент фильтрации – 10-12 м/сутки). Через эту зону в подземную среду постоянно поступают и мигрируют различные вещества посредством инфильтрации атмосферных осадков, количество которых в разрезе года достигает 1200 мм.

В процессе гидрогеологических исследовательских работ, проведенных за последние 50 лет на территории Республики, гидрогеологи большое внимание уделяли оценке природоохранных мероприятий и разработке рекомендаций, предотвращающих загрязнение и истощение подземных вод (Джгамадзе, 2010, Пащенко, Джгамадзе, 2006, Пащенко, 2007).

По данным гидрохимического опробования водоносного комплекса в отдельных гидрогеологических скважинах, пробуренных в разные годы для водоснабжения населения и промышленных предприятий г. Владикавказа, качество подземных вод соответствовало требованиям, предъявляемым к питьевой воде. Жесткость воды составляла 4-5 мг-экв/дм<sup>3</sup> (норма – 7), а минерализация не превышала 0,5 г/дм<sup>3</sup> (норма – до 1 г/дм<sup>3</sup>) (Пащенко, 2006).



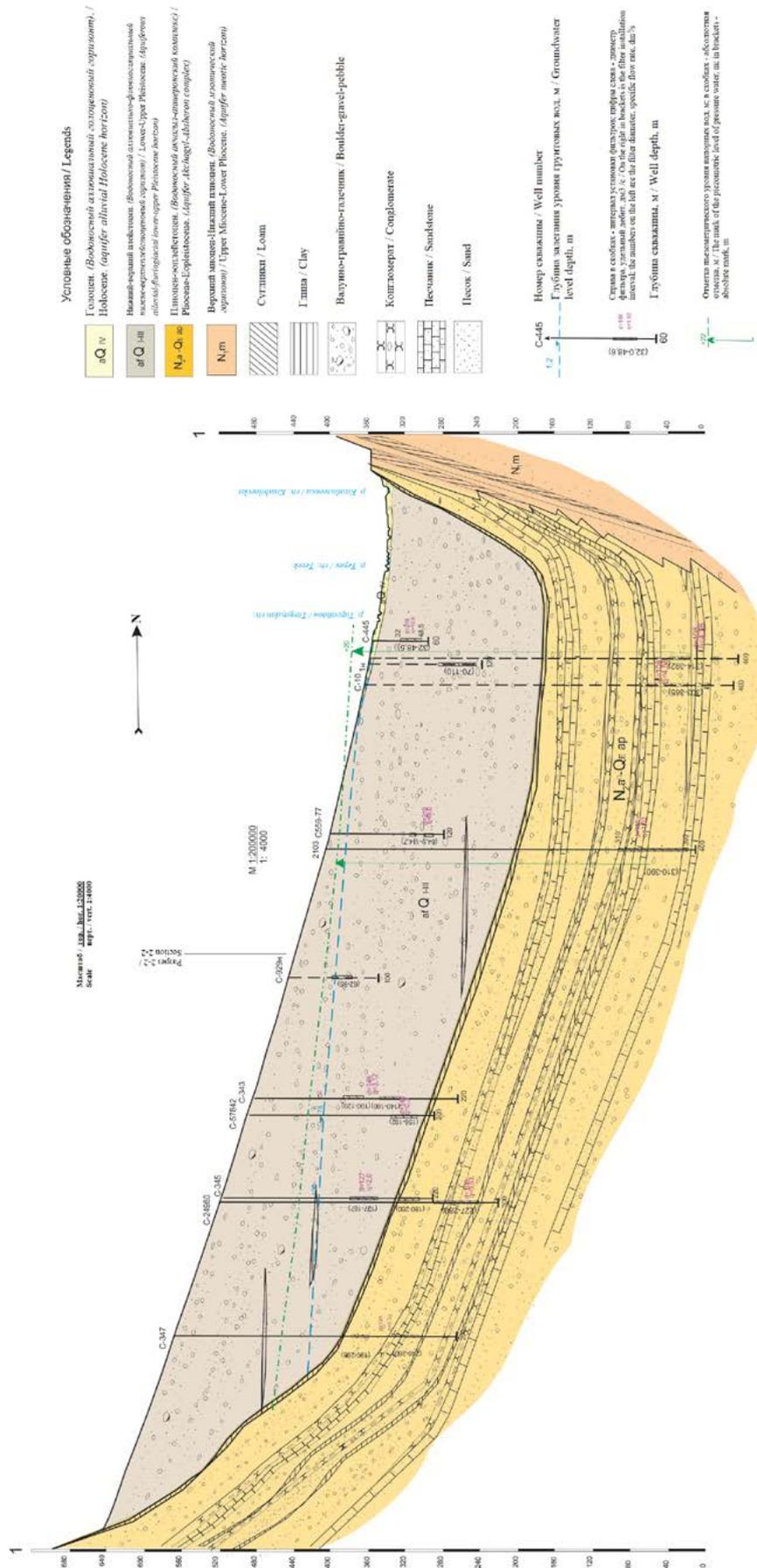


Рис. 2. Схематический геолого-гидрогеологический разрез к карте Осетинского АБ. /  
Fig. 2. Schematic geological and hydrogeological section to the geological and hydrogeological map of the Ossetian Artesian Basin.

В последние 20 лет отмечено увеличение жесткости воды, достигшей по отдельным водозаборам 18 мг-экв/дм<sup>3</sup>, при этом минерализация увеличилась до 1,5 г/дм<sup>3</sup> (Пашенко, 2007). Тенденция к увеличению жесткости и минерализации подземных вод отмечается с 1991 года, и сохраняется по настоящее время (таблица 1).

На схематической геолого-гидрогеологической карте (рис. 3) приводятся гидрогеологические скважины, функционирующие в северо-восточной части города Владикавказа, по которым зарегистрировано изменение качества подземных вод (Джгамадзе, 2010, Пашенко, Джгамадзе, 2006, Пашенко, 2007). Что касается других частей города, такое резкое изменение качества подземных вод не отмечено. На схематической карте выделен ореол, в пределах которого фиксируется ухудшение качества подземных вод.

Ниже в таблице 1 приводятся водозаборные скважины, функционирующие в пределах Промышленного района г. Владикавказа, по которым систематически отмечается увеличение жесткости воды.

На Заводском скважинном водозаборе, из которого осуществляется снабжение питьевой водой населения пос. Заводской (около 25 тыс. человек) Промыш-

Таблица 1. / Table 1.

**Жесткость подземных вод по водозаборным участкам восточной части г. Владикавказ / Groundwater hardness in the water intake areas of the eastern part of Vladikavkaz**

№№ п/п / No.	Ведомственная принадлежность и номер скважины / Departmental affiliation and number of well	Время опробования, год / sampling time, year	Жесткость воды, мг-экв/дм <sup>3</sup> / Water hardness, mEq/dm <sup>3</sup>
1	2	3	4
	ВМУП «Водоканал» (Заводской в-р) / VMUP «Vodokanal» (Zavodskoi w-i): Скв. №2 / Well No. 2 Скв. №4 / Well No. 4	2009-2010 2017	8,9-11,0 11,2
2.	ООО «Люкс» – скв.№6/2 / ООО «Lyuks» Well No. 6/2	2004-2005 2017	7,9-10,3 12,4
3.	ОАО «ВПБЗ «Дарьял» – скв.№2110 / ОАО «VPBZ «Dar'yal» – Well No. 2110	2004-2008	7,7-9,9
4.	ООО «Форвард» – скв.№79 / ООО «Forvard» – Well No. 79	2007-2008 2014	10,0-11,0 10,0
5.	ЗАО «Ариана» – скв.№1/96 / ЗАО «Ariana» – Well No. 1/96	2006-2008	8,2-8,6
6.	ООО Агрофирма «ФАТ» – скв.№250 / ООО Agrofirma «FAT» – Well No. 250	2006-2009 2014	14,7-18,5 14,4
7.	ОАО «Победит» – скв. №2112 / ОАО «Pobedit» – Well No. 2112	2009-2010	7,0-8,5
8.	ООО «Престиж» скв. №4 / ООО «Prestizh» Well No. 4	2014	12,8

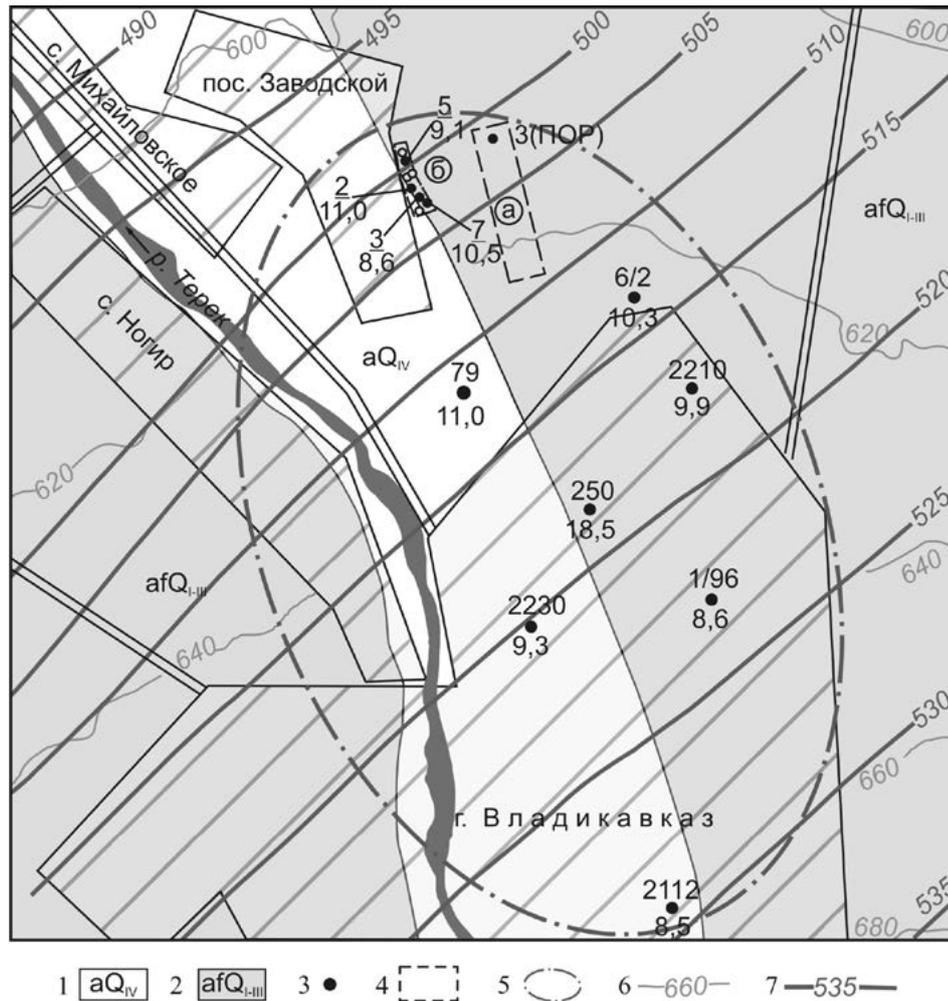


Рис. 3. Схематическая геолого-гидрогеологическая карта северной части г. Владикавказ. Масштаб 1:50000: 1 – аллювиальные отложения современного возраста; 2 – аллювиально-флювиогляциальные нижне-верхнечетвертичные отложения; 3 – скважина: сверху – номер, внизу – жесткость воды, мг-экв/дм<sup>3</sup>; 4 – участок недр с оцененными эксплуатационными запасами ПВ: а – проектный водозабор для чрезвычайных ситуаций г. Владикавказ № 2, б – Заводской водозабор; 5 – ореол площади с повышенной жесткостью подземных вод; 6 – изолинии поверхности, м; 7 – гидроизопезы водоносного комплекса отложений свиты рукхсдуар и их абсолютные отметки, м. /

Fig. 3. Schematic geological and hydrogeological map of the northern part of the city of Vladikavkaz. Scale 1:50000: 1 – alluvial deposits of modern age; 2 – alluvial-fluvioglacial lower-upper Quaternary deposits; 3 – well: above – number, below – water hardness, mEq / dm<sup>3</sup>; 4 – subsoil plot with estimated operational reserves of water: a – design water intake for emergency situations in Vladikavkaz No. 2, b – Zavodskoi water intake; 5 – a halo of an area with increased groundwater hardness; 6 – surface isolines, m; 7 – hydroisopies of the aquifer complex of the rukhsdzuar formations deposits and their absolute elevations, m.

ленного района г. Владикавказ, по результатам опробования по окончании бурения (1975–1976 гг.) эксплуатационных скважин жесткость подземных вод выдерживалась в пределах нормы (7 мг-экв/дм<sup>3</sup>) и составляла 4–5 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Начиная с 1991 года (по данным ведомственного мониторинга) жесткость воды стала увеличиваться и, как видно из приведенной таблицы, в 2010 году она достигла 11,0 мг-экв/дм<sup>3</sup> (Джгамадзе, 2010). Такая же картина наблюдается по другим водозаборам указанной территории. Максимальное значение жесткости воды отмечается по

скважине №250 (ООО Агрофирма «ФАТ») – 18,5 мг-экв/дм<sup>3</sup>, при минерализации воды 1,5 г/дм<sup>3</sup> (Пащенко, 2007).

В южной части Северо-Осетинского артезианского бассейна в водоносном комплексе отложений свиты рухсдзуар за рассматриваемый 20-летний период подверглось изменению содержание (в сторону увеличения), таких компонентов, как ионы сульфата, гидрокарбоната и кальция. Содержание кальция увеличилось с 50 (1976 г.) мг/дм<sup>3</sup> до 136–174 (2009 г.) мг/дм<sup>3</sup>, сульфата с 17–40 мг/дм<sup>3</sup> до 91–169 мг/дм<sup>3</sup>, хлора – с 7–10 – до 28–60 мг/дм<sup>3</sup>. Значительно увеличилось также содержание гидрокарбоната – до 262–364 мг/дм<sup>3</sup> (Джгамадзе, 2010; Пащенко, Джгамадзе, 2006).

По поводу происходящих изменений качества подземных вод в юго-восточной части Северо-Осетинского артезианского бассейна достаточно весомой представляется версия загрязнения водоносного горизонта промышленными отходами заводов ОАО «Электроцинк» и ОАО «Победит». Промышленные отходы этих предприятий в течение более ста лет размещаются на отвальных площадках заводов в северной части г. Владикавказа. В составе отвалов имеются элементы, относящиеся к различным классам опасности, в т. ч. и к первому, в частности, свинец, цинк, кадмий и др. Поступление этих элементов в водоносный горизонт нельзя рассматривать, как только простое загрязнение геологической среды. Это способствует изменению химического состава подземных вод, благодаря не только приносу инородных компонентов, но и изменению физико-химических процессов при их миграции в зоне аэрации и водонасыщенной среде. Схематически этот процесс можно представить следующим образом: подкисленные серной кислотой (на отвальных полях размещаются продукты переработки сульфидных руд) ливневые воды стекают по поверхности и, просачиваясь в почву, усиливают растворение карбонатных и других пород, тем самым, увеличивая в воде содержание ионов кальция, магния, кремния (Пащенко, Джгамадзе, 2006).

Изменение качества подземных вод в юго-восточной части артезианского бассейна происходит на фоне интенсивной добычи подземных вод, как непосредственно из бассейна, так и за его пределами – в зоне питания водоносного комплекса, где с юга по расширенной пойме р. Терек из Дарьяльского ущелья в равнину устремляется мощный поток поверхностных и подземных вод. Вместе с тем у выхода из Дарьяльского ущелья, севернее Редантской переуглубленной долины аллювиально-флювиогляциальные отложения безводные и здесь происходит инфильтрация значительной части речных вод, питающих водоносные горизонты артезианского бассейна. Таким образом, поверхностный сток р. Терек, и поток подземных вод, поступающий из Редантской переуглубленной долины, к которой приурочено Орджоникидзевское месторождение подземных вод, снабжающее г. Владикавказ, в значительной степени участвуют в питании первого от поверхности водоносного комплекса отложений свиты рухсдзуар в юго-восточной части Северо-Осетинского артезианского бассейна (Джгамадзе, 2010).

Формирование ресурсов подземных вод Орджоникидзевского месторождения происходит как за счет подруслового потока р. Терек, так и за счет подземных вод, формирующихся в верхних зонах (190–200 м) карбонатных пород титонского яруса, поток из которых контролируется ветвями Карцинского разлома.

### Обсуждение результатов

Производительность Редантского водозабора систематически превышает утвержденные запасы (250 тыс. вместо 210 тыс. м<sup>3</sup>/сутки). Возможно, по этой причине

не на месторождении в течение тех же 30 лет происходит неадекватное понижение уровня воды эксплуатационного водоносного горизонта и кольматация водовмещающих пород. Это привело к отрыву уровня подрусловых вод от русла р. Терек на водозаборных участках и распространению депрессионной воронки в таком масштабе, что Редантские родники, выходящие из известняков титона на левом борту переуглубленной долины, с утвержденными запасами подземных вод в количестве 13,8 тыс. м<sup>3</sup>/сутки по категории В, на протяжении нескольких лет не функционировали, по-видимому, из-за перехвата части родникового стока работой Редантского скважинного водозабора.

Само Орджоникидзевское месторождение пресных вод расположено над Редантским месторождением сульфидных вод. Зона сульфидных вод здесь начинается с глубины около 200 м. Выходу их на поверхность препятствует низкий пьезометрический уровень (не более 10 м), а также зона пресных вод в верхней части разреза отложений титона. С уменьшением мощности последней за счет срабатывания напоров, а также повышения роли пресных вод титонских отложений в формировании ресурсов грунтовых вод, возможно, происходит подтягивание глубинных сероводородных вод к поверхности. Глубина эксплуатационных скважин Редантского водозабора составляет около 80 м, а мощность водоносного горизонта достигает 140 м. Соответственно, активная зона водоотбора достигает глубины 80 м при инфильтрации поверхностного стока, а воды, обогащенные сероводородом за счет подтока из нижезалегающего водоносного комплекса минеральных вод, из интервала, ниже активной зоны эксплуатации водозабора 80–140 м, поступают через водоупорные глины майкопа в рыхлые породы, формируя на юге артезианского бассейна водоносный комплекс отложений свиты рухсдзуар (акчагыла–апшерона). Можно предположить, что бессистемная эксплуатация Орджоникидзевского месторождения провоцирует подтягивание сероводородных вод в верхние зоны, где происходит их смешение и отток в сторону формирования водоносного комплекса отложений рухсдзуар Северо-Осетинского артезианского бассейна. Этот процесс достаточно распространен, особенно в долинах крупных рек, и происходит в водоносных комплексах, залегающих на различных глубинах. В зависимости от состава смешивающихся вод формируются воды другого, отличного от естественного, состава. В рассматриваемом случае можно предположить смешение минеральных и пресных вод, в результате чего происходит изменение ионного состава пресных вод и выпадение из них в осадок слаборастворимых веществ – сульфатов и карбонатов кальция.

Таким образом, приведенные предположения относительно причин изменения качества подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта в худшую сторону в данном конкретном случае имеют право на существование. Но среди множества условий и факторов, влияющих на формирование химического состава вод, одним из важнейших является активная, в большинстве случаев, бессистемная эксплуатация водоносных горизонтов как в пределах рассматриваемой территории, в северо-восточной части города Владикавказа, так и за ее пределами, откуда осуществляется питание эксплуатационного горизонта.

Одной из причин происходящего процесса можно предположить следующий фактор. На вышеуказанной площади, в промышленной зоне г. Владикавказа, сосредоточены и функционируют около 50 эксплуатационных скважин производительностью около 1000 м<sup>3</sup>/сутки каждая. При такой интенсивной добыче подземных

вод из водоносного комплекса рухсдзуар с относительно низкой водообильностью происходит прогрессирующее понижение уровня в продуктивном водоносном горизонте, что обуславливает подтягивание подземных вод с повышенным содержанием солей из нижележащих слоев.

### Выводы

Предполагается, что бессистемная эксплуатация Орджоникидзевского месторождения провоцирует подтягивание сероводородных вод в верхние зоны, где происходит их смешение и отток в сторону формирования водоносного комплекса отложений рухсдзуар Северо-Осетинского артезианского бассейна. Это может быть объяснено смешением минеральных и пресных вод, в результате чего происходит изменение ионного состава пресных вод и выпадение из них в осадок слаборастворимых веществ – сульфатов и карбонатов кальция.

Окончательное решение вопроса по выявлению причин происходящего и принятию соответствующих мер, возможно, по результатам:

а) проведения специализированных эколого-гидрогеологических и гидрогеологических изысканий на площадках размещения промышленных отходов заводов ОАО «Электроцинк» и ОАО «Победит»;

б) проведения гидрогеологических исследований на Орджоникидзевском месторождении подземных вод с переоценкой эксплуатационных запасов и выработкой рациональной схемы эксплуатации месторождения;

в) организации мониторинга подземных вод в черте Осетинского артезианского бассейна по всем действующим скважинным водозаборам, с последующим анализом его результатов.

### Литература

1. Алборов И. Д., Заалишвили В. Б., Тедеева Ф. Г. Экологический риск, принципы оценки окружающей природной среды и здоровья населения. // Для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 280700 «Техносферная безопасность». – Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН, 2013. – 343 с.

2. Бондырев И. В., Заалишвили В. Б. Опасность активизации геодинамических процессов на Северном Кавказе. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2003. – Т. 3. №2. – С. 39-46.

3. Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Исследование влияния хвостохранилища на окружающую среду в условиях высокой сейсмической опасности. // В сборнике: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе Труды III Кавказской международной школы-семинара молодых ученых. / Редакторы: Николаев А. В., Заалишвили В. Б. – Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН, 2009. – С. 355-360.

4. Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б., Бериев О. Г., Закс Т. В., Кануков А. С. Об экологических аспектах современной урбанизированной территории при сильных землетрясениях. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2012. – №3. – С. 62-67.

5. Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б., Бериев О. Г., Кануков А. С., Майсурадзе М. В. Влияние горнодобывающей деятельности на загрязнение окружающей среды. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – №4-2. – С. 8-13.

6. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками Заалишвили В. Б. // Автореферат диссертации на ученую степень доктора физико-математических наук. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1996. – 222 с.

7. Заалишвили В. Б., Габеева И. Л., Гогмачадзе С. А. Оценка сейсмической опасности грунтов при сильных землетрясениях в условиях пересеченного рельефа в горных районах. // В книге: Системные исследования современного состояния и пути развития Юга России (природа, общество, человек). Тезисы докладов международной научной конференции. – 2006. – С. 135-136.
8. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В. Особенности динамического поведения грунтов территории г. Владикавказа. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 2. – С. 67-71.
9. Заалишвили В. Б., Рогожин Е. А. Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования. // В сборнике: мониторинг и прогнозирование природных катастроф. Труды института геологии Дагестанского научного центра Российской Академии Наук. – 2010. – С. 251-262.
10. Заалишвили В. Б., Бериев О. Г., Закс Т. В. Медико-экогеофизический мониторинг урбанизированной горной территории. // В сборнике: Устойчивое развитие горных территорий в условиях глобальных изменений. Материалы VII Международной научной конференции (Электронный ресурс, CD-ROM – диск). – Владикавказ. – 2010.
11. Заалишвили В. Б., Джгмадзе А. К., Гогичев Р. Р. О создании карт инженерно-геологического районирования населенных пунктов республики Северная Осетия-Алания, как основы сейсмического микрорайонирования. // Геология и геофизика Юга России. – 2013а. – № 3. – С. 20-28.
12. Заалишвили В. Б., Бериев О. Г., Бурдзиева О. Г., Закс Т. В., Кануков А. С. Онкозаболеваемость населения г. Владикавказа и его взаимосвязь с различными факторами. // Геология и геофизика Юга России. – 2013б. – № 3. – С. 29-38.
13. Заалишвили В. Б. Корреляционные взаимосвязи между линейными и нелинейными характеристиками грунтов по инструментальным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 4. – С. 45-57.
14. Заалишвили В. Б., Кранцфельд Я. Л. Геофизическая основа инженерной сейсмозащиты ответственных объектов строительства. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 1. – С. 39-50.
15. Заалишвили В. Б., Джгмадзе А. К., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В., Габараев А. Ф., Габеева И. Л., Дзэбоев Б. А., Кануков А. С., Шепелев В. Д. Уточнение инженерно-геологических условий территории с помощью микросейсм (на примере населенных пунктов республики Северная Осетия-Алания). // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 1. – С. 5-20.
16. Шемпелев А. Г., Заалишвили В. Б., Кухмазов С. У. Глубинное строение западной части Центрального Кавказа по геофизическим данным. // Геотектоника. – 2017. – № 5. – С. 20-29.
17. Baluch, Mansoor A.; Hashmi, Hashim Nisar Investigating the Impact of Anthropogenic and Natural Sources of Pollution on Quality of Water in Upper Indus Basin (UIB) by Using Multivariate Statistical Analysis. // Journal of Chemistry. – 2019. – Vol. 2. No. 4307251.
18. Burdzieva, O. G., Zaalishvili, V. B., Beriev, O. G., Kanukov, A. S., Maysuradze, M. V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. // International Journal of GEOMATE. – 2016. – No. 10 (1). – Pp. 1693-1697.
19. Grigorkina, G. S., Ramonova, A. G., Kibizov, D. D., Kozyrev, E. N., Zaalishvili, V. B., Fukutani, K., Magkoev, T. T. Probing specific oxides as potential supports for metal/oxide model catalysts: MgO (111) polar film. // Solid State Communications. – 2017. – Vol. 257. – Pp. 16-19. DOI: 10.1016/j.ssc.2017.03.014
20. Hou, Wei; Zhai, Liang; Qiao, Qinghua et al. Monitoring the Intensity of Human Impacts on Anthropogenic Landscape: A Mapping Case Study in Beijing, China. // Ecological Indicators. – 2019. – Vol. 102. – Pp. 382-393.
21. Kozuskanich, John C.; Novakowski, Kent S.; Anderson, Bruce C. et al. Anthropogenic Impacts on a Bedrock Aquifer at the Village Scale. // Groundwater. – 2014. – Vol. 52. Issue 3. – Pp. 474-486

22. Rosca, Oana Mare; Dippong, Thomas; Marian, Monica et al. Impact of anthropogenic activities on water quality parameters of glacial lakes from Rodnei Mountains, Romania. // *Environmental Research*. – 2020. – Vol. 182. No. 109136.

23. Shempelev A. G., Zaalishvili V. B., Kukhmazov S. U. Deep Structure of the Western Part of the Central Caucasus from Geophysical Data. // *Geotectonics*. – 2017. – Т. 51. No. 5. – Pp. 479-488.

24. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Kanukov A. S., Dzeranov B. V., Shepelev V. D. Application of Microseismic and Computational Techniques in Engineering-Geological Zonation. // *International Journal of Geomate*. – 2016. – Т. 10. No. 1. – Pp. 1670-1674.

25. Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Melkov D. A., Makiev V. D., Dzobelova L. V. Development of a Unified Model of Geoinformation System for City Planning and Integration. // *International Journal of Geomate*. – 2018. – Т. 15. No. 51. – Pp. 160-166.

## References

1. Alborov I. D., Zaalishvili V. B., Tedeeva F. G. Ecological risk, principles of environmental assessment and public health. For bachelors and masters studying in the direction 280700 “Technosphere safety”. Vladikavkaz: CGI VSC RAS, 2013. 343 p. (In Russ.)

2. Bondyrev I. V., Zaalishvili V. B. The danger of activation of geodynamic processes in the North Caucasus. *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2003. Vol. 3. No. 2. pp. 39-46. (In Russ.)

3. Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Study of the impact of the tailings on the environment in conditions of high seismic hazard. In: *Proceedings of the III Caucasian International School-Seminar for Young Scientists “Seismic hazard and seismic risk management in the Caucasus”*. Vladikavkaz: CGI VSC RAS, 2009. pp. 355-360. (In Russ.)

4. Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B., Beriev O. G., Zaks T. V., Kanukov A. S. On the environmental aspects of the modern urbanized area during strong earthquakes. *Earthquake engineering. Safety of facilities*. 2012. No. 3. pp. 62-67. (In Russ.)

5. Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B., Beriev O. G., Kanukov A. S., Maisuradze M. V. The impact of mining on environmental pollution. *Geology and geophysics of Russian South*. 2014. No. 4-2. pp. 8-13. (In Russ.)

6. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation based on the study of nonlinear properties of soils by artificial sources. Abstract of dissertation for the degree of Doctor of Physics and Mathematics. Moscow. Lomonosov Moscow State University, 1996. 222 p. (In Russ.)

7. Zaalishvili V. B., Gabeeva I. L., Gogmachadze S. A. Seismic hazard assessment of soils during strong earthquakes in rugged terrain in mountainous regions. In: *Systematic studies of the current state and development paths of the South of Russia (nature, society, people)*. Abstracts of reports of an international scientific conference. 2006. pp. 135-136. (In Russ.)

8. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Dzeranov B. V. Features of the dynamic behavior of soils in the territory of the city of Vladikavkaz. *Earthquake engineering. Safety of facilities*. 2008. No. 2. pp. 67-71. (In Russ.)

9. Zaalishvili V. B., Rogozhin E. A. Assessment of the seismic hazard of the territory based on modern methods of detailed seismic zoning and seismic microzoning. In: *Monitoring and forecasting natural disasters. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the RAS*. 2010. pp. 251-262. (In Russ.)

10. Zaalishvili V. B., Beriev O. G., Zaks T. V. Medical-ecological-geophysical monitoring of the urban mountainous territory. In: *Sustainable development of mountain areas in the context of global changes Materials of the VII International Scientific Conference (Electronic resource, CD-ROM – disk)*. Vladikavkaz. 2010. (In Russ.)

11. Zaalishvili V. B., Dzhgamadze A. K., Gogichev R. R. On the creation of maps of engineering and geological zoning of settlements of the Republic of North Ossetia-Alania, as the basis of seismic microzonation. *Geology and geophysics of Russian South*. 2013a. No. 3. pp. 20-28. (In Russ.)

12. Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Burdzieva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Oncological morbidity of the population of Vladikavkaz and its relationship with various factors. *Geology and geophysics of Russian South*. 2013b. No. 3. pp. 29-38. (In Russ.)

13. Zaalishvili V.B. Correlation relationships between linear and nonlinear soil characteristics according to instrumental data. *Geology and geophysics of Russian South*. 2014. No. 4. pp. 45-57. (In Russ.)

14. Zaalishvili V.B., Krantsfeld Ya.L. Geophysical basis of engineering seismic protection of critical construction projects. *Geology and geophysics of Russian South*. 2014. No. 1. pp. 39-50. (In Russ.)

15. Zaalishvili V.B., Dzhgamadze A.K., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F., Gabeeva I.L., Dzeboev B.A., Kanukov A.S., Shepelev V.D. Clarification of the geotechnical conditions of the territory with the help of microseisms (by example, settlements of the Republic of North Ossetia-Alania). *Geology and geophysics of Russian South*. 2015. No. 1. pp. 5-20. (In Russ.)

16. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Kukhmazov S.U. The deep structure of the western part of the Central Caucasus according to geophysical data. *Geotectonics*. 2017. No. 5. pp. 20-29. (In Russ.)

17. Baluch, Mansoor A.; Hashmi, Hashim Nisar Investigating the Impact of Anthropogenic and Natural Sources of Pollution on Quality of Water in Upper Indus Basin (UIB) by Using Multivariate Statistical Analysis. *Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 2. No. 4307251.

18. Burdzieva, O. G., Zaalishvili, V. B., Beriev, O. G., Kanukov, A. S., Maysuradze, M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016. No. 10 (1). pp. 1693-1697.

19. Grigorkina, G. S., Ramonova, A. G., Kibizov, D. D., Kozyrev, E. N., Zaalishvili, V. B., Fukutani, K., Magkoev, T.T. Probing specific oxides as potential supports for metal/oxide model catalysts: MgO (111) polar film. *Solid State Communications*. 2017. Vol. 257. pp. 16-19. DOI: 10.1016/j.ssc.2017.03.014

20. Hou, Wei; Zhai, Liang; Qiao, Qinghua et al. Monitoring the Intensity of Human Impacts on Anthropogenic Landscape: A Mapping Case Study in Beijing, China. *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 102. pp. 382-393.

21. Kozuskanich, John C.; Novakowski, Kent S.; Anderson, Bruce C. et al. Anthropogenic Impacts on a Bedrock Aquifer at the Village Scale. *Groundwater*. 2014. Vol. 52. Issue 3. pp. 474-486

22. Rosca, Oana Mare; Dippong, Thomas; Marian, Monica et al. Impact of anthropogenic activities on water quality parameters of glacial lakes from Rodnei Mountains, Romania. *Environmental Research*. 2020. Vol. 182. No. 109136.

23. Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Kukhmazov S.U. Deep Structure of the Western Part of the Central Caucasus from Geophysical Data. *Geotectonics*. 2017. Vol. 51. No. 5. pp. 479-488.

Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of Microseismic and Computational Techniques in Engineering-Geological Zonation. *International Journal of Geomate*. 2016. T. 10. No. 1. pp. 1670-1674.

26. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Melkov D.A., Makiev V.D., Dzobelova L.V. Development of a Unified Model of Geoinformation System for City Planning and Integration. *International Journal of Geomate*. 2018. T. 15. No. 51. pp. 160-166.

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34+550.341

DOI: [10.46698/VNC.2020.50.57.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.50.57.005)

Оригинальная статья

## Новые строительные нормы: шаг вперед, два шага назад

Ф.Ф. Аптикаев 

ФБГУН Институт физики Земли РАН, Россия, 123242,  
Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: felix@ifz.ru

Статья поступила: 21.04.2020, доработана: 21.05.2020, одобрена в печать: 24.05.2020

**Резюме: Актуальность работы.** На основании эмпирических данных показано, что отечественные строительные нормы и правила существенно занижают уровень расчетных сейсмических воздействий. В этом кроется аномально большое количество жертв и огромный ущерб при землетрясениях в нашей стране по сравнению с США и Японией. При этом в проекте СП 14.13330 2019 года наблюдается новое снижение уровня воздействий. Сравнение нормативных уровней ускорения различных стран показало, что наши расчетные ускорения самые низкие. Например, уровень расчетных ускорений в наших нормах по сравнению с нормами США в три раза ниже. **Цель работы** – показать реальное соотношение сейсмической интенсивности в баллах и ускорения грунта и найти параметры сейсмического движения грунта, наиболее тесно коррелируемые со степенью повреждения зданий и сооружений. **Методы исследования** – статистический анализ записей сильных движений, сравнение методов задания сейсмических воздействий в строительных нормах различных стран. **Результаты работы** – показано, что задание уровня ускорений в отечественных нормах занижено примерно вдвое и не соответствует допустимым уровням превышения воздействий в баллах на картах ОСР. Ускорения не являются достаточной характеристикой сейсмических воздействий. Наилучшими характеристиками сейсмических воздействий являются энергетические. Важным фактором занижения воздействий является использование вместо реальных значений ускорений так называемых «эффективных» ускорений, которые в результате фильтрации ниже реальных примерно в полтора раза. Причем приведенный выше термин не применяется. И многие проектировщики считают, что в нормах приведены реальные пиковые ускорения. В шкале MSK-64, которая до сих пор используется в наших нормах, надежные оценки связи сейсмической интенсивности с ускорениями были получены только для 6 баллов. Для более высоких интенсивностей значения ускорений были получены экстраполяцией при предположении об удвоении амплитуды на балл. В настоящее время обильный эмпирический материал показал несостоятельность этого предположения. Это привело к дополнительному занижению расчетной амплитуды ускорений, особенно для 9 баллов. При применении спектрального метода этот недостаток частично компенсируется другими предположениями. Но для динамического метода расчетов применение эффективных значений приводит к большим ошибкам. Не принимаются во внимание достижения других стран. Например, за рубежом при расчете зданий и сооружений на сейсмостойкость учитывается продолжительность колебаний (модель Ариаса), а в наших нормах этот важный параметр полностью игнорируется, хотя в сейсмической шкале ГОСТ Р ГОСТ Р 57546-2017 оценки, соответствующие модели Ариаса, имеются. Отмечаются разногласия в строительных нормах различных организаций и ведомств нашей страны. В тексте нормативных документов встречаются серьезные противоречия. Например, частотный состав обобщенного спектра задается в одной полосе частот, а уровень спектра – в другой. Карты ОСР предполагают использование ускорений, близких к шкале ГОСТ Р ГОСТ Р 57546-2017, а нормы требуют использование шкалы MSK-64. Шкала MSK-64 уже давно не используется на практике, поскольку в ней нет описания панельных зданий, крупноблочных зданий, зданий с сейсмоусилением и вообще зданий выше 6 этажей. Вместо среднестатистического значения коэффициента динамического усиления используется значение, полученное с нарушением всех правил обработки эмпирического материала. Наконец, карты ОСР строятся для условия превышения воздействий до 1% (карта ОСР-С), а ускорения для этого случая – с вероятностью превышения 99%.

**Ключевые слова:** Строительные нормы, сейсмические воздействия, сейсмическая интенсивность, ускорение, скорость колебаний, мощность колебаний, продолжительность колебаний, коэффициент динамического усиления.

**Для цитирования:** Аптикаев Ф.Ф. Новые строительные нормы: шаг вперед, два шага назад. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10(2): 71-81. DOI: 10.46698/VNC.2020.50.57.005.

---

---

G E O P H Y S I C S

---

---

DOI: [10.46698/VNC.2020.50.57.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.50.57.005)

Original paper

## New Building Codes: one step forward, two steps backward

F.F. Aptikaev 

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

*Received: 21.04.2020, revised: 21.05.2020, accepted: 24.05.2020*

**Abstract: Relevance.** Based on empirical data, it is shown that domestic building codes and rules significantly underestimate the level of design seismic effects. This is the reason for an abnormally large number of victims and huge damage during earthquakes in our country compared to the United States and Japan. At the same time, in the project SP14.13330 2019, a new decrease in the level of seismic effects is observed. A comparison of the normative acceleration levels of different countries showed that our calculated accelerations are the lowest. For example, the level of calculated acceleration in our standards is three times lower than in the United States. **The aim of the work** is to show the real correlation of seismic intensity in points and soil acceleration and find the parameters of seismic ground motion that are most closely correlated with the degree of damage to buildings and structures. **Methods** - statistical analysis of strong motion records, comparison of methods for setting seismic effects in building codes of different countries. **Results.** It is shown that setting the level of acceleration in domestic standards is underestimated by about half and does not correspond to the permissible levels of exceeding the effects in points on the GSZ maps. Acceleration is not a sufficient characteristic of seismic effects. The best characteristic of seismic effects is energy. An important factor in underestimating the effects is the use of so-called "effective" accelerations instead of real values of accelerations, which are about one and a half times lower than real ones as a result of filtering. Moreover, the above term is not applied. And many designers believe that the standards show real peak accelerations. In the MSK-64 scale, which is still used in our standards, reliable estimates for the relationship of seismic intensity with accelerations were obtained only for 6 points. For higher intensities, the acceleration values were obtained by extrapolation under the assumption that the amplitude was doubled per point. At present, abundant empirical material has shown the failure of this assumption. This led to an additional underestimation of the calculated amplitude of accelerations, especially for 9 points. When applying the spectral method, this drawback is partially compensated by other assumptions. But for the dynamic calculation method, the use of effective values leads to large errors. The achievements of other countries are not taken into account. For example, abroad, when calculating buildings and structures for earthquake resistance, the duration of vibrations (Arias model) is taken into account, and in our standards this important parameter is completely ignored, although in the seismic scale GOST R GOST R 57546-2017, estimates corresponding to the Arias model are available. Disagreements are noted in the building codes of various organizations and departments of our country. Serious contradictions occur in the text of regulatory documents. For example, the frequency composition of the generalized spectrum is specified in one frequency band, and the spectrum level in another. GSZ maps require the use of accelerations close to the GOST R GOST R 57546-2017 scale, and norms require the use of the MSK-64 scale. The MSK-64 scale has not been used in practice for a long time, since it does not contain a description of panel buildings, large-block buildings, buildings with seismic retrofitting, and generally buildings above 6 floors. Instead of the average value of the dynamic amplification coefficient, the value

obtained in violation of all the rules for processing empirical material is used. Finally, the GSZ maps are built for the condition that the impacts are exceeded up to 1% (GSZ-S map), and accelerations for this case - with a probability of exceeding 99%.

**Keywords:** Building codes, seismic treatment, seismic intensity, acceleration, vibration velocity, power, duration, coefficient of dynamic amplification.

**For citation:** Aptikaev F.F. New Building Codes: one step forward, two steps backward. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10(2): 71-81. DOI: 10.46698/VNC.2020.50.57.005.

## Введение

С 1981 года ведутся бесплодные попытки улучшить строительные нормы. То что наши нормы не соответствуют реальной сейсмической опасности не вызывает сомнений. В США за последние 100 лет при 21 разрушительном землетрясении погибло в общей сложности 264 человека [Jaiswal et al., 2011]. Например, при землетрясении Империял Вэлли в 1979 году с магнитудой 6,5 жертв не было, при землетрясении Лома Приета в 1989 году с магнитудой 7,1, происшедшем в густонаселенном районе, погибли 62 человека, при землетрясении Нортридж 1994 года с магнитудой 6,7 погибли 57 человек. Аналогичная картина наблюдается в Японии. При землетрясении Тюэцу (Япония) 2004 года с магнитудой 6,7 погибли 40 человек, при землетрясении Фукусима (Япония) 2011 года с магнитудой 6,6 погибли 7 человек. В строительных нормах США сейсмические воздействия задаются на основании представительного количества записей сильных движений. Практически для каждого активного разлома записи сильных движений имеются. Наши нормы не опираются на эмпирический материал и воздействия задаются на ряде допущений и предположений. Нормам 1981 года [СНИП-II-7-81\*, 2013], которые являются основой всех последующих версий, соответствуют следующие эффекты: в Спитаке (Армения) при землетрясении 1988 года с магнитудой 6,8 погибло 25 тысяч человек, при землетрясении в Нефтегорске 1995 года с магнитудой 7,6 погибло 2240 человек – большинство населения маленького городка. В чем причина наших потерь? Напрашивается наиболее вероятная причина – несоответствие принятого в нормах уровня воздействий реальным значениям. Нормы оперируют уровнями ускорений по шкале MSK-64 [Медведев, 1968]. Насколько надежны оценки расчетных ускорений, приведенных в шкале MSK-64? Сами значения, округленные до двух знаков, наводят на предположение о грубости оценок. В таблице 1 приведены количества записей ускорений, использованных при построении шкал MSK-64 и шкалы [ГОСТ Р 57546-2017].

Таблица 1. / Table 1.

**Количество записей сильных движений, которые использованы при составлении инструментальных шкал сейсмической интенсивности. / The number of strong movements records used in compiling instrumental scales of seismic intensity.**

<i>I</i> , баллы / <i>I</i> , points	9	8	7	6
MSK-64, 1964	2	5	13	65
ГОСТ Р 57546-2017 / GOST R 57546-2017	104	172	212	353

## Цель работы

Ясно, что достаточно надежные оценки в 1964 году получены только для интенсивности  $I = 6$ . Для более высоких интенсивностей оценки производились путем экстраполяции при предположении об удвоении амплитуды на балл. Такое предположение было обосновано тем, что реально наблюдавшиеся ускорения в диапазоне  $1-1000 \text{ см/с}^2$  были отнесены к диапазону интенсивностей 2–12 баллов. Однако накопленные эмпирические данные показали, что максимальные ускорения достигаются при 9 баллах и при дальнейшем росте интенсивности уже не изменяются [Campbell, 1981; Bureau, 1981; Hanks, Johnson, 1976; Yamada et al., 1997; Bommer, Martinez-Pereira, 2000]. В работе [Bommer, Martinez-Pereira, 2000] на эмпирическом материале показано, что при 9 и 11 баллах ускорения одинаковы. Не нужно быть большим специалистом в области механики горных пород, чтобы сообразить, что деформация, которую могут выдержать горные породы, должна иметь предел, не зависящий от масштаба явления, т.е. от магнитуды землетрясения. Независимость безразмерных величин от масштаба явления следует из теории размерностей и подобия [Седов, 1987]. Следовательно, интервалу ускорений  $1-1000 \text{ см/с}^2$  соответствует интервал интенсивности 2-9 баллов, т.е. изменению ускорений в 2,5 раза на балл, что подтверждается и прямыми оценками этого соотношения [Аптикаев и др., 2008] (рис. 1). В нормах интенсивностям 7, 8, 9 баллам соответствуют ускорения 100, 200, 400  $\text{см/с}^2$  соответственно. Пользователи воспринимают эти значения, как наиболее вероятные и используют их. Между тем, приведенные значения получены путем фильтрации в полосе 2–5 Гц.

## Методы исследования

В США такие значения называют «эффективными». У нас этим термином не пользуются, что и привело к недоразумениям. По оценке автора шкалы С.В. Медведева фильтрация привела к занижению уровня ускорений примерно в полтора раза [Медведев, 1978]. К такому же выводу пришел редактор карты ОСР-97 В.И. Уломов, оценивший значения уровня ускорений в шкале MSK-64 как значения нижнего уровня диапазона интенсивности [Уломов, 1994]. Занижение уровня колебаний в шкале MSK-64 связано и с другими факторами: например, пересчет смещений в ускорения при предположении о синусоидальной форме колебаний. Метод оценки сейсмической опасности, разработанный для карты ОСР-97, использовался в международном проекте GSHAP при построении карт сейсмической опасности мира, куда входит и карта ОСР-97. Поэтому карта ОСР-97 была построена и в ускорениях [Ulomov et al., 1998].

Использование инструментальной шкалы MSK-64 не позволило стыковать карты в баллах с картами в ускорениях для соседних стран. Поэтому оценки сейсмической интенсивности в баллах пересчитывались в ускорения по данным работы [Аптикаев, Шебалин, 1988], которые вошли и в ныне действующий ГОСТ Р 57546-2017. Чтобы учесть тот факт, что инструментальная шкала MSK-64 относится к нижним границам интенсивностей, в [СП 14.13330.2014] было записано, что значения ускорений для расчетов должны быть «не ниже 100, 200, 400  $\text{см/с}^2$  для интенсивностей 7, 8, 9 баллов соответственно». Но ничего при этом не изменилось. Проектировщики по-прежнему использовали заниженные в полтора раза значения ускорений.

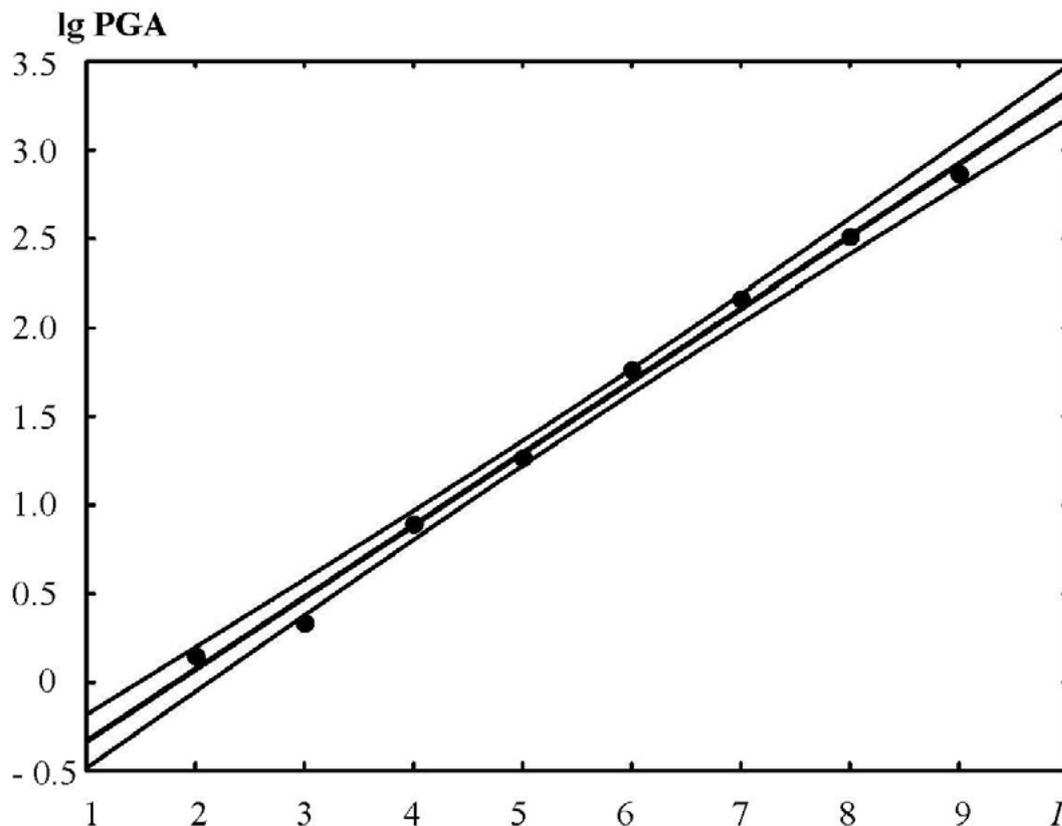


Рис. 1. Соотношение между центрами распределений логарифма пикового ускорения и сейсмической интенсивностью  $I$ . Тонкими линиями показан 95% уровень доверия. По работе [Аптикаев и др., 2008]. Использовано 1554 акселерограммы. /

Fig. 1. Relationship between the centers of distribution of the peak acceleration logarithm and seismic intensity  $I$ . Thin lines show a 95% confidence level. According to [Aptikaev et al., 2008]. Used 1554 accelerograms.

Имелись в версии 2018 года и противоречия. При заниженных уровнях ускорений указывалось, что уровни спектров не должны быть ниже реальных значений. В проекте [СП 14.13330.2019] это противоречие устранено и предлагается пользоваться только заниженными значениями. Ранее для наиболее ответственных объектов коэффициенты ответственности  $k_0$  (которые все равно не достигали правильного уровня), в новых нормах уменьшены в полтора раза.

Но и этого мало. Составители норм не считаются с условиями построения карт ОСР. Например, для карты ОСР-С вероятность превышения уровня воздействия в баллах составляет 1%. Это значит, что, например, для интенсивности 8 баллов значения воздействий выше 8,5 баллов составляют 1%. Этому 1% будут соответствовать воздействия уже в 9 баллов. Проект новых норм требует вести расчеты не на верхнюю границу диапазона ускорения, и даже не на среднее значение, а на нижнюю границу диапазона, то есть для нашего примера, на 7,5 баллов. Итак карты ОСР оперируют превышением расчетной интенсивности для карты С 1%, а нормам соответствует превышение уровня ускорений 99%! Аналогичная ситуация наблюдается и для других интенсивностей и для карт В и А.

Имеются неточности и в оценках уровня превышения сейсмических воздействий в картах ОСР. Составители оперируют П-образной формой распределения

интенсивности. И оценки превышения 10%, 5%, 1% на картах А, В, С соответствуют этой дискретной модели. На самом деле оценки степени повреждений зданий распределены по нормальному закону. Заметим, что и распределение степеней повреждения при конкретном землетрясении также подчиняется нормальному закону [Шебалин, 1969; Кулиев, Шебалин, 1970; Поляков и др., 1982; Ципенюк, 1988; Schenkova, Prochazkova, 1981; Bottari et al., 1986; Velkov, 1989]. А в инженерном диапазоне сейсмическая интенсивность определяется в основном по степени повреждения зданий. Значит, аппроксимация распределения интенсивности П-образным законом также вносит определенную погрешность в оценку вероятности превышения некоторого заданного уровня воздействий. Стандартное отклонение оценки воздействий в баллах при обследовании многих зданий составляет 0,4 балла. Значит, в реальности, например, для карты ОСР-С вероятность превышения уровня воздействий составляет не 1%, а 20%. Более того, в области заданного балла присутствует 29% вероятность более высокой интенсивности.

Составители строительных норм совершенно не интересуются достижениями инженерной сейсмологии, учитываемыми в нормах других стран. Расчетные ускорения по нашим нормам существенно ниже имеющихся в зарубежных документах (таблица 2). В таблице приведены инструментальные оценки ускорений шкалы MSK-64 и шкал семейства Меркалли, созданных после 1964 г. ММ-99 – инструментальная часть шкалы Меркалли, модернизированной в 1993 г. [Wald et al., 1999; Shake..., 2006], шкала MCS, до сих пор используемая в Италии [Faenzan, Michelini, 2010], китайская шкала CSIS-99 [Chen et al., 1999], SHA-97 – инструментальная часть шкалы ОСР-97 [Уломов, 1994]. В шкале Республики Казахстан [Методический..., 2015] в среднем придерживались принятому за рубежом шагу шкалы в 2,15 раза на балл, но допускалось различие в шагах для различных интенсивностей. Отметим, что корреляция ускорений и интенсивности практически во всех странах производится с нарушением правил обработки экспериментальных данных: считается, что ошибкам подвержена только одна из сравниваемых величин. Это приводит к заметному занижению наклона аппроксимирующей прямой. Особенно велики ошибки в инженерной сейсмологии, где разброс данных велик, а используемый диапазон интенсивностей всего три балла [Аптикаев, 1961]. У кого ось абсцисс в ускорениях, у того прирост амплитуды на балл завышен (шкала MCS), у кого – в баллах – занижен (шкала ММ). Большие ошибки связаны с неверным предположением об удвоении амплитуды на балл (шкалы MSK-64 и CSIS-99). В США для расчетов динамическим методом используются медианные значения ускорений по записям сильных движений, умноженные в полтора раза. У нас – противоположная тенденция. В Eurocode 8 спектры задаются два спектра в зависимости от магнитуды, а у нас магнитуда вообще не принимается во внимание. Во многих публикациях отмечается, что при высоких интенсивностях ускорения на рыхлых грунтах даже меньше, чем на грунтах скальных, хотя интенсивность все-таки выше на рыхлых грунтах [Neumann, 1954; Duke et al., 1972; Trifunac, 1976; Chiaruttini et al., 1979; McGuire, Barnhard, 1979; Campbell, 1981; Joyner, Boore, 1981]. По эмпирическим данным рост интенсивности на рыхлых грунтах объясняется резким увеличением продолжительности колебаний [Arias, 1970; Аптикаев, 2012], фактором, у нас не учитываемым. В нормах США, Ирана и других стран значения коэффициента динамического усиления принимаются на основании обработки эмпирических данных, при определенных условиях достигающие значения  $\beta = 4$  [Iranian..., 2005; Yu, Chock, 2010]. Среднее

Таблица 2. / Table 2.

**Ускорения для различных интенсивностей в нормах различных стран. /  
Accelerations for various intensities in the building codes of different countries.**

Шкала / Scale	Интенсивность в баллах / Intensity in points		
	7	8	9
<b>MSK-64</b>	100	200	400
<b>ММ-99</b>	247	470	898
<b>SHA-97</b>	130	280	600
<b>Шкала РК / Scale RK</b>	120	270	600
<b>ГОСТ Р 57546–2017 / GOST R 57546–2017</b>	110	280	700

значение этого коэффициента по результатам обработки тысяч акселерограмм составляет  $\beta = 3,6$  [Mikhailova, Aptikaev, 1996].

Составители новых норм не учитывают и оценок сейсмических воздействий, полученных в других организациях нашей страны. Значение коэффициента динамического усиления  $\beta = 3,2$  получено специалистами в области атомной энергетики [РБ-006-98]. В новых СП по-прежнему используется величина  $\beta = 2,5$ , полученная не путем осреднения реальных значений, а путем осреднения значений на фиксированных частотах. Такой прием противоречит правилам обработки эмпирических данных. В НИУ МГСУ [СТО..., 2015] отмечается зависимость сейсмического воздействия от длительности и указывается, что для заданной интенсивности при малой длительности амплитуда ускорения может быть весьма высокой. Влияние продолжительности колебаний на повреждаемость сооружений учитывается в нормах атомной энергетики [РБ 006-98]. А в строительных нормах длительность колебаний полностью игнорируется и даже записано, что для составления синтетической акселерограммы достаточно знать только спектр.

Наиболее перспективный путь повышения надежности расчетов сейсмостойкости – переход на энергетические характеристики сейсмических воздействий. Об этом говорил еще в 1956 году американский ученый С.W. Housner. Этой проблемой занимались J.A. Blume, N.M. Newmark, V.V. Bertero и многие другие ученые США, Италии, Японии. В нашей стране также энергетические характеристики воздействий развиваются известными учеными Ю.Л. Рутманом, А.А. Петровым, А.М. Уздиным, М.А. Клячко, А.А. Долгой и другими. Согласно ГОСТ Р 57546-2017 переход задания воздействий от ускорений к энергетическим характеристикам снизит стандартное отклонение для корреляции воздействий со степенью повреждений в 2,5 раза.

### Выводы

Оценки уровня сейсмических воздействий в отечественных нормах ниже реальных значений. В проекте последних строительных норм и правил этот уровень оказался еще более заниженным. Проект совершенно не учитывает достижений инженерной сейсмологии за рубежом и в нашей стране. Даже не учитываются нормативные документы других российских организаций и ведомств. Занижение расчетных уровней сейсмических воздействий приводило и будет приводить к неоправданным

жертвам и материальному ущербу при будущих землетрясениях. Необходимо разработать методы расчета сейсмостойкости на основании ожидаемых энергетических характеристик сейсмического движения грунта.

### Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности [Текст]. / Ф. Аптикаев; Российская акад. наук, Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – М.: Наука и образование, 2012. – 175 с.
2. Аптикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта. // Исследования по сейсмической опасности (Вопросы инженерной сейсмологии). – 1988. – Вып. 29. – С. 98–107.
3. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О., Мокрушина Н.Г. Категория сейсмических шкал сейсмостойкости Меркалли. // Вулканология и сейсмология. – 2008. – №3. – С. 74–78.
4. ГОСТ Р 57546-2017. Национальный стандарт Российской Федерации Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 28 с.
5. Кулиев Ф.Т., Шебалин Н.В. О возможности статистической интерпретации балльности. // Сильные землетрясения Средней Азии и Казахстана. – Душанбе: Дониш, 1970. – Вып. 1. – С. 94–118.
6. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. – М.: Наука, 1968. – С. 151 - 162.
7. Медведев С.В. Определение интенсивности колебаний. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1978. – Вып. 19. – С. 108–116.
8. Методический документ архитектуры, градостроительства и строительства. Рекомендации по определению сейсмических нагрузок, соответствующих инженерно-геологическим и сейсмологическим условиям Республики Казахстан. – Астана. – 2015. – 113 с.
9. Поляков С.В., Жаров А.М., Мартемьянов А.И., Ширин В.В. Газлийское землетрясение 1976 года. Инженерный анализ последствий. – 1982. – С. 104–112.
10. РБ-006-98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. – М.: Госатомнадзор России, 2000. – 76 с.
11. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. / 10-е изд., доп. – М.: Наука, 1987. – 430 с.
12. СНИП-II-7-81\*. 2013.
13. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах.
14. СП 14.13330.2019. Строительство в сейсмических районах (проект).
15. СТО НИУ МГСУ 2015. Сейсмостойкость зданий и сооружений. Расчетные положения. – Москва. – 2015. – 20 с.
16. Уломов В.И. Районирование сейсмической опасности на территории России. // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень Министерства Российской Федерации по чрезвычайным ситуациям. – 1994. – Т. 1. №1, январь – март 1994 г. – С. 41–52.
17. Ципенюк И.Ф. Повреждаемость и надежность крупнопанельных зданий при сейсмических воздействиях. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1988. – Вып. 29. – С. 141–153.
18. Шебалин Н.В. Распределение степеней повреждения зданий и использование его для оценки балльности. // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. – 1975. – С. 87–109.
19. Arias A. A Measure of Earthquake Intensity // Seismic Design for Nuclear Power Plants. / R.J. Hansen, ed. – MIT Press, Cambridge, Massachusetts. – 1970. – pp. 438–483.
20. Bommer J.J., Martinez-Pereira A. Strong-motion parameters: definition, usefulness and predictability. // Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – February 4, 2000). – Auckland, New Zealand, 2000. – Paper No. 0206.

21. Bottari A., Corsanego A., Guedice E., Mangeri M. Some problems in the MSK-scale applications: Use of the quantitative definitives in detailed damage assessment. // *Ann. Geophys. Bo.* – 1986. – Vol. 4. No.2. – pp. 191 – 200.
22. Bureau G.J. Near-source peak ground acceleration. // *Earthquake Notes.* – 1981. – Vol. 52. No.1. – p. 81.
23. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 1981. – Vol. 71. No.6. – pp. 2039–2070.
24. Chen D., Shi Z., Xu Z., Gao G., Nian J., Xiao c., Feng Y. China Seismic Intensity Scale. // *General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of R.P.C.* – 1999.
25. Chiaruttini C., Crosila F., Siro L. Some maximized acceleration analysis of the 1976 Friuli earthquakes. // *Boll. Geof. Teor. Appl.* – 1979. – Vol. XXI. – pp. 38–52.
26. Duke C.M. et al. Effects of site classification and distance on instrumental indices in the San Fernando earthquake. Rpt. UCLA-ENG-7247. – Los Angeles. – 1972. – 50 p.
27. Faenzan L., Michelini A. Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap. // *Geophysical Journal International.* – Vol. 180. Issue 3. – 2010. – pp. 1138–1152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04467.x>
28. Hanks T.S., Johnson D.A. Geophysical assessment of peak accelerations. // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 1976. – Vol. 66. No.3. – pp. 959–968.
29. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Standard № 2800. // *Building and Housing Research Center (BHRC).* – 2005.
30. Jaiswal K., Wald D.J., Bausch D., Marano K.D. Earthquake Impact Scale. // *Natural Hazard Review, ASCF,* August 2011.
31. Joyner W.B., Boore D.M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 1981. – Vol. 71. No.6. – pp. 2011–2058.
32. McGuire R.K. and Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking. Preprint. – 1979. – 17 p.
33. Mikhailova N.N., Aptikaev F.F. Some Correlation Relations between Parameters of Seismic Motions. // *Journal of Earthquake Prediction Research.* – Moscow–Beijing. – 1996. – V. 5. No.2. – pp. 257–267.
34. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. – Seattle, Univ. Wash. Press, 1954. – 77 p.
35. Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 1976. – V. 66. No.1. – pp. 189–219.
36. Schenkova Z., Prochazkova D. Determination of representative intensity values of individual localities. // *Gerl. Beitr.Geofys.* – Leipzig. – Vol. 90. – 1981.
37. Shake Map Manual, Version 1.0 6/19/06. // *ADVANCED NATIONAL SEISMIC SYSTEM / David J. Wald, Bruce C. Worden, Vincent Quitoriano, and Kris L. Pankow.* – USGS. – 2006. – 156 p. – <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/>
38. Ulomov V. et al. Working Group of GSHAP, Region 7, 1988, “Seismic Hazard of Northern Eurasia”. – <http://www.seismo2009.ethz.ch/gshap/neurasia/report.html>
39. Velkov M. The Armenia-USSR earthquake December 7, 1988. - *Inst. Earthq. Eng. and Eng. Seism: Skopje.* – 1989. – 70 p.
40. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Modified Mercalli Intensity in California. // *Earthquake Spectra.* – Vol. 15. No. 3. – 1999. – pp. 557–564.
41. Yamada M., Olsen A., Heaton T. Statistical features of short- and long-period near-source ground motion. // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 2009. – V. 99. No.6. – pp. 3264–3274. DOI: 10.1785/0120090067
42. Yu G., Chock G.K. Comparison of the USA, China and Japan Seismic Design Procedures/ China-USA Symposium for the Advancement of Earthquake Sciences and Hazard Mitigation Practices/Beijing, China. – 2010.

## References

1. Aptikaev F.F. Instrumental scale of seismic intensity. Science and education publishing. 2012. 176 p. (In Russ.)
2. Aptikaev F.F., Shebalin N.V. Clarification of the correlation between level of macroseismic effect and dynamic parameters of ground motion. Problems of engineering seismology. 1988. Vol. 29. pp. 98-107. (In Russ.)
3. Aptikaev F.F., Erteleva O.O., Mokrushina N.G. Category seismic scales family of Mercalli. Volcanology and seismology. 2008. No. 3. pp. 74-78. (In Russ.)
4. GOST R 57546-2017. National standard of the Russian Federation of the Earthquake. Scale of seismic intensity. Moscow. Standartinform. 2017. 28 p. (In Russ.)
5. Kuliev, F.T., Shebalin N.V. About the possibility of a statistical interpretation of intensity. Strong earthquake in Central Asia and Kazakhstan. Dushanbe. Donish. 1970. Vol. 1. pp. 94-118. (In Russ.)
6. Medvedev S.V. International scale of seismic intensity. Seismic zoning of the USSR. Moscow. Nauka. 1968. pp. 151-162. (In Russ.)
7. Medvedev S.V. Determination of intensity oscillations. Questions of engineering seismology. 1978. Vol. 19. pp. 108-116. (In Russ.)
8. Methodological document of architecture, urban planning and construction. Recommendations for determining seismic treatment, relevant engineering-geological and seismological conditions of the Republic of Kazakhstan. Astana. 2015. 113 p. (In Russ.)
9. Polyakov S.V., Zharov, A.M., Martem'yanov, A.I., Shirin V.V. Gasli earthquake of 1976. Engineering analysis of the consequences. 1982. pp. 104-112.
10. RB-006-98. Determination of initial seismic vibrations of soil for design of foundations. Moscow. Gosatomnadzor of Russia. 2000. 76 p. (In Russ.)
11. Sedov L.I. Methods of similarity and dimension in mechanics. Moscow. Nauka. 1987. 430 p. (In Russ.)
12. SNIP-II-7-81\*. 2013. (In Russ.)
13. SP 14.13330.2014. Construction in seismic areas. (In Russ.)
14. SP 14.13330.2019. Construction in seismic areas (draft). (In Russ.)
15. STO NIU MGSU 2015. The seismic stability of buildings and structures. The design position. Moscow. 2015. 20 p. (In Russ.)
16. Ulomov V.I. Seismic hazard zoning in Russia/Federal system of seismological observations and earthquake prediction. Information-analytical Bulletin of the Ministry of the Russian Federation for emergency situations. 1994. Vol. 1. No. 1, January–March. 1994. pp. 41-52. (In Russ.)
17. Tsipenyuk I.F. Damageability and reliability of large-panel buildings under seismic forces. Questions of engineering seismology. 1988. Vol. 29. pp. 141-153. (In Russ.)
18. Shebalin N.V. The distribution of the degrees of damage to buildings and use it to evaluate the intensity. Seismic scale and methods of measuring seismic intensity. 1975. pp. 87-109. (In Russ.)
19. Arias A. A Measure of Earthquake Intensity. Seismic Design for Nuclear Power Plants. R.J. Hansen, ed. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 1970. pp. 438–483.
20. Bommer J.J., Martinez-Pereira A. Strong-motion parameters: definition, usefulness and predictability. Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – February 4, 2000). Auckland, New Zealand. 2000. Paper No. 0206.
21. Bottari A., Corsanego A., Guedice E., Mangeri M. Some problems in the MSK-scale applications: Use of the quantitative definitives in detailed damage assessment. Ann. Geophys. Bo. 1986. Vol. 4. No.2. pp. 191–200.
22. Bureau G.J. Near-source peak ground acceleration. Earthquake Notes. 1981. Vol. 52. No.1. 81 p.

23. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1981. Vol. 71. No.6. pp. 2039–2070.
24. Chen D., Shi Z., Xu Z., Gao G., Nian J., Xiao c., Feng Y. China Seismic Intensity Scale. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of R.P.C. 1999.
25. Chiaruttini C., Crosila F., Siro L. Some maximized acceleration analysis of the 1976 Friuli earthquakes. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 1979. Vol. XXI. pp. 38–52.
26. Duke C.M. et al. Effects of site classification and distance on instrumental indices in the San Fernando earthquake. Rpt. UCLA-ENG-7247. Los Angeles. 1972. 50 p.
27. Faenzan L., Michelini A. Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap//*Geophysical Journal International*, Volume 180, Issue 3, March 2010. pp. 1138–1152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04467.x>
28. Hanks T.S., Johnson D.A. Geophysical assessment of peak accelerations. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1976. Vol. 66. No.3. pp. 959–968.
29. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Standard № 2800. Building and Housing Research Center (BHRC). 2005.
30. Jaiswal K., Wald D.J., Bausch D., Marano K.D. Earthquake Impact Scale. *Natural Hazard Review*, ASCF, August. 2011.
31. Joyner W.B., Boore D.M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1981. Vol. 71. No.6. pp. 2011–2058.
32. McGuire R.K. and Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking. Preprint. 1979. 17 p.
33. Mikhailova N.N., Aptikaev F.F. Some Correlation Relations between Parameters of Seismic Motions. *Journal of Earthquake Prediction Research*. Moscow–Beijing. 1996. V. 5. No.2. pp. 257–267.
34. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. Seattle, Univ. Wash. Press. 1954. 77 p.
35. Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1976. V. 66. No.1. pp. 189–219.
36. Schenkova Z., Prochazkova D. Determination of representative intensity values of individual localities. *Gerl. Beitr.Geofys. Leipzig*. Vol. 90. 1981.
37. Shake Map Manual, Version 1.0 6/19/06. ADVANCED NATIONAL SEISMIC SYSTEM. David J. Wald, Bruce C. Worden, Vincent Quitoriano, and Kris L. Pankow. USGS. – 2006. 156 p. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/>
38. Ulomov V. et al. Working Group of GSHAP, Region 7, 1988, “Seismic Hazard of Northern Eurasia”. <http://www.seismo2009.ethz.ch/gshap/neurasia/report.html>
39. Velkov M. The Armenia-USSR earthquake December 7, 1988. *Inst. Earthq. Eng. and Eng. Seism.* Skopje. 1989. 70 p.
40. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Modified Mercalli Intensity in California//*Earthquake Spectra*. 1999. Vol. 15. No. 3. pp. 557-564.
41. Yamada M., Olsen A., Heaton T. Statistical features of short- and long-period near-source ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. V. 99. No.6. pp. 3264–3274. DOI: 10.1785/0120090067
42. Yu G., Chock G.K. Comparison of the USA, China and Japan Seismic Design Procedures/ China-USA Symposium for the Advancement of Earthquake Sciences and Hazard Mitigation Practices. Beijing, China. 2010.

УДК 550.343

DOI: [10.46698/VNC.2020.25.51.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.25.51.006)

Оригинальная статья

## Чрез тернии – к прогнозу землетрясений

А. К. Певнев 

ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995,  
г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: an. pevnev@yandex. ru

Статья поступила: 25.04.2020, доработана: 11.06.2020, одобрена в печать: 13.06.2020

**Резюме: Актуальность работы.** Изучение землетрясений является важнейшей задачей по обеспечению безопасности человеческих жизней в условиях городской территории. Обоснованный прогноз сильных землетрясений представляет большой научный и практический интерес. **Цель работы.** В статье приводятся результаты анализа ситуации, сложившейся в сейсмологии в свете трудов Г. А. Гамбургера, выдающегося российского сейсмолога и геофизика. Начатые им многие весьма перспективные исследования остались незавершенными. Он показал, что очаги происходящих в земной коре землетрясений зарождаются, созревают и разрушаются в зонах тектонических сейсмогенных разломов земной коры и, что эти процессы можно отслеживать непосредственно на земной поверхности, изучая деформации земной коры. К сожалению, развитие сейсмологической науки пошло другим путем. **Методы исследования.** В статье поэтапно рассматривается история развития методологии прогноза землетрясений. **Результаты работы.** Показано, что решение проблемы прогноза методом решения обратных задач или распознаванием образа по набору аномалий в различных геофизических и других полях себя, в целом, не оправдало. Надежных причинно-следственных связей между процессами в очагах землетрясений и аномалиями в различных полях, не обнаружили. Однако сторонники «стратегии аномалий» нашли другое объяснение полученному результату исследований: причинно-следственная связь имеет место, но порождаемые очагом землетрясения аномалии очень малы, и их можно обнаруживать лишь с помощью достаточно густых наблюдательных сетей, способных улавливать эти аномалии. Идея густых сетей была реализована на разломе Сан-Андреас в Калифорнии, но подтверждения она не получила. Решение проблемы прогноза землетрясений возможно только тогда, когда будут начаты исследования, направленные на обнаружение прямых указателей того, что в данном конкретном объеме горных пород идет процесс накопления упругих сейсмогенных деформаций. Начинать прогноз землетрясения необходимо с обнаружения места расположения формирующегося очага. Для прогнозирования места очага землетрясения хватает одного прогнозного профиля. Для прогноза силы землетрясения необходимы несколько профилей. Проблема же прогноза времени землетрясения требует комплексного решения, так как для этого необходимо изучение закономерностей разрушения очагов землетрясений с использованием геодезических, сейсмологических и других методов.

**Ключевые слова:** прогноз, очаг землетрясения, время землетрясения, геодезический мониторинг.

**Для цитирования:** Певнев А. К. Чрез тернии – к прогнозу землетрясений. *Геология и Геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 82-94. DOI: [10.46698/VNC.2020.25.51.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.25.51.006)

## GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2020.25.51.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.25.51.006)

Original paper

## Through difficulties to the earthquake prediction

A. K. Pevnev 

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, 10/1 Bolshaya Gruzinskaya Str.,  
Moscow 123995, Russia, e-mail: an. pevnev@yandex. ru

Received: 25.04.2020, revised: 11.06.2020, accepted: 13.06.2020

**Abstract: Relevance.** The study of earthquakes is the most important task for ensuring the human life safety in urban areas. A reasonable prediction of strong earthquakes is of great scientific and practical interest. **Aim.** The article presents the results of the analysis of the situation in seismology in the light of the works of G. A. Gamburtsev, who was an outstanding Russian seismologist and geophysicist. Many of his very promising studies remained incomplete. He showed that the foci of earthquakes, occurring in the earth's crust, originate, accumulate and collapse in the zones of tectonic seismogenic faults in the earth's crust; he also showed that these processes can be monitored directly on the ground surface, studying the deformations of the earth's crust. Unfortunately, the development of seismological science went in a different way. **Methods.** The article considers the history of the development of earthquake prediction methodology in stages. **Results.** The article shows that the prediction problem solution by solving inverse problems or by recognizing an image, according to the set of anomalies in various geophysical and other fields, did not prove its value in general. Reliable cause-and-effect relationships between processes in the earthquake focus and anomalies in various fields were not found. However, supporters of the "anomaly strategy" found another explanation for the research result: a cause-and-effect relationship takes place, but the anomalies generated by the earthquake source are very weak, and they can only be detected using sufficiently dense observational networks capable of capturing these anomalies. The idea of dense networks was implemented at the San Andreas Fault in California, but it was not confirmed. The solution of the earthquake prediction problem is possible only in case of the start of the research aimed at the detecting direct indications that an accumulation of elastic seismogenic deformations are taking place in this particular rock volume. It is necessary to begin the earthquake prediction by detecting the location of the generating focus. One forecast profile is enough to predict the location of the earthquake source. And for the prediction of an earthquake intensity, several profiles are necessary. The problem of the time of an earthquake forecast requires a comprehensive solution, since it is obligatory to study the laws of seismic source destruction with the help of geodetic, seismological and other methods.

**Keywords:** forecast/prediction, earthquake focus, time of earthquake, geodetic monitoring.

**For citation:** Pevnev A. K. Through difficulties to the earthquake prediction. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (2): 82-94. DOI: 10.46698/VNC.2020.25.51.006.

## Введение

Сильные землетрясения являются одним самых опасных природных событий на Земле. Это, во многом, обусловлено их неожиданностью и опасными вторичными природно-техногенными проявлениями и, наконец, тяжелыми социально-экономическими последствиями. В феврале 1975 г. китайскими учеными по целому ряду признаков – предвестников было успешно предсказано землетрясение в Хайчэне с магнитудой  $M=7,34$  февраля 1975 года в режиме краткосрочного прогноза (за несколько дней) и большое число жизней было спасено. Научное сообщество приняло близко эту, несомненно, выдающуюся победу. К сожалению, там же в Китае неожиданно, в первую очередь, для ученых произошло землетрясение в Тан-

шане 28 июля 1976 года, в результате которого погибли сотни тысяч людей. Это обстоятельство обусловило резкое изменение отношения к возможности прогноза сильных землетрясений вообще. Проблема краткосрочного прогноза была из приоритетных проблем «переведена» во вспомогательные, точнее, не публичные проблемы. Ученые в России и за рубежом большее внимание стали уделять решению более легко достижимых задач, в частности, среднесрочному и долгосрочному прогнозу землетрясений (карты сейсмического районирования). Примеры подобного успешного среднесрочного прогноза сильного Тбилисского землетрясения 25 апреля 2002 г., носящего служебный характер, известны [Гогмачадзе и др., 2007; Заалишвили, 2009]. За прошедшие 15 лет в сейсмологии много нового было получено и выявлено. Научный интерес к проблеме прогноза вновь возвращается. Именно этим обстоятельством объясняется большое внимание к этой проблеме за рубежом [Cattania et al., 2018; Cocco et al., 2010; Field et al., 2014; Helmstetter et al., 2006, 2007; Jordan et al., 2014; Lombardi, 2019; Mancini et al., 2019; Marzocchi et al., 2017; Rhoades et al., 2011; Segou et al., 2013; Tapia-Hernandez et al., 2019; Toda et al., 2005; Zechar et al., 2010; Werner et al., 2011]. Возможность предсказывать землетрясения является древнейшей мечтой Человечества. Но, к сожалению, до недавнего времени даже причины сейсмической активности Земли оставались тайной за семью печатями – не было ясных представлений о том, что порождает эту беду. Только во второй половине 19-го века многими учеными было признано, что наиболее вероятной причиной являются эндогенные тектонические процессы, которые раздробили земную кору на блоки, перемещающиеся относительно друг друга по разделяющим их разломам земной коры. Но для прогноза землетрясений этого было мало: нужно было определить механизмы зарождения, формирования и разрушения очагов землетрясений.

Эта проблема была теоретически решена только в первой половине 20-го столетия. Теоретическое обоснование этих механизмов было предложено бывшим директором Геофизического института АН СССР академиком Г.А. Гамбургцевым, который после катастрофического Ашхабадского землетрясения 1948 г. возглавил исследования по проблеме прогноза землетрясений в СССР, выполнявшиеся по постановлению Правительства.

### Актуальность и цель работы

Григорий Александрович разработал столь научно обоснованную программу исследований по этой проблеме, что она актуальна и по сей день. Он доказал, что очаги происходящих в земной коре землетрясений зарождаются, созревают и разрушаются в зонах тектонических сейсмогенных разломов земной коры и что эти процессы можно отслеживать непосредственно на земной поверхности, изучая деформации земной коры в этих зонах. Он даже успел приступить к практической реализации этих идей на Гармском полигоне, но, к сожалению, Провидение отпустило ему для этого лишь несколько лет – он умер в 1955 году и сразу после этого начатые им многообещающие исследования были прекращены.

Причина прекращения этих исследований легко угадывается из приведенных ниже соображений бывшего директора ИФЗ АН СССР академика М.А. Садовского: «Для меня настоящая сессия в известном смысле юбилейная. 10 лет тому назад мне пришлось добиваться возобновления работ по прогнозу землетрясений и восстановления её в плане научно-исследовательских работ Института физики

Земли АН СССР. Многим из присутствующих, вероятно, неизвестно, что работы по этой проблеме, проводимые акад. Г. А. Гамбурцевым сразу после Ашхабадского землетрясения, в начале шестидесятых годов были прекращены. В одном из выступлений М. В. Келдыша (на тот период Президент АН СССР.) проблема прогноза землетрясений фигурировала как пример необоснованности и фантастичности некоторых тем АН СССР, что отражало мнение отдельных сейсмологов института...» [Садовский, 1976, с. 9].

Может быть эти «некоторые сейсмологи нашего института» понимали, что сейсмологии решение проблемы прогноза землетрясений не под силу, а в другие пути решения этой проблемы не верили?

Да, конечно, через несколько лет в Институте физики Земли АН СССР все же приступили к решению проблемы, но не гамбурцевским, а совершенно иным путем – методом решения обратных задач – распознавание образа по набору аномалий в различных геофизических и других полях, в том числе и фантастических: например, отслеживая поведение, каких то рыбок. Определяющей идеей в этих исследованиях было предположение, что коровая сейсмичность обусловлена региональными полями напряжений. На эти длительные исследования были затрачены значительные интеллектуальные и финансовые ресурсы, но результат оказался плачевным, так как причинно-следственных связей между процессами в очагах землетрясений и аномалиями в различных полях не обнаружили.

Однако сторонники «стратегии аномалий» нашли другое объяснение полученному результату исследований: причинно-следственная связь имеет место, но порождаемые очагом землетрясения аномалии очень малы, и их можно обнаруживать лишь с помощью достаточно густых наблюдательных сетей, способных улавливать эти аномалии.

Идея густых сетей была реализована на разломе Сан-Андреас в Калифорнии, но подтверждения она не получила. Вот как оценил эту идею бывший директор «Института теории прогноза землетрясений АН СССР» академик В. И. Кейлис-Борок: «Долгое время работы по прогнозу землетрясений ориентировались в основном на расширение системы наблюдений. Калифорнийское землетрясение наглядно показало нам, насколько этого недостаточно. Оно произошло в середине самой мощной в мире наблюдательной сети, с тысячами датчиков, телеметрией, полной компьютеризацией» [Кейлис-Борок, 1989].

## Методика

Здесь уместно сослаться на соображения некоторых известных ученых о несостоятельности «гипотезы аномалий». Вот как оценил новую стратегию решения проблемы прогноза землетрясений известный сейсмолог О. Н. Кондратьев: «... начатые работы по прямому изучению разломов земной коры (по терминологии Г. А. Гамбурцева, – сейсмических швов) были свернуты. В 1971 г. в Институте физики Земли утверждается «Программа работ по поискам предвестников землетрясений», и в 1980 г. новая «Научная программа исследований по прогнозу землетрясений». Эти документы на несколько десятилетий утвердили примат поиска разрозненных сопутствующих явлений, более того, в них была заложена мысль, что наиболее быстрый успех может быть получен при изучении именно косвенных факторов...

«Разрушительное Спитакское землетрясение 1988 г. инициировало попытку проанализировать состояние дел с краткосрочным прогнозом и породило определенные сомнения в эффективности ретроспективного анализа разнородных параметров в качестве предвестников землетрясений» [Кондратьев, 1995, с. 23].

А вот соображения коллектива сейсмологов ИФЗ РАН: «Считается, что характеристики среды должны изменяться на различных стадиях «подготовки» сильного землетрясения, что в свою очередь может найти отражение в изменениях наблюдаемых геофизических величин. Попытки отождествления этих вариаций с «аномалиями», предвещающими возникновение сильного землетрясения, и составляют, согласно традиционной методологии, суть поиска предвестников землетрясений. При этом молчаливо предполагается существование детерминированной причинно-следственной связи между указанными явлениями... Необходимость поиска новых подходов продиктована тем кризисом, в котором оказалась современная геофизика на пути решения проблемы прогноза землетрясений» [Кондратьев, 1995, с. 7]. Развернутую оценку существующей методологии прогноза землетрясений дал бывший директор Института физики Земли АН СССР академик В. Н. Страхов: «Попытки решения проблемы путем увеличения числа измеряемых параметров и длительности получаемых временных рядов, составляющих основу материала «обучения», не привели к желаемому результату. Следует признать, что современная экспериментальная геофизика переживает определенный кризис в этой фундаментальной проблеме, суть которого состоит в том, что одно лишь наращивание экспериментальных данных не способствует прогрессу в области прогноза сильных сейсмических событий. Напротив, по мере появления все более протяженных рядов геофизических данных все очевидней становится проблематичность основного положения идеологии прогноза землетрясений – существования детерминированной причинно-следственной связи между экспериментально наблюдаемыми «аномальными» вариациями геофизических полей и возникновением сильных сейсмических событий, что заставляет признать неэффективность существующей методологии прогноза землетрясений» [Кондратьев, 1995, с. 5].

Итак, идея обнаружения очагов землетрясений не оправдала себя: проблема прогноза землетрясений оказалась в тупике. Вполне естественно возникло обоснованное предположение, что выявленное отсутствие причинно-следственных связей свидетельствует о том, что очаги коровых землетрясений создаются не региональными, а локальными полями напряжений и, следовательно, очаговые процессы проявляются только в самом очаге и поэтому их можно обнаружить, занимаясь исследованиями непосредственно в зонах сейсмогенных разломов. А именно это и было предложено Г. А. Гамбурцевым и именно это побудило вернуться к его идеям с привлечением новых данных о закономерностях деформаций земной коры в эпицентральных (очаговых) зонах произошедших сильных землетрясений, определенным методом повторных геодезических измерений (рис. 1).

На рисунке 1 представлены данные повторных триангуляций, выполненных в эпицентральных зонах после случившихся сильных землетрясений. Вертикальные линии – сейсмогенные разломы, по которым произошли горизонтальные подвижки при землетрясениях. Зафиксированные смещения пунктов триангуляции показаны точками; масштаб смещений показан на вертикальной оси, на оси абсцисс отложены расстояния этих пунктов от разлома.

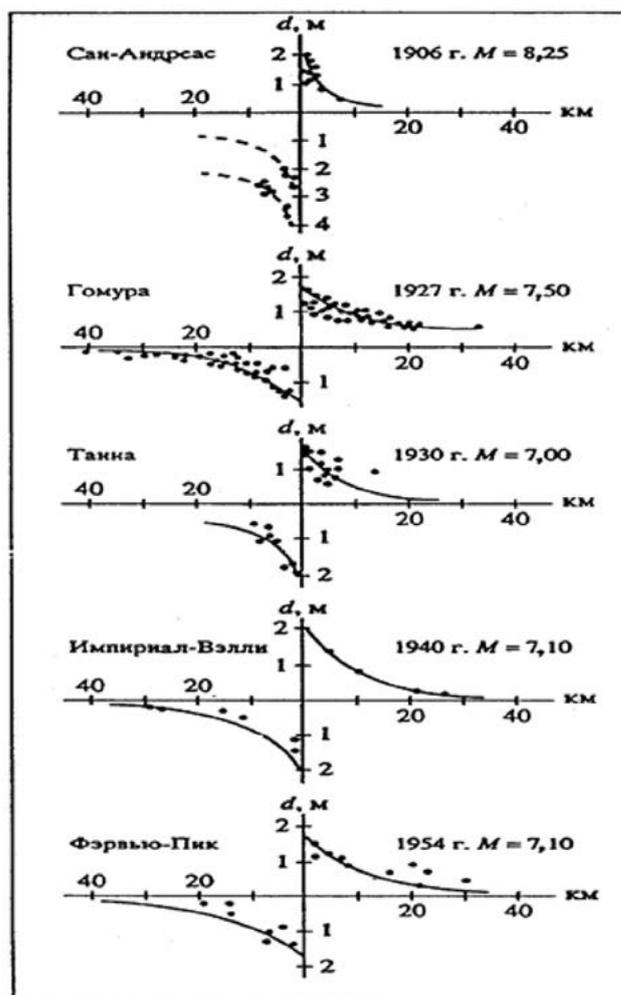


Рис. 1. Реальное распределение смещений пунктов триангуляции ( $d$ ) в зонах сейсмогенных разломов при сильных коровых землетрясениях в зависимости от удаления геодезических пунктов от разломов, по: [Kasahara, 1985]. /

Fig. 1. Actual distribution of displacements of triangulation points ( $d$ ) in zones of seismogenic faults during strong crustal earthquakes depending on the distance of geodetic points from faults, according to: [Kasahara, 1985].

На рисунке 1 обращает на себя внимание в первую очередь то, что для всех пяти приведенных землетрясений прослеживается одна и та же закономерность – смещения максимальны вблизи разлома и очень быстро (экспоненциально) убывают с удалением от него. Для разных землетрясений эти смещения становятся минимальными (нулевыми) на расстояниях от 20 до 40 км от разлома. Это дает основание полагать, что экспоненциальное распределение смещений геодезических пунктов на кривых линиях рисунка 1, а также проявление этих смещений не далее 40 км от разлома отражают действительный вид полей напряжений и их размеры – локальных полей напряжений экспоненциального вида породивших эти землетрясения. Справедливость этого предположения обоснована ниже (рис. 2).

Эти данные так же убедительно говорят о том, что порождаемые при сильных землетрясениях смещения геодезических пунктов несут информацию о едином ме-

ханизме подготовки этих землетрясений. Крайне важно и то, что этот механизм един для разных континентов. Можно полагать, он является универсальным.

Они также подтвердили высказанные ранее теоретические соображения о том, что процессом подготовки корового землетрясения является накопление в его очаге упругих изгибных сейсмогенных деформаций и поэтому деформационным признаком (предвестником) подготовки и созревания очага корового землетрясения является упругий изгиб горных пород в этом очаге. Однако, с точки зрения рассматриваемой нами проблемы, главная ценность этих данных заключается в том, что они открывают путь к реальному прогнозу землетрясений, так как доказывают участие земной поверхности в процессах подготовки очага землетрясения. Локальные поля напряжений, порождающие очаги коровых землетрясений возникают из-за появления в сейсмогенном разломе концентраторов напряжений, представляющих собой участки разлома, в которых по тем или иным причинам прекратились смещения по разлому. Такие концентраторы напряжений Г. А. Гамбургцев очень метко назвал «спайками». Согласно принципу Сен-Венана «спайки» представляют собой дополнительные нагрузки в системе смещающихся блоков земной коры. Именно они и порождают локальные поля упругих напряжений экспоненциального вида, что и подтверждено геодезическими исследованиями.

Итак, на основании анализа геодезических данных рисунка 1 можно сделать следующие выводы:

1. Коровая сейсмичность порождается локальными полями напряжений экспоненциального вида, имеющими размеры от 20 до 40 км.

2. Схожесть выявленных смещений геодезических пунктов для всех пяти землетрясений убедительно говорит о том, что эти данные несут информацию о едином механизме подготовки этих землетрясений.

3. Процессом подготовки корового землетрясения является накопление в его очаге упругих изгибных сейсмогенных деформаций. Деформационным признаком подготовки очага корового землетрясения является упругий изгиб горных пород в этом очаге.

4. Процесс подготовки очага землетрясения захватывает и земную поверхность, являющейся верхней поверхностью готовящегося очага землетрясения и именно это позволяет отслеживать этот процесс непосредственно на этой поверхности.

5. Процесс подготовки очагов землетрясений можно отслеживать лишь геодезическими методами, которые позволяют определять упругие смещения земной поверхности на базах в десятки километров, тем самым определяя действительный вид кривой линии этих смещений.

С целью большей убедительности высказанных соображений рассмотрим причину появления закономерных смещений пунктов триангуляции при землетрясениях (рис. 1), что демонстрируется рисунком 2.

На рисунке 2А показан один и то же участок сейсмогенного разлома (вертикальная линия) в три момента:  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$ , соответствующие различным напряженным состояниям горных пород. Стрелки – направления тектонических смещений на разломе. Момент  $t_0$  – в горных породах отсутствуют сейсмогенные напряжения, что показано прямой **ab**. Момент  $t_1$  – горные породы предельно напряжены локальным полем упругих напряжений экспоненциального вида (упругий изгиб): кривая **ab**. Момент  $t_2$  – положение горных пород после землетрясения, при котором произошли следующие события: магистральный разрыв горных пород в очаге; смещение

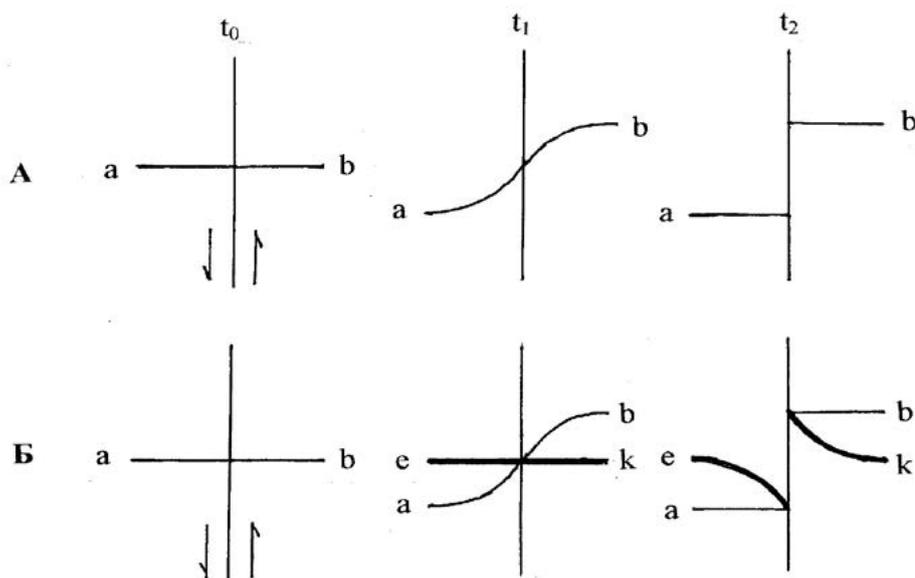


Рис. 2. Объяснение явления экспоненциального распределения смещений геодезических пунктов в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений. /

Fig. 2. An explanation of the phenomenon of the exponential distribution of displacements of geodetic points in the epicentral zones of strong crustal earthquakes.

горных пород по этому разрыву и благодаря этому сброс накопленных в них ранее изгибных сейсмогенных деформаций – прямолинейные отрезки **a** и **b**.

Теперь обратимся к рисунку 2Б, который отличается от рисунка 2А лишь тем, что в нем имеется прямая **ек**, представляющая собой прямолинейное геодезическое построение (геодезический профиль) созданное в момент  $t_1$ , над зреющим очагом землетрясения. После землетрясения вид прямолинейного геодезического профиля претерпел на первый взгляд парадоксальные изменения, превратившись в два искривленных отрезка, смещенных относительно друг друга. Однако в этом нет ничего загадочного – по условиям задачи профиль был создан над уже деформированными упругим изгибом горными породами готовящегося очага землетрясения. И, следовательно, при сбросе упругих напряжений горные породы сместились по разлому и при этом выпрямились, а прямолинейный геодезический профиль над очагом наоборот превратился в два изогнутых отрезка, сохранивших кривизну кривой **ab**.

Эти два изогнутых отрезка **e** и **k** являются зеркальным отображением двух половинок упругой кривой **ab**, так как в результате землетрясения кривая **ab** и прямая **ек** обменялись своими формами и, следовательно, в этих изогнутых отрезках сохранилась информация о величине упругих деформаций, накопленных в очаге к моменту создания этого геодезического профиля.

Согласно этому выводу есть основания считать, что во всех приведенных на рисунке 1 случаях исходные триангуляционные измерения были выполнены над уже готовящимися очагами землетрясений, т.е. в них уже были накоплены, к моменту исходной (выполненной до землетрясения) триангуляции, сейсмогенные напряжения. Если бы это было не так, то первоначально прямолинейный геодезический профиль при землетрясении был бы лишь разорван на линии разлома, но не испытал никаких искривлений, а представлял бы собой два прямолинейных отрезка,

аналогичных поведению горных пород в момент  $t_2$ . Это говорит о том, что сильные землетрясения готовятся долго – многие десятки и более лет. Таким образом, нам удалось расшифровать загадку появления кривых на рисунке 1.

Итак, выполненные исследования подтвердили научную прозорливость Г. А. Гамбурцева в выборе правильного пути решения прогноза землетрясений. На этих основах была разработана деформационная модель механизмов зарождения и подготовки очагов коровых землетрясений, из которой следует, что геодезические измерения деформаций в зонах сейсмогенных разломов позволяют определить точные прогнозы места готовящегося очага землетрясения и его максимально возможную силу, а также открывают пути к прогнозу его времени. Осуществление возможно с помощью специальных геодезических прогнозных систем, основным элементом которых является геодезический прогнозный профиль, представляющий собой прямолинейное геодезическое построение с количеством пунктов, достаточным для уверенного определения вида упругой кривой.

Принципиальная схема геодезической прогнозных системы показана на рисунке 3.

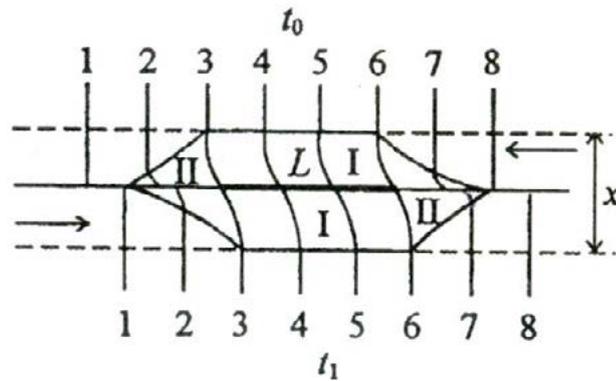


Рис. 3. Модель упругого деформирования земной поверхности над очагом готовящегося землетрясения (в момент  $t_1$ ) и схема реализации прогноза силы готовящегося землетрясения. / Fig. 3. The model of elastic deformation of the earth's surface above the source of the impending earthquake (at time  $t_1$ ) and the forecast implementation scheme for the strength of the impending earthquake.

Линии (1–1,...8–8) – геодезические прогнозных профили, которые в момент зарождения очага ( $t_0$ ) представляли собой сплошные прямые линии, в процессе подготовки очага были либо разорваны и смещены по разлому (1–1 и 8–8), либо и деформированы и смещены (2–2 и 7–7), либо упруго деформированы над очагом (3–3,...6–6); I – зона сжатия; II – зона растяжения; L – линия прекращения смещений по разлому (длина «спайки»); x – ширина очага землетрясения; стрелки – направления сжимающих полей локальных напряжений порождаемых спайкой.

Что касается прогноза места очага землетрясения то согласно рисунку 1 для этого достаточно и одного прогнозных профиля, расположенного над готовящимся очагом землетрясения (профили 3–6). Что же касается прогноза силы землетрясения, то, так как она определяется размерами очага (его длины) и поэтому для этого прогноза необходима система профилей, позволяющая определить эту величину (L на рис. 3).

С прогнозом времени землетрясения все гораздо сложнее, так как для этого нужно иметь представление о закономерностях разрушения очагов землетрясений

в природных условиях. Приступить к таким исследованиям можно и нужно после осуществления прогнозов места и силы землетрясения. Совершенно очевидно, что это должны быть комплексные исследования, в которых приоритетными следует считать изучение деформационных процессов в непрерывном режиме геодезическими, деформометрическими, наклономерными и сейсмологическими методами.

### Выводы

Таким образом, есть все основания считать, что точные прогнозы места и максимально возможной силы готовящегося корового землетрясения являются прерогативой геодезического метода, а для прогноза времени землетрясения следует использовать комплексные исследования, осуществляемые в непрерывном режиме.

Первая геодезическая прогнозная система была создана в Мексике на разломе Империял (южное окончание разлома Сан-Андреас) вблизи города Мехикали – столицы Штата Нижняя Калифорния; вторая система создана в Республике Северная Осетия-Алания на Владикавказском прогностическом полигоне [Певнев, Заалишвили, 2014; Певнев и др., 2014, 2018]. В настоящее время такая система создается в Колумбии. Отказ от научно обоснованной концепции прогноза коровых землетрясений Г. А. Гамбурцева обернулся существенной потерей времени, интеллектуальных и финансовых вложений, а может быть и бедствиями из-за не предсказанных землетрясений. Прогнозистам, исповедовавшим, и может быть еще исповедующих гипотезу региональных полей напряжений в решении рассматриваемой проблемы пора сбросить шоры с глаз и отказаться от своих амбиций – ведь речь идет о возможности избавления жителей сейсмоопасных районов от ужаса непредсказанных сейсмических катастроф. По нашему убеждению настала насущная необходимость безотлагательно вернуться к прерванным ранее исследованиям Г. А. Гамбурцева.

### Литература

1. Гогмачадзе С. А., Заалишвили В. Б., Одишария А. В., Кипиани Д. Г. Апрельские землетрясения 2002 г. в Тбилиси. // Труды II Кавказской международной школы семинара молодых ученых «Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе», Владикавказ, 20-22 сентября, 2007. – Владикавказ. – 2007. – С. 55-88.
2. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
3. Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
4. Кейлис-Борок В. И. До аплодисментов еще далеко. Газета «Известия». 2.11.1989. – № 307.
5. Кондратьев О. К. Разведочная геофизика с целью прогноза землетрясений // Геофизика. – 1995. – № 3. – С. 19-25.
6. Лукк А. А., Дещеревский Ф. В., Сидорин А. Я., Сидорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. – М.: ОИФЗ РАН, 1996. – 210 с.
7. Певнев А. К., Заалишвили В. Б. О причинах коровой сейсмичности и возможности прогноза землетрясений методами решения прямых задач. // Геология и геофизика Юга России, Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А. – 2014. – № 4. Т. 2. – С. 91-99.
8. Певнев А. К., Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. О модернизации геодезических исследований на Владикавказском геодинамическом прогнозном полигоне. // Геология и геофизика Юга России, Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А. – 2014. – № 4. Т. 2. – С. 84-90.
9. Певнев А. К., Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. Геодезический прогнозный мониторинг на территории Республики Северная Осетия-Алания. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2018. – № 4 (75). – С. 7-11.

10. Садовский М. А. О программе совместных Советско-Американских работ по поискам предвестников землетрясений. // Поиски предвестников землетрясений. (Международный симпозиум. 27 мая- 3 июня 1974 г.). – Ташкент: Изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1976. – С. 9-15.
11. Cattania C., Werner M. J., Marzocchi W., Hainzl S., Rhoades D., Gerstenberger M., et al. The forecasting skill of physics-based seismicity models during the 2010-2012 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence. // *Seismological Research Letters*. – 2018. – Vol. 89 (4). – pp. 1238-1250. <https://doi.org/10.1785/0220180033>
12. Cocco M., Hainzl S., Catalli F., Enescu B., Lombardi A. M., Woessner J. Sensitivity study of forecasted aftershock seismicity based on Coulomb stress calculation and rate- and state-dependent frictional response. // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – Vol. 115 (B5). B05307. <https://doi.org/10.1029/2009JB006838>
13. Field E. H., Arrowsmith R. J., Biasi G. P., Bird P., Dawson T. E., Felzer K. R., et al. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 3 (UCERF3). The time-independent model. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2014. – Vol. 104 (3). – pp. 1122-1180. <https://doi.org/10.1785/0120130164>
14. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. Comparison of short-term and time-independent earthquake forecast models for Southern California. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2006. – Vol. 96 (1). – pp. 90-106. <https://doi.org/10.1785/0120050067>
15. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. High-resolution time-independent grid-based forecast for  $M > 5$  earthquakes in California. // *Seismological Research Letters*. – 2007. – Vol. 78 (1). – pp. 78-86. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.1.78>
16. Jordan T. H., Marzocchi W., Michael A. J., Gerstenberger M. C. Operational earthquake forecasting can enhance earthquake preparedness. // *Seismological Research Letters*. – 2014. – Vol. 85 (5). – pp. 955-959. <https://doi.org/10.1785/0220140143>
17. Lombardi A. M. Integration of geological and seismological data in earthquakes occurrence models for Italy: towards a unified model for different forecast perspectives. // *Geophysical Journal International*. – 2019. – Vol. 219. Issue 3. – pp. 2148-2164, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz419>
18. Mancini S., Segou M., Werner M. J., Cattania C. Improving physics-based aftershock forecasts during the 2016-2017 Central Italy Earthquake Cascade. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124. – pp. 8626-8643. <https://doi.org/10.1029/2019JB017874>
19. Marzocchi W., Taroni M., Falcone G. Earthquake forecasting during the complex Amatrice-Norcia seismic sequence. // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3 (9). e1701239. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701239>
20. Rhoades D. A., Schorlemmer D., Gerstenberger M. C., Christophersen A., Zechar J. D., Imoto M. Efficient testing of earthquake forecasting models. // *Acta Geophysica*. – 2011. – Vol. 59 (4). – pp. 728-747. <https://doi.org/10.2478/s11600-011-0013-5>
21. Segou M., Parsons T., Ellsworth W. Comparative evaluation of physics-based and statistical forecasts in Northern California. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118. – pp. 6219-6240. <https://doi.org/10.1002/2013JB010313>
22. Tapia-Hernandez E., Reddy E. A., OrosAvilés L. J. Earthquake predictions and scientific forecast: dangers and opportunities for a technical and anthropological perspective. // *Earth Sciences Research Journal*. – 2019. – Vol. 23 (4). – pp. 309-315. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.77206>
23. Toda S., Stein R. S., Richards-Dinger K., Bozkurt B. S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110 (B5). B05S16. <https://doi.org/10.1029/2004JB003415>
24. Werner M. J., Helmstetter A., Jackson D. D., Kagan Y. Y. High-resolution long-term and short-term earthquake forecasts for California. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2011. – Vol. 101 (4). – pp. 1630-1648. <https://doi.org/10.1785/0120090340>

25. Zechar J.D., Gerstenberger M. C., Rhoades D.A. Likelihood based tests for evaluating space-rate-magnitude earthquake forecasts. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2010. – Vol. 100 (3). – pp. 1184-1195. <https://doi.org/10.1785/0120090192>

## References

1. Gogmachadze S. A., Zaalishvili V. B., Odisharia A. V., Kipiani D. G. April 2002 earthquakes in Tbilisi. In: *Proceedings of the II Caucasus International School seminar for young scientists "Seismic hazard and seismic risk management in the Caucasus"*, Vladikavkaz, September 20-22, 2007. Vladikavkaz. 2007. pp. 55-88. (In Russ.)
2. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of territories of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka, 2009. 350 p. (In Russ.)
3. Kasakhara K. *Mechanics of earthquakes*. Moscow. Mir, 1985. 264 p. (In Russ.)
4. Keilis-Borok V. I. The applause is still a long way off. *Newspaper Izvestia*. 2.11.1989. No. 307. (In Russ.)
5. Kondrat'ev O. K. Exploration geophysics aimed to forecast earthquakes. *Geophysics*. 1995. No. 3. pp. 19-25. (In Russ.)
6. Lukk A. A., Deshcherevskii F. V., Sidorin A. Ya., Sidorin I. A. Variations of geophysical fields as a manifestation of deterministic chaos in a fractal medium. Moscow. IPE RAS, 1996. 210 p. (In Russ.)
7. Pevnev A. K., Zaalishvili V. B. The causes of crustal seismicity and the possibility of predicting earthquakes by methods of solving direct problems. *Geology and geophysics of Russian South*, 2014. No. 4. Vol. 2. pp. 91-99. (In Russ.)
8. Pevnev A. K., Zaalishvili V. B., Melkov D. A. On the modernization of geodetic surveys at the Vladikavkaz geodynamic forecasting range. *Geology and geophysics of Russian South*, 2014. – No. 4. Vol. 2. pp. 84-90. (In Russ.)
9. Pevnev A. K., Zaalishvili V. B., Melkov D. A. Geodetic forecast monitoring in the Republic of North Ossetia-Alania. In: *Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS*. 2018. No. 4 (75). pp. 7-11. (In Russ.)
10. Sadvskii M. A. About the program of joint Soviet-American work on the search for earthquake precursors. *Search for earthquake precursors*. (International Symposium. May 27 – June 3, 1974). Tashkent. Publishing House "FAN" of the Uzbek SSR, 1976. pp. 9-15. (In Russ.)
11. Cattania C., Werner M. J., Marzocchi W., Hainzl S., Rhoades D., Gerstenberger M., et al. The forecasting skill of physics-based seismicity models during the 2010-2012 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence. *Seismological Research Letters*. 2018. Vol. 89 (4). pp. 1238-1250. <https://doi.org/10.1785/0220180033>
12. Cocco M., Hainzl S., Catalli F., Enescu B., Lombardi A. M., Woessner J. Sensitivity study of forecasted aftershock seismicity based on Coulomb stress calculation and rate- and state-dependent frictional response. *Journal of Geophysical Research*. 2010. Vol. 115 (B5). B05307. <https://doi.org/10.1029/2009JB006838>
13. Field E. H., Arrowsmith R. J., Biasi G. P., Bird P., Dawson T. E., Felzer K. R., et al. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 3 (UCERF3). The time-independent model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2014. Vol. 104 (3). pp. 1122-1180. <https://doi.org/10.1785/0120130164>
14. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. Comparison of short-term and time-independent earthquake forecast models for Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. Vol. 96 (1). pp. 90-106. <https://doi.org/10.1785/0120050067>
15. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. High-resolution time-independent grid-based forecast for  $M \geq 5$  earthquakes in California. *Seismological Research Letters*. 2007. Vol. 78 (1). – pp. 78-86. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.1.78>

16. Jordan T.H., Marzocchi W., Michael A.J., Gerstenberger M.C. Operational earthquake forecasting can enhance earthquake preparedness. *Seismological Research Letters*. 2014. Vol. 85 (5). – pp. 955-959. <https://doi.org/10.1785/0220140143>
17. Lombardi A.M. Integration of geological and seismological data in earthquakes occurrence models for Italy: towards a unified model for different forecast perspectives, *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 219. Issue 3. pp. 2148-2164, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz419>
18. Mancini S., Segou M., Werner M.J., Cattania C. Improving physics-based aftershock forecasts during the 2016-2017 Central Italy Earthquake Cascade. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. Vol. 124. pp. 8626-8643. <https://doi.org/10.1029/2019JB017874>
19. Marzocchi W., Taroni M., Falcone G. Earthquake forecasting during the complex Amatrice-Norcia seismic sequence. *Science Advances*. 2017. Vol. 3 (9). e1701239. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701239>
20. Rhoades D.A., Schorlemmer D., Gerstenberger M.C., Christophersen A., Zechar J.D., Imoto M. Efficient testing of earthquake forecasting models. *Acta Geophysica*. 2011. Vol. 59 (4). pp. 728-747. <https://doi.org/10.2478/s11600-011-0013-5>
21. Segou M., Parsons T., Ellsworth W. Comparative evaluation of physics-based and statistical forecasts in Northern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Vol. 118. pp. 6219-6240. <https://doi.org/10.1002/2013JB010313>
22. Tapia-Hernandez E., Reddy E.A., OrosAvilés, L.J. Earthquake predictions and scientific forecast: dangers and opportunities for a technical and anthropological perspective. *Earth Sciences Research Journal*. 2019. Vol. 23 (4). pp. 309-315. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.77206>
23. Toda S., Stein R.S., Richards-Dinger K., Bozkurt B.S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110 (B5). B05S16. <https://doi.org/10.1029/2004JB003415>
24. Werner M.J., Helmstetter A., Jackson D.D., Kagan Y.Y. High-resolution long-term and short-term earthquake forecasts for California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2011. Vol. 101 (4). pp. 1630-1648. <https://doi.org/10.1785/0120090340>
25. Zechar J.D., Gerstenberger M.C., Rhoades, D.A. Likelihood based tests for evaluating space-rate-magnitude earthquake forecasts. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. Vol. 100 (3). pp. 1184-1195. <https://doi.org/10.1785/0120090192>

## GEOPHYSICS

УДК 550.347.097

DOI: [10.46698/VNC.2020.28.93.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.28.93.007)

Original paper

## Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan

Jyun-Yan Huang<sup>1</sup>, V. B. Zaalishvili<sup>2</sup>, D. A. Melkov<sup>2</sup>, Chun-Hsiang Kuo<sup>1</sup>,  
Kuo-Liang Wen<sup>3</sup>, Chun-Te Chen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Center for Research on Earthquake Engineering, National Applied Research Laboratories, No. 200, Sec. 3, Xinhai Rd., Da'an Dist., Taipei City 106219, Taiwan (R. O. C.), e-mail: jyhuang@narlabs.org.tw; chkuo@ncree.narl.org.tw;

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

<sup>3</sup>Department of Earth Sciences, National Central University, No. 300, Zhongda Rd., Zhongli District, Taoyuan City 32001, Taiwan (R. O. C.), e-mail: wenkl@cc.ncu.edu.tw;

<sup>4</sup>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 128, Sec. 2, Academia Road, Nangang, Taipei 11529, Taiwan (R. O. C.), e-mail: pokayoke69@gmail.com

Received: 21.04.2020, revised: 09.06.2020, accepted: 11.06.2020

**Abstract: Relevance.** Soil nonlinearity has a significant influence on result seismic effect at strong motions which differ from weak and moderate ones. Practice of construction faced with adequate account of nonlinear effect in weak soils and demand techniques for design parameters assessment. Researches of recent years in the field of soil nonlinearity may enrich each other and find the main way for effective practices and building codes regularization. **The aim of this work** is allocation of parameters for nonlinearity description and corresponding techniques development. **Methods.** Field soil response analysis with sources of different power in conjunction with strong motion records were analyzed by means of regression analysis and other machine learning techniques. Mathematical modeling includes multiple reflected waves analysis technique and finite elements modeling. **Results.** The parameters that are closely related to the absorption and soil nonlinearity were identified. The empirical formulas connecting the areas of normalized and real spectra with the parameters of seismic loadings were obtained using regression analysis. The differences of absorption mechanism in dispersed (soft) and rocky soils were defined. **Conclusion.** The models of ground strata behavior in the case of variable intensity of dynamic action on the basis of consideration of the real area of the spectrum and the average value of the frequency, characterized by a linear and nonlinear elastic-inelastic deformation of the soils are offered. Degree of nonlinearity (DNL) metric may be efficiently used for stress-strain curve assessment, and in the absence of strong earthquakes records it can be applied for powerful seismic sources records analysis what determines the direction of future research.

**Keywords:** earthquake, intensity, nonlinear, site effect, strong motion databases.

**For citation:** Jyun-Yan Huang, Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. 10 (2): 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.

DOI: [10.46698/VNC.2020.28.93.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.28.93.007)

Оригинальная статья

## Прогресс исследований за последние годы нелинейных свойств грунтов в России и на Тайване

Цзюнь-Ян Хуан<sup>1</sup>, В. Б. Заалишвили<sup>2</sup>, Д. А. Мельков<sup>2</sup>, Чунь-Сян Куо<sup>1</sup>,  
Куо-Лян Вэнь<sup>3</sup>, Чунь-Те Чэнь<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр в области сейсмостойкого строительства, Национальные лаборатории прикладных исследований, №200, с. 3, ул. Ксинхай, округ Даан, г. Тайбэй 106219, Тайвань (R. O. C.), e-mail: jyhuang@narlabs.org.tw; chkuo@ncree.narl.org.tw;

<sup>2</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, ул. Маркова, 93а, г. Владикавказ 362002, Российская Федерация, e-mail: vzaal@mail.ru;

<sup>3</sup>Отделение наук о Земле, Центральный национальный университет, №300, ул. Чжунда, округ Чжунли, Таоюань, 32001, Тайвань (R. O. C.), e-mail: wenkl@cc.ncu.edu.tw;

<sup>4</sup>Институт наук о Земле, Академия Синица, 128, с. 2, ул. Академия, Нанганг, Тайбэй 11529, Тайвань (R. O. C.), e-mail: pokayoke69@gmail.com

Статья поступила: 21.04.2020, доработана: 09.06.2020, одобрена в печать: 11.06.2020

**Резюме: Актуальность работы.** Нелинейные свойства грунтов оказывают существенное влияние на результат сейсмического воздействия при сильных движениях, которые отличаются от слабых и умеренных. Практика строительства столкнулась с необходимостью адекватного учета эффекта нелинейности в слабых грунтах и методики оценки проектных параметров. Исследования нелинейных свойств грунтов проведенные за последние годы могут обогатить друг друга и найти основной путь для эффективной практики и регуляризации строительных норм. **Целью работы** является выделение параметров для описания нелинейности и разработки соответствующих методик. **Методы исследования.** Был проанализирован отклик грунта в полевых условиях с источниками различной мощности в сочетании с записями сильных движений с помощью регрессионного анализа и других методов машинного обучения. Математическое моделирование включает в себя метод анализа многократно отраженных волн и моделирование методом конечных элементов. **Результаты.** Были определены параметры, тесно связанные с поглощением и нелинейностью грунтов. С помощью регрессионного анализа были получены эмпирические формулы, связывающие области нормированного и реального спектров с параметрами сейсмических нагрузок. Выявлены различия механизма поглощения в дисперсных (рыхлых) и каменистых грунтах. **Выводы.** Предложены модели поведения наземных пластов при переменной интенсивности динамического воздействия на основе учета реальной площади спектра и среднего значения частоты, характеризующейся линейной и нелинейной упруго-неупругой деформацией грунтов. Критерий степени нелинейности (DNL) может быть эффективно использован для оценки кривой напряжения-деформации, а в отсутствие записей сильных землетрясений он может применяться для анализа записей мощных сейсмических источников, определяющих направление будущих исследований.

**Ключевые слова:** землетрясение, интенсивность, нелинейность, условия площадки, базы данных сильных движений.

**Для цитирования:** Цзюнь-Ян Хуан, Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Чунь-Сян Куо, Куо-Лян Вэнь, Чунь-Те Чэнь. Прогресс исследований за последние годы нелинейных свойств грунтов в России и на Тайване. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.

## 1 Introduction

Implementation of the existing approaches in seismic hazard assessment is associated with appreciable errors due to the complex effects observed during strong earthquakes related to the heterogeneity of the medium seismic properties, complex topography of the daylight and underground surfaces and nonlinearity of soils. The aim of this work is to analyze the modern concepts of taking into account nonlinearity of soils in seismic microzonation in Russia and strong ground motion researches in Taiwan.

Soil nonlinearity effects are one of the important influences on earthquake strong ground motion, are commonly recognized in the dynamic loading of soils from geotechnical models. It is mainly caused by interaction of seismic waves with shallow softer material, and accomplished as a drop in shear-wave velocity [Aguirre, Irikura, 1997; Nikolaev, 1967] and increasing damping ratio of the shallow soil layers. The significant features of soil nonlinearity include de-amplification of the soil amplification factor [Boore et al., 1989; Darragh, Shakal, 1991a; 1991b], a drop in dominant frequency [Wen et al., 1994; 1995; Beresnev et al., 1995a; 1995b; Zaalishvili, 1996] and de-amplification of the high frequency spectrum [Wen et al., 2006; Zaalihvili, 2009], or even liquefaction of the shallow soil layers. Seismic response could be overestimated during strong motions when only linear behavior is considered for strong motion simulation or strong motion prediction techniques.

## 2 Construction of seismic microzonation for Russia

In Russian school of engineering seismology instrumental method is traditionally considered as the main method of seismic microzonation. This method urges to solve a forecast problem of forming earthquake intensity. However the calculational method allows modeling any definite conditions of area and impact features and is often characterized as more reliable. Usage of both methods together significantly increases the results validity.

Explosive effects of high power allows to study the behavior of real media in conditions most similar to earthquakes. The intensity increment  $\Delta I$  of the soils of the zoned territory is calculated by the formula at usage of weaker explosions [Zaalishvili, 2009]:

$$\Delta I = 3.3 \lg A_1 / A_0, \quad (1)$$

where:  $A_1$ ,  $A_0$  are vibrational amplitudes of the investigated and reference soils, respectively.

Despite the prevalence of explosive sources in scientific and applied research, we note that the energy spent on the formation of elastic seismic waves makes up only 3-5% of the total explosion energy. Execution of powerful explosions on the territory of cities, settlements or near the responsible buildings is connected with large and often insurmountable obstacles (technical and ecological problems, safety problems, labouriousness and economical expediency) and practically isn't used nowadays. This leads to the wide spreading of nonexplosive vibration sources [Zaalishvili, 2012].

The features of seismic microzonation methods development led to the situation when the tool of elastic wave excitation with the help of low-powered sources (for example, hammer impact with  $m = 8-10$  kilograms) has become the most wide spread in order to determine S- and P-wave propagation velocities in typical types of soils of territory. Velocity values are used in order to calculate the intensity increment using the tool of seismic rigidities by S. V. Medvedev [Zaalishvili, 2009]:

$$\Delta I = 1.67 \lg \rho_i V_i / \rho_0 V_0 \quad (2)$$

where:  $\rho_0 V_0$  and  $\rho_i V_i$  is the product of the soil consistency and S-wave velocity – seismic rigidities of the reference and the investigated soil, respectively.

The given approach of S. V. Medvedev gained unexpectedly wide extension in 70-es of the 20 century due to its simplicity and efficiency (former USSR countries and countries of Eastern Europe, USA, Chile, Italy, India).

### 2.1 Seismic microzonation based on accounting of soil nonlinear properties

It was found that reliability of the method considerably increases at usage of modern powerful impulsive energy sources (Fig. 1).

The lowering of final results quality is to a certain extent caused by the fact that in the tool of “intensities” the seismic effect dependence in soils on frequency or “frequency discrimination” of soils [Zaalishvili, 2000] and also the origin of typical “nonlinear effects” at strong movements isn’t taken into account. A. B. Maksimov tried to remedy this deficiency by developing the tool, where frequency peculiarities of soils were taken into account [Zaalishvili, 2009]:

$$\Delta I = 0.8 \lg \rho_0 V_0 f_0^2 / \rho_i V_i f_i^2 \quad (3)$$

where:  $f_0$ ,  $f_i$  are predominant frequencies of reference and investigated soils, respectively.

A. B. Maksimovs’ tool didn’t find wide distribution, as frequency differences of soil vibrations with sharply different strength properties (at usage of traditional for the seismic exploration of small depths low-powered sources) were insignificant and the calculation results on the formulas (2) and (3) were practically similar [Zaalishvili, 2000].

Intensity increment was determined by the following formula [Zaalishvili, 2000]:

$$\Delta I = 0.8 \lg \rho_0 V_0 f_{wa0}^2 / \rho_i V_i f_{wai}^2 \quad (4)$$

where:  $f_{wa0}$ ,  $f_{wai}$  are weighted-average vibration frequencies of reference and investigated soils, respectively.

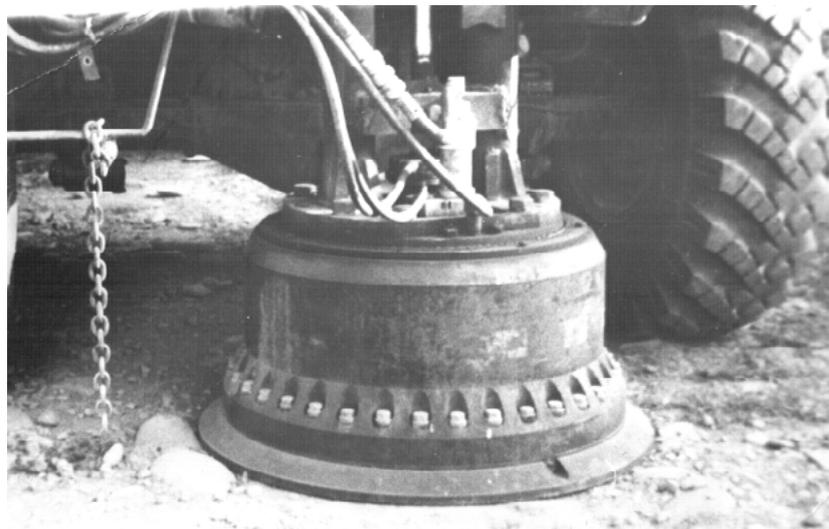


Fig. 1. Surficial gas-dynamical pulse source (SI-32). /

Рис. 1. Поверхностный газодинамический импульсный источник (СИ-32)

Weighted-average vibration frequency of soils was calculated at that on the formula [Zaalishvili, 1987; 2012]:

$$f_{wa} = \sum A_i f_i / \sum A_i \quad (5)$$

where:  $A_i$  and  $f_i$  are the amplitude and the corresponding frequency of vibration spectrum, respectively.

The comparison of the absorption and nonlinearity indices with the corresponding spectra of soil vibrations shows that at higher absorption the spectrum square prevails in low frequency (LF) field and at high nonlinearity it prevails in high frequency (HF) field of the spectrum. In other words, the presence of absorption is displayed in additional spreading of LF spectrum region, and the presence of nonlinearity – in spreading of HF range.

All the mentioned allowed to obtain the formula for calculation of intensity increment on the basis of taking into account nonlinear – elastic soil behavior or elastic nonlinearity (at usage of vibration source) [Zaalishvili, 2012]:

$$\Delta I = 3 \lg A_i f_{wai} / A_0 f_{wa0} \quad (6)$$

where:  $A_i f_{wai}$ ,  $A_0 f_{wa0}$  are the products of spectrum amplitude on weighted-average vibration frequency of investigated and reference soils, respectively.

The formula (5) characterizes soil nonlinear – elastic behavior at the absence of absorption.

If the impulsive source is used at seismic micro-zonation method (SMZ) then the formula will have the form [Zaalishvili, 2009]:

$$\Delta I = 2 \lg A_i f_{wai} / A_0 f_{wa0} \quad (7)$$

## 2.2 Seismic microzonation based on accounting of soil inelastic properties

The estimation of potential soil nonelasticity adequately and physically proved at intensive seismic loadings is the most important problem of seismic microzonation as soil liquefaction and differential settlement of the constructions are observed at strong earthquakes (Niigata, 1966; Kobe, 1995).

For direct assessment of soil nonelasticity the specific scheme of the realization of experimental investigations (fig. 2a) with gas-dynamic impulsive source GSK-6M (with two radiators) was used. Chosen longitudinal profile location allowed making impact sequentially by two emitters from near and somewhat far radiation zones. The HF component that quickly attenuates with distance (fig. 2 b) prevails in the spectrum of soil vibrations, caused by near emitter. In a case of distant emitter impact the LF component predominates in the spectrum of vibrations (fig. 2 c). In other words, at nonlinear-elastic deformations the main energy is concentrated in the HF range of spectrum and at non-elastic – in the LF range. The signal spectrum has the symmetrical form in the far and practically linear-elastic zone.

Elastic linear and nonlinear vibrations are characterized for the given source by the constancy of the real spectrum square, which is the index of definite source energy value, absorbed by soil (which is deformed by the source). The analysis of strong and destructive earthquake records and also the analysis of specially carried out experimental impacts showed that at nonelastic phenomena spectra square of corresponding soil vibrations is not the constant value. It can decrease and the more it decreases, the less the soil solidity and the greater the impact value is [Zaalishvili, 2012].

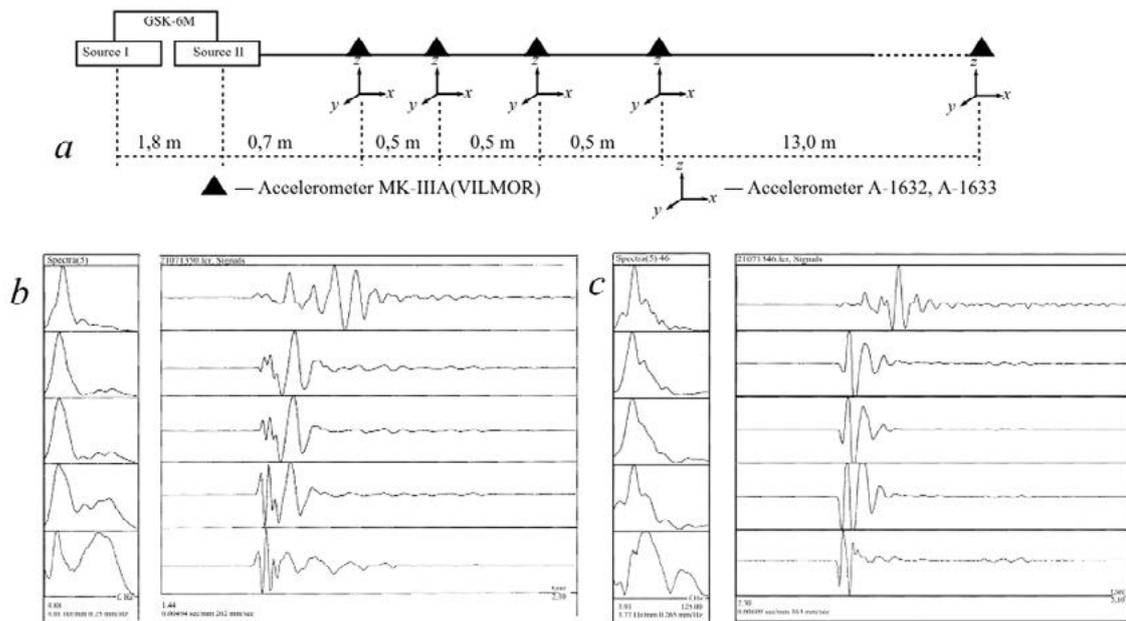


Fig. 2. Investigation of site spectral features by means of GSK-6M seismic source: a) experiment scheme; b) records of first source impact; c) records of second source impact. /

Рис. 2. Исследование спектральных особенностей площадки с помощью сейсмического источника ГСК-6М: а) схема эксперимента; б) записи первого источника воздействия; в) записи второго источника воздействия.

At usage of vibratory energy source, the whole number of new formulas [Zaalishvili, 2009] was obtained in order to assess soil seismic hazard with taking into account the amount of their nonelasticity:

$$\Delta I = 2.4 [\lg (S_{ri})_n (S_{r0})_d / (S_{ri})_d (S_{r0})_n], \quad (8)$$

where:  $(S_{ri})_n, d$   $(S_{r0})_n, d$  are the squares of real spectra of soils under investigation and reference soils in near and distant zones of the source, respectively.

$$\Delta I = 3.3 \lg [(A_i f_{awi})_n (A_0 f_{aw0})_d / (A_i f_{awi})_d (A_0 f_{aw0})_n], \quad (9)$$

where:  $(A_i f_{awi})_n, d$  and  $(A_0 f_{aw0})_n, d$  are the amplitudes and weighted-average frequencies of soils under investigation and reference soils in near and distant zones of the source, respectively.

If a powerful impulsive source is used the offered formulas will be as following:

$$\Delta I = 1.2 [\lg (S_{ri})_n (S_{r0})_d / (S_{ri})_d (S_{r0})_n], \quad (10)$$

where:  $(S_{ri})_n, d$  and  $(S_{r0})_n, d$  are the squares of real spectra of soils under investigation and reference soils in near and distant zones of the source, respectively;

$$\Delta I = 2 \lg [(A_i f_{awi})_n (A_0 f_{aw0})_d / (A_i f_{awi})_d (A_0 f_{aw0})_n], \quad (11)$$

where:  $(A_i f_{awi})_n, d$  and  $(A_0 f_{aw0})_n, d$  are the amplitudes and weighted-average frequencies of soils under investigation and reference soils in near and distant zones of the source, respectively.

The formulas (8) and (9) are adequate only for loose dispersal soils. The formulas (8) and (9) were used at SMZ of Kutaisi city territory. Besides, using the formulas (10) and (11) nonelastic deformation properties of soils in full-scale conditions on Novovoronezh APP-2 site were defined more accurately [Zaalishvili, 2009; 2012]. The formulas were

obtained based on physical principle that underlies the scheme used at the soil looseness assessment.

### 2.3 Consideration of the integral motion, taking nonlinear properties of soils into account

Consideration of the integral motion, taking nonlinear properties of soils into account, obviously creates the conditions for their use in seismic microzonation. Soil is the most uncertain factor in all of the cited studies. Therefore, the issues of geotechnical parameters' accounting for various seismological tasks are considered quite seriously all over the world [Seed et al., 1988; Studer, Ziegler, 1986].

In this regard, the consideration of nonlinear phenomena in the soil or the soil – structure system eliminates the existence of an amplification in the form of a traditional constant value [Aubri, Modaresi, 1987], because the latter is based precisely on a linear representation of ground movement.

Let's consider the example. The table 1 shows the results of comparing the materials from an engineering macroseismic survey of the epicentral zone of the Racha earthquake (Georgia, 1991) and the parameters of the instrumental records obtained under various ground conditions by the SMACH network. Calculations of amplification were carried out using the ratio

$$\delta I = \left\{ \lg \frac{M_1^2 t_{i1} f_{wai1}^2 \sqrt{a_{i1}}}{M_2^2 t_{i2} f_{wai2}^2 \sqrt{a_{i2}}} - \lg \frac{M_1^2 t_{01} f_{wa01}^2 \sqrt{a_{01}}}{M_2^2 t_{02} f_{wa02}^2 \sqrt{a_{02}}} \right\}, \tag{12}$$

where  $\delta I$  is nonlinear amplification on varying exposure,  $\Delta I = \Delta I_{ni} - \Delta I_{n0}$ ;  $\Delta I_{ni}$ ,  $\Delta I_{n0}$  are nonlinear amplification for the investigated and reference soils, respectively, point;  $M_1$ ,  $M_2$  are the magnitudes of (n) and (n+1) earthquakes, respectively;  $t_{i01}$ ,  $t_{i02}$  – the duration of the vibrations of the studied and reference soils during the (n) and (n + 1) earthquakes (with magnitudes  $M_1$  and  $M_2$ ), respectively, s;  $f_{wai01}$ ,  $f_{wai02}$  – weighted average frequencies of vibrations of the investigated and reference soils at (n) and (n + 1) earthquakes, respectively, Hz;  $a_{i01}$ ,  $a_{i02}$  – vibration acceleration of the investigated and reference soils during (n) and (n + 1) earthquakes, respectively, m/s<sup>2</sup>.

Table 1

Engineering and geological conditions of the site	Amplification, $\Delta I$ , point with earthquake magnitude		
	$M = 3.0$	$M = 5.0$	$M = 5.3$
a) macroporous clay, (h = 10.0 m); b) pebbles with sand and clay filler (> 30%, h = 5.0 m); c) slightly weathered limestones	–	–	–
a) weathered limestones (h = 10.0 m); b) slightly weathered limestones	–2.30	–1.48	–0.84

It is clear that the amplification decreases with magnitude of the earthquake increase. This largely explains the significant difference in the features of soil vibrations in the near and far zones. Thus, a small difference in the seismic effect even between soils with very different seismic properties is well known. The nonlinear relationship between the stress and deformation of loose soil causes unequal distortion of the compression and extension

phases, an increase in the rarefaction phase in weaker soils, which leads to a dependence of the dynamic indicators of soil motion on the impact energy.

## 2.4 Calculational method of seismic microzonation

In order to analyze the features of soil behavior with introduction of definite engineering – geological structure characteristics of investigated site as initial data the calculational method of seismic microzonation is used: values of shear wave velocities, modulus of elasticity, index of extinction, power of soil layers, their consistency etc. Calculational method includes the following techniques: thin-layer medium, multiple-reflected waves, finite-difference method, finite-elements analysis (FEA) and others.

Calculational method allows modeling virtually any conditions that are observed in the nature. The requirements of practice however reduced to the necessity of calculation of soil vibrations for nonlinear-elastic and nonelastic deformation conditions. Solving such a problem it is assumed that elastic half-space behaves as linear-elastic medium and at intensive seismic or dynamic impacts the covering soil stratum displays strong nonlinear properties.

Received instrumental stress-strain dependences can be applied, for example, for plastic clay soil shown in Fig. 3. Offered by A. V. Nikolaev [Nikolaev, 1987; Zaalishvili, 2009] conception of the so-called soil bimodularity is taken into account in that dependence [Zaalishvili, 2009]. Considerable differences in “weak” soils behavior at compression and extension underlie in the phenomenon. Such soil is characterized at extension by very small modulus of shearing.

Solving of the given nonlinear problem for soils in the analytic form is usually based on considerable assumptions due to the complication of adequate accounting of behavior features of such complicated system as the soil. Thus, the numerical solving of nonlinear problems on the present-day stage of knowledge is the most proved under the condition that the data of field or laboratory investigations are considered in these or those connections [Zaalishvili, Otinashvili, 2000].

So, the basis for solution of calculation nonlinear problems is the correlation determined using experimental investigations. Otherwise stated, programs for solving of calculation nonlinear problems are in essence analytical-empirical. Such programs like SHAKE, NERA etc. are the most adequate [Bardet, Tobita, 2001].

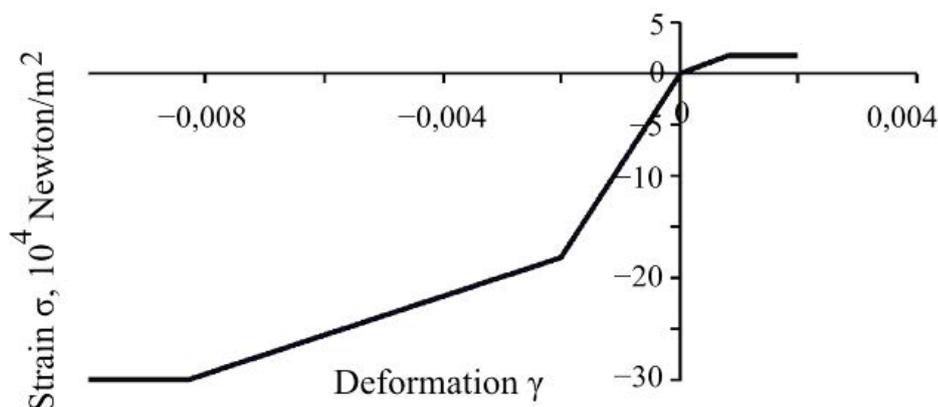


Fig. 3. Instrumental stress-strain curve, showing property of soil bimodularity. /  
Рис. 3. Инструментальная кривая напряжения-деформации, демонстрирующая свойства бимодулярности грунта.

It was assumed to modify multiple reflected waves technique for nonlinear effect accounting. Let's suppose that we have the seismic wave, which falls on the soil thickness surface. Let's assume that soil thickness is nonlinear absorptive unbounded medium with the density  $\rho$  and S-wave propagation velocity  $v_s$ . At small deformations the value of shear modulus  $G$  will be maximum for the given soils:

$$G = G_{max} = \rho v_s^2 \quad (13)$$

At the deformation increase the value  $G$  remains constant at first but at reaching some value (which is definite for each material or soil) the value  $G$  considerably changes, i. e. the soil begins to display its nonlinear properties. At the continued deformation increase the growth of stresses decelerates and then can remain unchanged until material destruction or hardening, i. e. until structural condition change.

As the main soil index, which characterizes its type and behavior at intensive loads, the value of plasticity  $PI$  was chosen. The parameters, which are necessary for calculations, are determined on basis of empirical ratios [Ishibashi, Zhang, 1993; Zaalishvili, Otinashvili, 2000]:

$$k(\gamma, PI) = 0,5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \frac{0,000102 + n(PI)}{\gamma} \right]^{0,492} \right\}, \quad (14)$$

where:

$$n(PI) = \begin{cases} 0,0 & \text{for } PI = 0, \\ 3,37 \cdot 10^{-6} PI^{1,404} & \text{for } 0 < PI \leq 15, \\ 7,0 \cdot 10^{-7} PI^{1,976} & \text{for } 15 < PI \leq 70, \\ 2,7 \cdot 10^{-5} PI^{1,115} & \text{for } PI > 70 ; \end{cases}$$

$$d = 0,272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0,000556}{\gamma} \right)^{0,4} \right] \right\} e^{-0,0145PI^{1,3}}.$$

Then the change of shear modulus is determined on basis of the ratio

$$G/G_{max} = k(\gamma, PI) (\sigma) d, \quad (15)$$

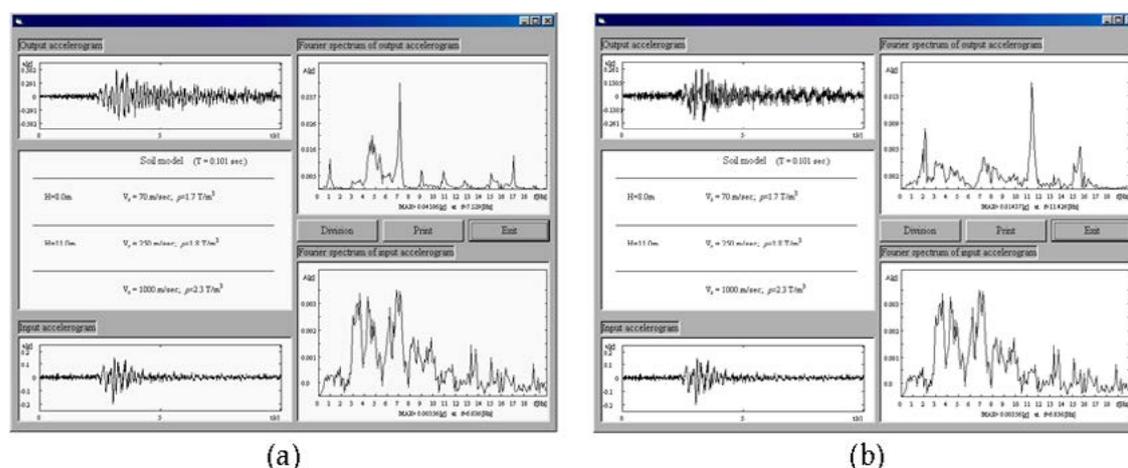
where  $G$  is the current shear modulus,  $\sigma$  is normal stress.

Seismic energy absorption is calculated by the formula

$$\xi = 0,3331 + \exp(-0,0145PI^{1,3})/2 [0,586 (G/G_{max})^2 - 1,547G/G_{max} + 1], \quad (16)$$

On the basis of the given ratios and introduced by us ratios for determination of necessary indices (normal stress, deformation etc), nonlinear version of the program ZOND was worked out [Zaalishvili, 2009]. From the database of strong motions AGESAS, which was formed by us, the accelerogram, which was recorded on rocks in Japan, with the characteristics (magnitude, epicentral distance, spectral features etc.) similar to the territory of Tbilisi city, was chosen as the accelerogram, given into the bedrock.

The analysis of the results of linear and nonlinear calculations models of definite areas of Tbilisi city territory confirms the adequacy of calculations to the physical phenomena, which were obtained in soils at intensive loads (fig. 4). With the increase of seismic impact intensity the nonlinearity display increases. Absorption grows simultaneously. Hence the resulting motion at quite high impacts levels can be lower than the initial level.



*Fig. 4. Results of calculations using multiple reflected waves' tool in linear (a) and nonlinear (b) cases. / Рис. 4. Результаты расчетов с использованием способа многократно отраженных волн в линейном (а) и нелинейном (б) случаях.*

It corresponds to the fact, which is known on the results of analysis of strong earthquake consequences, which happened in recent years (for example, Northridge earthquake, 1994).

The problem of the determination of soil massif response on dynamic impact with taking soil nonlinear properties into account can be solved by usage of finite element method (FEM) in the following way [Zaalishvili, 2009]. Soil medium is represented in the form of two-dimensional massif, which is approximate by triangular finite elements. The net, which consists of triangular elements, allows to describe quite accurately any relief form and form of the layer structure of soil massif with its physics-mechanical parameters.

Within finite element the soil is homogeneous with inherent to its characteristics, which vary in time depending on impact intensity. Earthquake accelerogram of horizontal or vertical direction, which is applied, as a rule, to the foundation of soil massif, is used as the impact. Soil is in the conditions of plane deformation and it is considered as an orthotropic medium. Axes of the orthotropy coincide with the directions of main strains [Zaalishvili, 2012]. The problem of nonlinear dynamics of soil massif is solved by means of the consecutive determination of mode of deflection of the system on the previous step. The system is linear-elastic on each step.

## 2.5 Instrumental-calculational method of seismic microzonation

In recent years a new «instrumental-calculational» method of SMZ (per se simultaneously having the features of both instrumental and calculational method) which includes tool of «instrumental-calculation analogies» has been developed in Russia in recent years [Zaalishvili, 2009]. Its usage is based on direct usage of modern databases of strong movements.

As a basis at realization of tool instrumental database of strong movements, registered in definite soil conditions, is used. As a result of given database with the help of numerical calculations it is possible more or less safely to forecast behavior of these or those soils (or their combination) for strong (weak) earthquakes with typical characteristics for the investigated territory (magnitude, epicentral distance, focus depth etc.).

### 3 Strong ground motion researches considering soil nonlinearity in Taiwan

Overestimating seismic response during strong motions might happen when applying only linear behavior for strong motion simulation or strong motion prediction techniques. Previous studies mostly used soil-to-rock spectral ratio method to evaluate soil nonlinearity [Wen, 1994; Wen et al., 1994; Beresnev et al., 1995a; 1995b]. The nonlinear site effects are then more common observed than previously recognized in strong-motion seismology [Beresnev, Wen, 1996]. However, suitable reference rock sites were very hard to get especially during wide range liquefaction occurred during large earthquake. Meanwhile, single station H/V spectral ratio (HVSr) method could qualitatively identify soil nonlinearity response from spectral difference between strong against weak motions of strong motion data of Large Scale Seismic Test (LSST), Taiwan array and Port Island, Japan [Wen et al., 2006]. [Noguchi, Sasatani, 2008; 2011] had constructed degree of nonlinearity (DNL) to quantitatively consider soil nonlinearity by summed up the spectrum ratio of strong and weak motions. Moreover, two significant features have been reported from the 2008 Wenchuan, China earthquake, including a dominant frequency drop indicated by short-time-Fourier-transformed HVSr in time-frequency analysis (Fig. 5) and a proportional trend between DNL and peak ground acceleration (PGA) [Wen et al., 2011a]. However, further comparison of relations between soil nonlinearity and site properties of strong motion stations could not be clearly checked owing to the lack of detailed site classification information in Wenchuan near fault region. Therefore, similar methodologies were applied to the 2010-2011 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence. In addition to shorter time scaled (co-seismic, Fig. 6) time frequency HVSr, longer time scaled (monthly, Fig. 7) HVSr have also been checked for dominant frequency drop for the Canterbury earthquake sequence. Dominant frequency drop was identified from two larger earthquakes of the sequence and the self-recovery of the soil layer was checked from weak motion HVSr of subsequent aftershocks [Wen et al., 2011b]. [Ren et al., 2017] indicated DNL had positive relation with peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV) and maximum spectral ratio of HVSr etc. from comparing five different methods of quantitatively index of soil nonlinearity. Meanwhile, a convenient strain proxy to explain the stress-strain relation in strong motion nonlinearity effect was established from consider relation between PGA and peak ground velocity (PGV) divided to average shear wave velocity on surface 30 meter's layer ( $V_{s30}$ ) (Strain proxy, [Idress, 2011]). The strain proxy was checked from different seismological regions and checked with several different seismic indexes such as PGA, PGV etc. and suggesting it's a useful idea to consider soil nonlinearity [Chandra et al., 2016; Guéguen et al., 2019; Kuo et al., 2019; Derras et al., 2020].

Moreover, in case of considering soil nonlinearity, the effectively technique to deal with it was equivalent linear simulation technique (SHAKE, [Schnabel et al., 1972]), which could consider soil nonlinearity problem in geotechnical engineering filed and addressed in abovementioned Sec. 2.4. While velocity structure, geological material and suitable stress-strain curve were well investigated and constructed for shallow borehole system, linear and nonlinear ground motion simulations could be done from solving wave propagation equation but it had some limitations of deeper structure or multiple layers consideration. Meanwhile, site correction for stochastic ground motion simulation technique from empirical transfer function (ETF, [Huang et al., 2017]) had been verified could provide similar prediction level with traditional ground motion prediction equation

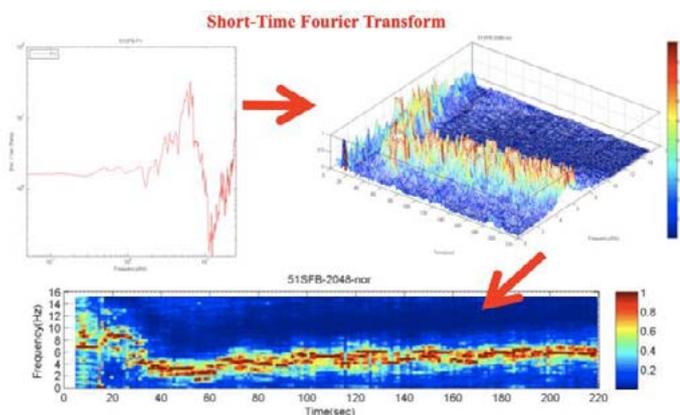


Fig. 5. Short time Fourier transformed HVSR of station 51SFB during Wenchuan, China earthquake [Wen et al., 2011a]. /

Рис. 5. Кратковременное преобразование Фурье HVSR станции 51SFB во время землетрясения в Вэньчуане, Китай [Wen et al., 2011a].

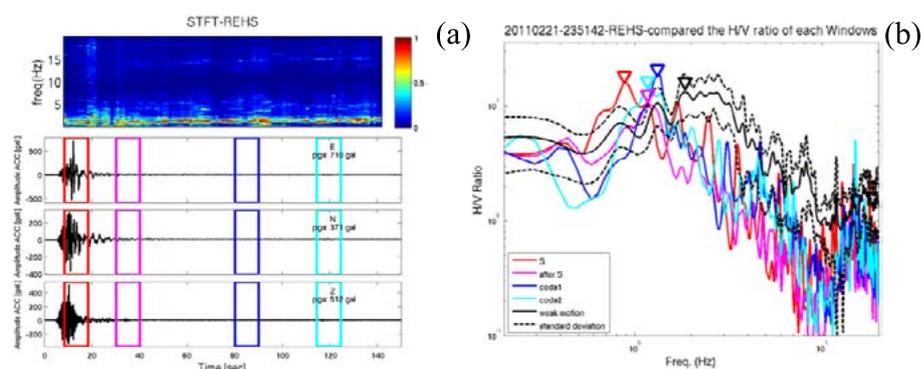


Fig. 6. Time frequency HVSR of each time windows. (red) Shear wave, (purple) after shear wave, (blue and cyan blue) coda waves and (black) averages of weak motions [Wen et al., 2011b]. /

Рис. 6. Частота времени HVSR каждого временного окна. (красным) поперечная волна, (фиолетовая) после поперечной волны, (синяя и голубая) кода-волны и (черные) средние значения слабых движений [Wen et al., 2011b].

(GMPE) and still carry physical meanings. Which means if the seismic parameters were well evaluated in the target region ETF method could provide accurately prediction but still needs to consider more about nonlinearity problems. While the advantages from both simulation techniques was combined to solve nonlinear soil response from following procedure for two borehole seismic arrays in Taiwan (Fig. 9). The simulation process could be described as follows:

Firstly, stochastic simulation would be adjusted from ETF of B class station that would refer to basement rock motion (as imagination of engineering bedrock, EB). Detailed shallow velocity and material of structure above EB would be constructed next and validation of SHAKE process would be made from records of borehole seismograph. Therefore, synthetic motion from first step would be treated as input motion from EB to compute high frequency ground motion simulation with nonlinearity in Taiwan. Finally, ground motion simulation can be performed for moderate magnitude earthquakes by the stochastic point source simulation to rock basement and added the ETF followed [Huang et al., 2017] and can be treated as input motion to equivalent linear simulation. If under ground structure was clear enough, Engineering (EB) and Seismic bedrocks (SB)

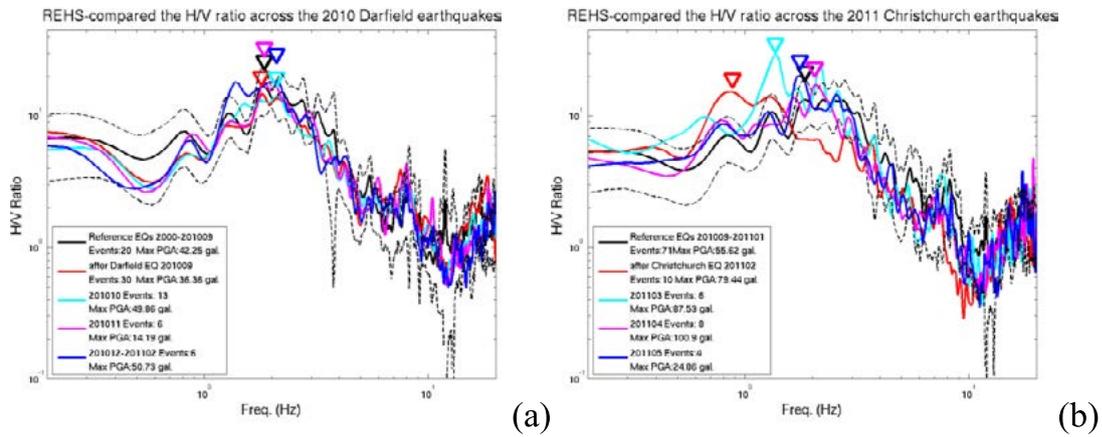


Fig. 7. HVSR of each time windows compared with different time span during 2011 Christchurch, New Zealand earthquake sequence. /

Рис. 7. HVSR каждого временного окна в сравнении с различным периодом времени в 2011 году в Крайстчерче, Новая Зеландия, последовательность землетрясений.

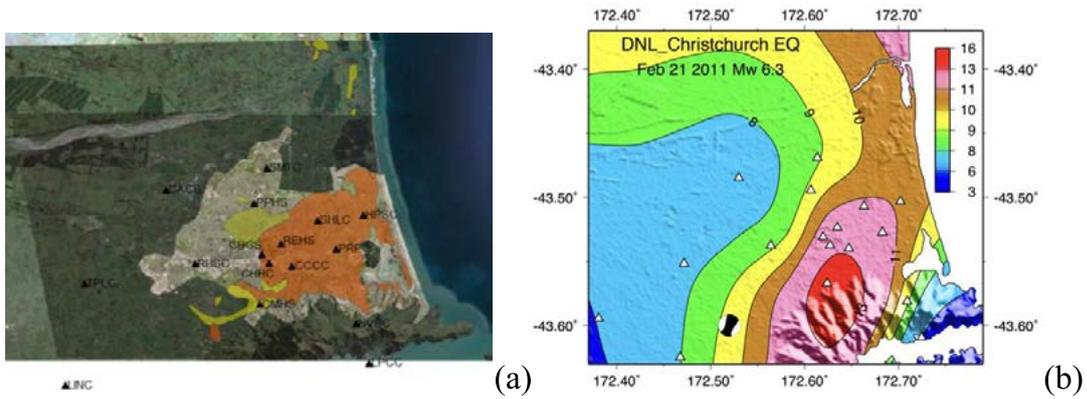


Fig. 8. (a) Liquefaction, (b) DNL distribution in the Christchurch area during the 2011 Christchurch, New Zealand earthquake [Wen et al., 2011b]. /

Рис. 8. (a) Разжижение, (b) Распределение DNL в районе Крайстчерч во время Крайстчерчского землетрясения 2011 года в Новой Зеландии [Wen et al., 2011b].

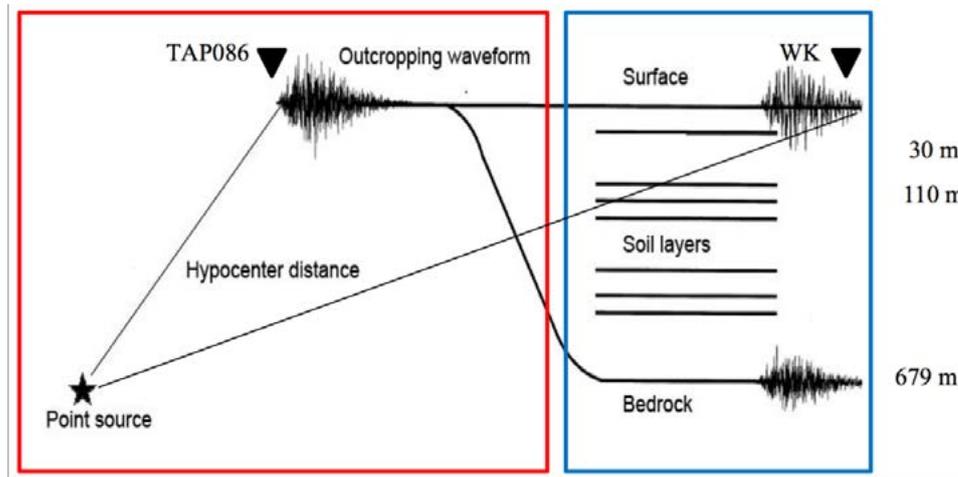


Fig. 9. Flowchart of combining equivalent linear method as a site correction for stochastic point source simulation technique [Saifuddin, 2013]. /

Рис. 9. Блок-схема объединения эквивалентного линейного метода в качестве коррекции площадки для способа моделирования стохастических точечных источников [Сайфуллин, 2013].

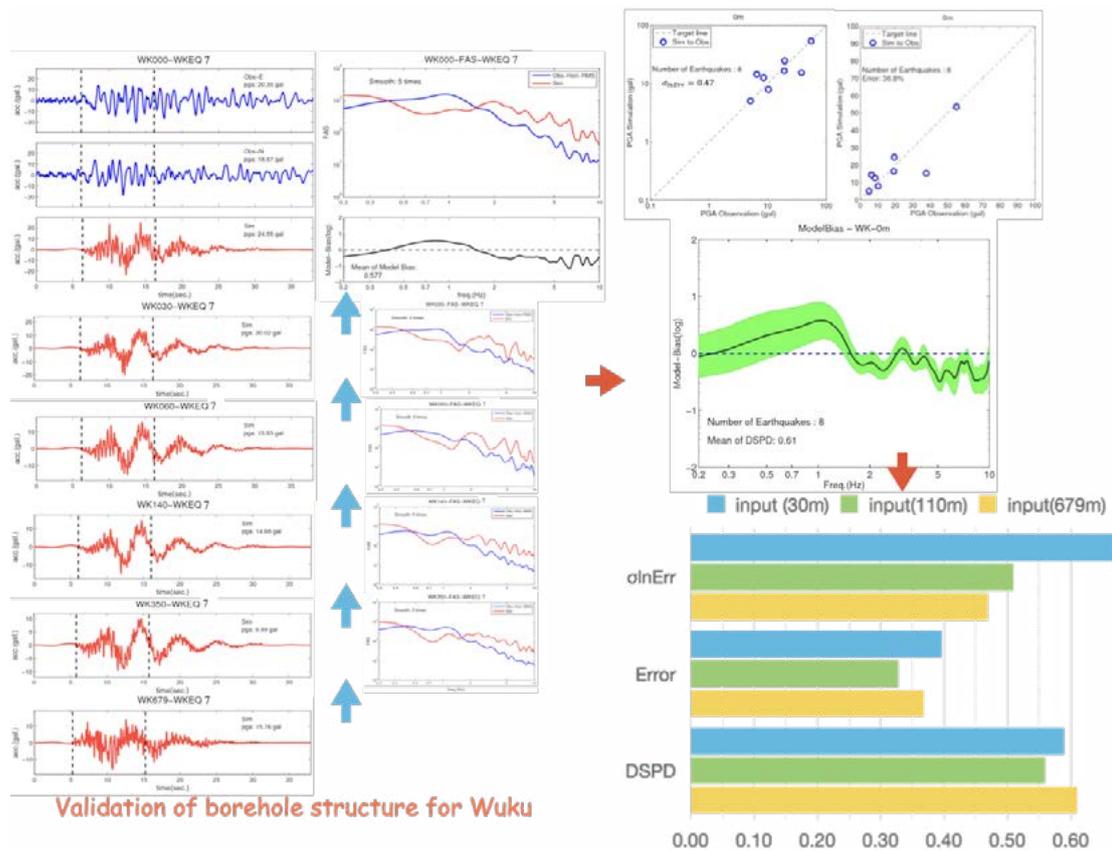


Fig. 10. Checking linear behavior while combining equivalent linear and stochastic simulation for seismic borehole array in Taipei, Taiwan (modified from [Saifuddin, 2013]). /

Рис. 10. Проверка линейного поведения при комбинировании эквивалентного линейного и стохастического моделирования для массива сейсмических скважин в Тайбэе, Тайвань (модифицировано из [Saifuddin, 2013]).

obtained similar result when applying equivalent linear method as site correction, from frequency and time domains shown that it was acceptable for using input motion in 30 meter and engineering bedrocks for small intensity events (as a linear site response, Fig. 10) and large intensity events (as nonlinear response, Fig. 11). It will be more useful in some sites where didn't have deep enough borehole structure. The applications will be more widely and save more budgets in many regions that people can drill more shallow boreholes in wider region rather than few deep boreholes.

### 3.1 Methodology HVSr

One of the traditional site effect evaluation method were using spectral ratio between soil station and reference rock sites (could be surface or downhole stations). [Nakamura, 1989] found vertical FAS in surface soil site ( $S_V(f)$ ) would be amplified comparing to downhole station ( $B_V(f)$ ) while using downhole site as reference rock. The vertical amplification from source effect  $A_S(f)$  could be expressed as follows:

$$A_S(f) = \frac{S_V(f)}{B_V(f)}. \quad (17)$$

Meanwhile, traditional soil to rock spectral ratio method could be written as  $S_E(f)$ :

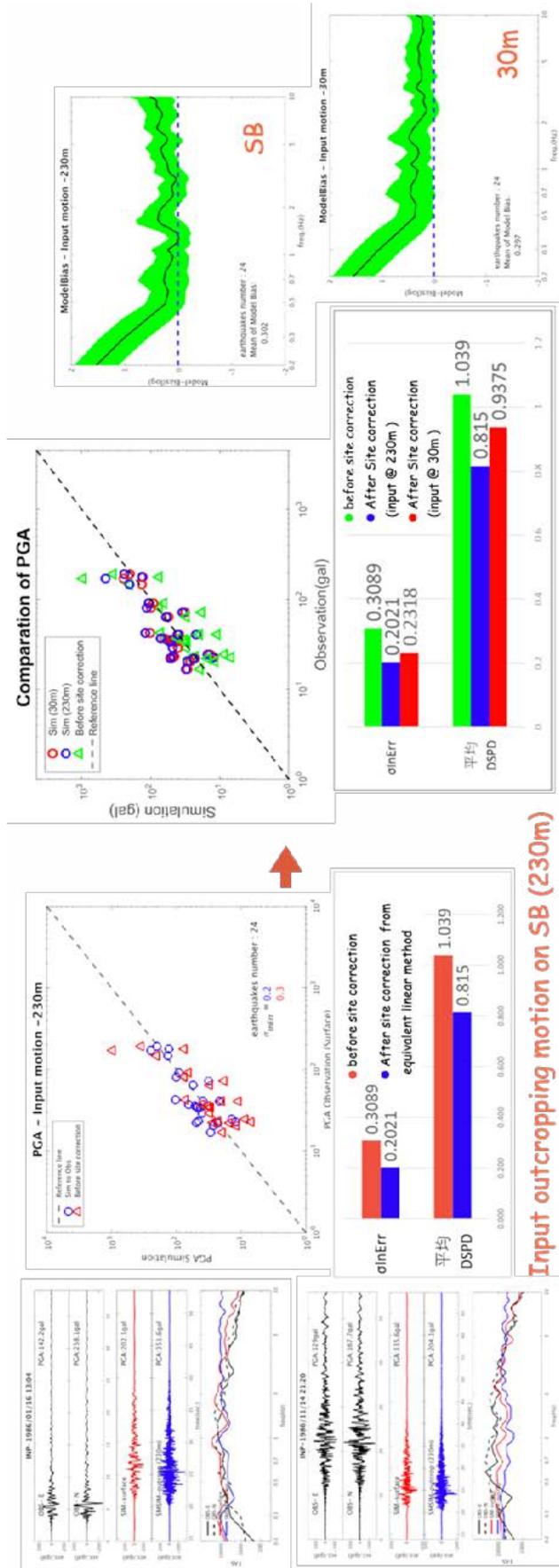


Fig. 11. Checking nonlinear behavior while combing equivalent linear and stochastic simulation for seismic borehole array in LSST, Taiwan (modified from [Lin, 2019]). /

Рис. 11. Проверка нелинейного поведения при комбинировании эквивалентного линейного и стохастического моделирования для массива сейсмических скважин в LSST, Тайвань (модифицировано из [Lin, 2019]).

$$S_E(f) = \frac{S_H(f)}{B_H(f)}. \quad (18)$$

Therefore, source related vertical amplification motion should be eliminated as

$$S_M(f) = \frac{S_E(f)}{A_S(f)} = \frac{\frac{S_H(f)}{B_H(f)}}{\frac{S_V(f)}{B_V(f)}} = \frac{S_H(f)}{B_H(f)} \cdot \frac{B_V(f)}{S_V(f)} \quad (19)$$

Finally, Nakamura discovered the response for downhole reference site  $\frac{B_H(f)}{B_V(f)}$  would be nearly equal 1 in site related frequency band. That means, the site amplification could be calculated from surface station directly as:

$$S_M(f) \approx \frac{S_H(f)}{S_V(f)}. \quad (20)$$

#### DNL

[Noguchi and Sasatani, 2008] hypothesized that the degree of nonlinearity of site response (DNL) depends on a summation of differences between H/V for strong motion and their reference. The DNL can be quantified by Eq. (21):

$$DNL = \sum \left| \log \left( \frac{R_{strong}}{R_{ref}} \right) \right| \cdot \Delta f \quad (21)$$

where  $R_{strong}$  means HVSR for strong motion and  $R_{ref}$  means HVSR for the reference (Weak motions). The DNL value shows a positive correlation with observed horizontal PGA/PGV when the soil condition is soft and fit the distribution of liquefaction region (Fig. 8, [Wen et al., 2011b]).

## 4 Results and discussion

The physical basis, methods and techniques for creation of seismic microzonation maps, including the use of modern high-power non-explosive sources (vibration and impulsive action) are considered. The physical formation mechanisms of algorithms of direct account of a number of soils indicators under heavy loads, which are the basis of relevant computer programs, are considered. It identifies changes or distortion of the amplitude-frequency characteristics of the original or the incoming wave field of seismic impact caused by the interaction of absorption and nonlinearity (or inelasticity) phenomena in different typical soils of the territory. The possibility of successful differentiation of soil conditions on the basis of the analysis of the relationship of the horizontal vibration spectrum of the initiated signal to the vertical spectrum and the predominant frequency of the ground motion is shown. The process of formation of seismic microzonation map of modern urban territory is considered.

In addition, soil nonlinearity researches indicated several convenient tools such as HVSR and DNL calculation could provide quantitatively account for nonlinear behavior during strong ground motions in Taiwan, New Zealand earthquakes. Synthetic Ground motions in both time domain (PGA) and frequency domain (FAS) of combining equivalent linear method and stochastic point source simulation technique indicated reasonable prediction level with observation records from seismic downhole arrays in Taiwan. It was noticeable that the simulation procedure has provided error level for user's choice while

considering applications and budget consuming problems. Velocity and geology structures of drilling for top layer of 30 meter or engineering bedrocks might have acceptable predictions for efficiently widespread investigations.

## References

1. Aguirre J., Irikura K. Nonlinearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1997. 87. pp. 1244-1258.
2. Aubri D., Modaressi H. Calcul non lineaire des effets de site en genil paraseismigues. *Meth. Elem. Finis. Proj. Geotech. Paris.* 1987. pp. 239-247.
3. Bardet J.P., Tobita T. NERA, A computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits. Univ. of Southern California, Los Angeles, 2001. 44 p.
4. Beresnev I.A., Wen K.L. Nonlinear ground response-A reality? (A Review). *Bull. Seis. Soc. Am.* 1996. 86 (6). pp. 1964-1978.
5. Beresnev I.A., Wen K.L., Yeh Y.T. Nonlinear soil amplification: Its corroboration in Taiwan. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1995a. 85. pp. 496-515.
6. Beresnev I.A., Wen K.L., Yeh Y.T. Seismological evidence for nonlinear plastic ground behavior during large earthquakes. *Soil. Dyn. Earthquake Eng.* 1995b. 14. pp. 103-114.
7. Boore D.M., Seekins L., Joyner W.B. Peak acceleration from the 17 October 1989 Loma Prieta earthquake. *Seismological Research Letter.* 1989. 60. pp. 151-166.
8. Chandra J., Guéguen P., Bonilla L.F. PGA-PGV/Vs considered as a stress – strain proxy for predicting nonlinear soil response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 2016. 85. pp. 146-160.
9. Darragh R.B., Shakal A.F. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion. *Proc. 4th Intl. Conf. Seismic Zonation.* 1991a. 3. pp. 359-366.
10. Darragh R.B., Shakal A.F. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1991b. 81. pp. 1885-1899.
11. Derras B., Bard P.Y., Régnier J., Cadet H. Non-linear modulation of site response: Sensitivity to various surface ground-motion intensity measures and site-condition proxies using a neural network approach. *Engineering Geology.* 2020. 269. (In press)
12. Guéguen P., Bonilla L.F., Douglas, J. Comparison of soil nonlinearity (In situ stress – strain relation and  $G=G_{max}$  reduction) observed in strong-motion databases and modeled in ground-motion prediction equations. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2019. 109 (1). pp. 178-186.
13. Huang J.Y., Wen K.L., Lin C.M., Kuo C.H., Chen C.T., Chang S.C. Site correction of a high-frequency strong-ground-motion simulation based on an empirical transfer function. *J. Asian Earth Sci.* 2017. 138. pp. 399-415.
14. Idriss I.M. Use of Vs30 to represent local site conditions. In *Proceedings of the 4th IASPEI/IAEE international symposium. Proc. Esg4.* 2011. Santa Barbara, USA.
15. Ishibashi I., Zhang. X. Unified dynamics shear module and damping ratios of sand and clay. *Soils and foundations.* 1993. 33 (1). pp. 181-191.
16. Kuo C.H., Huang J.Y., Lin C.M., Hsu T.Y., Chao S.H., Wen K.L. Strong ground motion and pulse-like velocity observations in the near-fault region of the 2018 Mw 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake. *Seismological Research Letters.* 2019. 90 (1). pp. 40-50.
17. Lin C.Y. High frequency ground motion simulation with soil nonlinearity: a practice of LSST array. master thesis in National Central University. 2019. Taiwan, 83 p. (in Chinese with English abstract)
18. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro-tremor on the ground surface. *QR of RTRI.* 1989. 30 (1). pp. 25-33.
19. Nikolaev A.V. Seismic properties of a soft medium. *Izv. of USSR Academy of Sciences Physics of Earth,* 1967. №2. pp. 23-31.
20. Nikolaev A.V. Problems of nonlinear seismic. Moscow: Nauka. 1987. pp. 5-20. (in Russian)

21. Noguchi S., Sasatani T. Quantification of degree of nonlinear site response. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. 2008. Beijing, China.
22. Noguchi S., Sasatani T. Nonlinear soil response and its effects on strong ground motions during the 2003 Miyagi-Oki intraslab earthquake. *Earthquake*. 2011. 63 (2), pp. 165-187. (in Japanese)
23. Ren Y. F., Wen R. Z., Yao X. X., Ji K. Five parameters for the evaluation of the soil nonlinearity during the Ms8.0 Wenchuan earthquake using the HVSR method. *Earth, Planets and Space*. 2017. 69:116.
24. Saifuddin. Stochastic ground motion simulation with site correction using equivalent-linear method. master thesis in National Central University, Taiwan. 2013. 126 p.
25. Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B. SHAKE – a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. EERC, College of engineering, University of California, Berkeley. 1972. [1]<sub>SEP</sub>
26. Seed H. B., Romo M. P., Sun J. I., Jaime A., Lysmer J. The Mexico earthquake of September 19, 1985 – relationships between soil conditions and earthquake ground motion // *Earthquake Spectra*. 1988. 4. pp. 687-789.
27. Studer J. A., Ziegler A. The geotechnical aspect of microzonation. Proceedings of the 8-th European Conference on Earthquake Engineering. 1986. 2. pp. 9-16.
28. Wen K. L. Non-linear soil response in ground motions. *Earthq. Eng. Struct. Dyn*. 1994. 23. pp. 599-608.
29. Wen K. L., Beresnev I. A., Yeh Y. T. Non-linear soil amplification inferred from downhole strong seismic motion data. *Geophysical Research Letters*. 1994. 21. pp. 2625-2628. [1]<sub>SEP</sub>
30. Wen K. L., Beresnev I. A., and Yeh Y. T. Investigation of non-linear site amplification at two downhole strong ground motion arrays in Taiwan. *Earthq. Eng. Struct. Dyn*. 1995. 24. pp. 313-324.
31. Wen K. L., Chang T. M., Lin C. M., Chiang H. J. Identification of nonlinear site response using the H/V spectral ratio method. *Terrestrial atmospheric & oceanic sciences. Sci*. 2006. 17 (3). pp. 533-546.
32. Wen K. L., Huang J. Y., Li X. J., Zhou Z. H., Wen R. Z. Nonlinear site response of the 2008 Wenchuan, China earthquake from time-frequency analysis. Proc. 8CUEE. 2011a. P121, Tokyo, Japan.
33. Wen K. L., Huang J. Y., Chen C. T., Cheng Y. W. Nonlinear site response of the 2010 Darfield, New Zealand earthquake sequence. Proc. Esg4. 2011b. Santa Barbara, USA.
34. Zaalishvili V. B. The weighted average period of soil vibrations excited by various kinds of artificial sources. Abstracts of the Joint session of the Research Institute of the Transcaucasian Republics on Construction: Mecniereba. Tbilisi. 1987. 350 p. (in Russian).
35. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation based on the study of nonlinear soil properties by artificial sources. Abstract of the dissertation on the doctor of physical and mathematical sciences. 1996. Moscow State University. Moscow. 43 p.
36. Zaalishvili V. B. Physical basics of seismic microzonation. Moscow. UIPE RAS. 2000. 367 p. (in Russ.)
37. Zaalishvili V. B., Otinashvili M. G. Analysis of ground strong motions by means of numerical methods. Theory of constructions and earthquake engineering. 2000. Tbilisi. ISMIS AS of Georgia. 1. pp. 67-71. (in Georgian)
38. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka. 2009. 350 p. (in Russ.).
39. Zaalishvili V. B. Assessment of seismic hazard territory. *Earthquake Engineering*. Published by InTech. Edited Halil Sezen. 2012. pp. 25-64.

---

---

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ  
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

---

---

УДК 553.982.2

DOI: [10.46698/VNC.2020.17.62.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.17.62.008)

Оригинальная статья

## Пространственное распространение пермо-триасовых отложений Восточного Предкавказья и их нефтегазоносность

М. А. Хасанов <sup>1</sup>, Т. Б. Эзирбаев <sup>1,2</sup>, А. С. Эльжаев <sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Грозненский государственный нефтяной технический университет  
им. акад. М. Д. Миллионщикова, Россия, 364051, Чеченская Республика,  
г. Грозный, пр-т им. Х. А. Исаева, д. 100, e-mail: timersno@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН,  
Россия, 364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21а

Статья поступила: 03.05.2020, доработана: 20.06.2020, одобрена в печать: 25.06.2020

**Резюме:** **Актуальность** изучаемой проблемы заключается в том, что месторождения нефти и газа Восточного Предкавказья являются одними из самых длительно разрабатываемых в России. Однако в настоящее время, когда объем геологоразведочных работ на нефть и газ значительно снизился, прирост запасов УВ сократился до минимума. Но по оценкам различных геологических служб РФ, в глубоководных пермо-триасовых отложениях Восточного Ставрополя и Равнинного Дагестана еще может содержаться значительный объем углеводородного сырья. И для определения правильного комплекса геологоразведочных работ на нефть и газ необходим комплексный анализ всех геологических и промыслово-геофизических материалов, результатов лабораторного анализа петрофизических свойств, обобщение и ревизия результатов опробования и испытания карбонатных отложений изучаемых отложений с целью выявления закономерностей развития коллекторов. В связи с этим выполнение данной работы в настоящее время является актуальной задачей. **Цель работы** – обобщить многочисленные исследования по изучению литолого-петрографических особенностей отложений Пермо-триасового комплекса Восточного Предкавказья и его битуминологической характеристике, которые говорят о том, что в разрезе его имеются мощные толщи пород, обладающие богатым потенциалом генерации жидких и газообразных углеводородов. В первую очередь, к ним следует отнести карбонатные и карбонатно-терригенные породы нижнего-среднего триаса морского генезиса (Нефтекумская, Култайская, Демьяновская и Кизлярская свиты). Существенный объем углеводородов могли генерировать и карбонатно-терригенные и терригенные пестроцветные породы среднего триаса лагунно-морского и лагунно-континентального генезиса (Плавненская и Закумская свиты), а также терригенная пестроцветная толща пород верхней Перми преимущественно морского генезиса (Куманская свита). **Методы исследования.** В статье рассмотрены проблемы расчленения разреза на пласты и выделения коллекторов, оценки их фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов, обоснования нефтегазонасыщенности и проницаемости продуктивных пластов. Для установления закономерностей распространения коллекторов и составления рекомендаций на проведение геологоразведочных работ, направленных на поиск нефти и газа в изучаемом нефтегазональном комплексе был выполнен анализ литофациальных, петрофизических и емкостно-фильтрационных свойств пород-коллекторов в разрезе нижнетриасовых отложений нефтекумской свиты Восточного Ставрополя. В работе так же приведены результаты геофизических и лабораторных исследований, которые содержат данные о петрофизических и физико-химических свойствах изучаемых пород отложений нижнего триаса: пористость; объемный вес; карбонатность; коэффициент гидрофобности, удельное электрическое сопротивление; интервальное время распространения упругих продольных волн. **Результаты исследования.** Из комплексного анализа распределения головных петрофизических параметров и

результатов испытания скважин видно, что лишь на юго-востоке получены притоки нефти из карбонатных коллекторов нефтекумской свиты. В области хемогенного (доломитового) карбонатакопления продуктивными являются XI-XII пласты средней подсвиты, в области массового развития биогермных построек и межрифтовых понижений продуктивными являются I-VI пласты нефтекумской свиты. В областях мелко-водного карбонатакопления находятся водонасыщенные коллектора.

**Ключевые слова:** нефтекумская свита, емкостно-фильтрационные свойства, пористость, проницаемость, остаточная водонасыщенность, нефтегазоносность.

**Для цитирования:** Хасанов М.А., Эзирбаев Т.Б., Эльжаев А.С. Пространственное распространение пермо-триасовых отложений Восточного Предкавказья и их нефтегазоносность. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 113-126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008.

==== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS ====

DOI: [10.46698/VNC.2020.17.62.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.17.62.008)

Original paper

## Spatial distribution of Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia and their oil and gas potential

M. A. Khasanov<sup>1</sup>, T. B. Ezirbaev<sup>1,2</sup>, A. S. Eljaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grozny State Oil Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov, 100 Kh. A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation, e-mail: timersno@mail.ru;

<sup>2</sup>Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, 21a Staropromyslovskoe highway, Grozny 364051, Russian Federation

*Received: 03.05.2020, revised: 20.06.2020, accepted: 25.06.2020*

**Abstract: Relevance.** The urgency of the studied problem lies in the fact that the oil and gas fields of the Eastern Ciscaucasia are one of the longest developed in Russia. However, at present, when the volume of exploration for oil and gas has significantly decreased, the increase in hydrocarbon reserves has decreased to a minimum. But according to estimates of various geological services of the Russian Federation, in the deeply submerged Permo-Triassic sediments of the East Stavropol and Plain Dagestan, a significant amount of hydrocarbon raw materials may still be contained. And to determine the correct complex of geological exploration for oil and gas, a comprehensive analysis of all geological and field geophysical materials, results of laboratory analysis of petrophysical properties, generalization and revision of the results of testing and testing of carbonate deposits of the studied deposits in order to identify patterns of reservoir development are necessary. In this regard, the implementation of this work is currently an urgent task. **The purpose of the work** is to summarize numerous studies on the lithological and petrographic features of the Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia and its bituminological characteristics, which indicate that it contains powerful rock strata with a rich potential for generating liquid and gaseous hydrocarbons. First of all, these include carbonate and carbonate-terrigenous rocks of the Lower-Middle Triassic of marine origin (Neftekumskaya, Kultayskaya, Demyanovskaya and Kizlyarskaya suites). A significant amount of hydrocarbons could be generated by both carbonate-terrigenous and terrigenous variegated rocks of the Middle Triassic of the lagoon-marine and lagoon-continental genesis (Plavnenskaya and Zakumskaya Formations), as well as terrigenous variegated strata of rocks of the upper Perm mainly of the marine genesis (Kuman Formation). **Research Methods.** The article discusses the problems of dividing a section into formations and separating reservoirs, assessing their filtration and reservoir properties of reservoir rocks, substantiating oil and gas saturation and permeability of productive formations. In order to establish the patterns of reservoir distribution and make recommendations for geological exploration aimed at finding oil and gas in

the studied oil and gas complex, the lithofacial, petrophysical, and capacitive-filtration properties of reservoir rocks were analyzed in the context of the Lower Triassic sediments of the Neftekum Formation. The paper also presents the results of geophysical and laboratory studies, which contain data on the petrophysical and physico-chemical properties of the studied rocks of the Lower Triassic sediments: porosity; volume weight; carbonate content; hydrophobicity coefficient, electrical resistivity; interval propagation time of elastic longitudinal waves. **The results.** From a comprehensive analysis of the distribution of the leading petrophysical parameters and the results of well testing, it is clear that oil flows from the carbonate reservoirs of the Neftekum Formation were obtained only in the southeast. In the area of chemogenic (dolomitic) carbonate accumulation, the XI-XII layers of medium subformation are productive, in the field of mass development of bioherm constructions and inter-riff depressions, I-VI layers of the Neftekum suite are productive. In areas of shallow carbonate accumulation are water-saturated reservoirs.

**Keywords:** Neftekumskaya suite, capacitance-filtration properties, porosity, permeability, residual water saturation, oil and gas content.

**For citation:** Khasanov M. A., Ezirbaev T. B., Eljaev A. S. Spatial distribution of Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia and their oil and gas potential. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2020. 10 (2): 113-126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008.

## Введение

Многочисленные исследования по изучению литолого-петрографических особенностей отложений пермо-триасового комплекса Восточного Предкавказья и его битуминологической характеристики говорят о том, что в разрезе его имеются мощные толщи пород, обладающие богатым потенциалом генерации жидких и газообразных углеводородов. В первую очередь, к ним следует отнести карбонатные и карбонатно-терригенные породы нижнего-среднего триаса морского генезиса (нефтекумская, култайская, демьяновская и кизлярская свиты). Существенный объем углеводородов могли генерировать карбонатно-терригенные и терригенные пестроцветные породы среднего триаса лагунно-морского и лагунно-континентального генезиса (плавненская и закумская свиты), а также терригенная пестроцветная толща пород верхней Перми преимущественно морского генезиса (куманская свита) [Вобликов, Чумаченко, 2001].

## Цель работы

Изучение фильтрационно-емкостных свойств и гидрогеологической обстановки пластов-коллекторов в разрезе пермо-триасового комплекса затруднено их литологическими особенностями, а также слабыми техническими возможностями. Высокая трещиноватость и кавернозность отдельных прослоев горизонтов-коллекторов карбонатных пород существенно снижает вынос наиболее представительных образцов керна для изучения коллекторских свойств лабораторными методами, а также существенно искажает их истинные параметры, получаемые при проведении промысловых и промыслово-геофизических исследований в результате загрязнения глинистым и цементными растворами. Достаточно отметить, что вынос керна продуктивных горизонтов нефтекумской свиты, как правило, не превышает 1%, а поднятые образцы пород представляют наиболее плотные их разности. Высокая трещиноватость и кавернозность карбонатных горизонтов способствуют понижению коллекторских свойств, за счет поглощения глинистого и тампонажного растворов в процессе бурения и крепления скважин [Вобликов и др., 1999, 2010; Туманова и др., 1999; Wanas, Soliman, 2018; Vergés et al., 2020; Juan I. Soto et al., 2017].

Наиболее надежно в разрезе пермо-триасового комплекса выделяются следующие нефтенасыщенные пласты-коллекторы, связанные с карбонатными породами:

– в среднетриасовом нефтегазоносном комплексе – пласт известняка, залегающий в подошве, плавненской свиты (ладинский ярус). С ним связаны все известные в среднем триасе Восточного Предкавказья скопления нефти (Сухокумское, Восточно-Сухокумское, Солончаковое и др.). Этот горизонт в Дагестане отнесен к анизийскому ярусу.

– в нижнем триасе таких два объекта: один в култайской свите (оленекский ярус), а другой – в нефтекумской (индский ярус).

С нефтекумскими известняками связано подавляющее большинство выявленных залежей нефти в Восточном Предкавказье. В среднетриасовом комплексе выявлено шесть залежей.

Коллекторские свойства продуктивных горизонтов соответственно изучены намного лучше в нефтекумских отложениях, среднетриасовые коллектора целенаправленно не изучались. В рамках настоящей темы сделана попытка восполнить этот пробел в пределах Восточного Ставрополя.

### Методы исследования

Для анализа закономерностей изменения коллекторских свойств по разрезу анизийских отложений использованы данные петрофизических исследований 540 образцов кернового материала, извлеченного из 65 скважин по 28 разведочным площадям и месторождениям Восточного Ставрополя. Анализ проведен отдельно для образцов нижнего и верхнего подъярусов (358 и 182 образцов соответственно). Изучены два основных типа пород: обломочные – песчаники, алевролиты; и карбонатные – известняки и мергели. Карбонатные породы в целом характерны для нижнего подъяруса.

Абсолютное большинство (81%) образцов кернового материала из нижнего анизия содержат карбонатные породы. Остальное представлено единичными образцами обломочных пород (аргиллиты, песчаники, алевролиты), поэтому данные их петрофизических характеристик не обладают достаточной достоверностью.

Проведенные исследования показали, что карбонатные отложения нижнего подъяруса анизийских отложений являются слабопроницаемыми, с низкими коллекторскими свойствами. По классификации коэффициента проницаемости Теодоровича Г. И. они относятся к IV классу с  $K_{пр} = 0,001-0,01$  мкм<sup>2</sup>, а по классификации открытой пористости Авдусина П. П. и Цветковой М. А. данные отложения относятся к классу E, то есть к породам с открытой пористостью менее 5%. Следовательно, отложения нижнего подъяруса относятся к коллекторам IV-V классов.

Структура карбонатных пород нефтекумской свиты Восточного Ставрополя довольно сложная, так как состоит из нескольких компонент. В связи с этим при создании объемной модели такой многокомпонентной сложной трещинно-кавернозно-гранулярной породы был применен стохастический метод, при котором задаются условием, что блок породы сложен из скелета, содержащего карбонатную, доломитовую, глинистую составляющие с примесями других частиц, и межгранулярных пор. Для создания описанной модели использовалось равенство:

$$C_{изв} + C_{дол} + C_{песч} + C_{гл} + K_{пб} = 1,$$

где  $C_{изв}$ ,  $C_{дол}$ ,  $C_{песч}$ ,  $C_{гл}$  – соответственно объемное относительное содержание в блоке известняка, доломита, песчаника и глины;

$K_{пб}$  – межзерновая блоковая пористость.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) сложных карбонатных коллекторов определяется пористостью, структурой пустотного пространства и сопротивлением флюидов, насыщающих пустоты. Для петрофизической модели электропроводности сложного коллектора, УЭС является одним из наиболее информативных параметров, изучаемых методами ГИС. Влияние на УЭС пустот различного строения (пор, трещин, каверн), образующих емкостное пространство коллектора, проявляется по-разному. Для определения этого влияния была построена зависимость УЭС от коэффициента открытой пористости по керну (коэффициент корреляции 0,73). Изменение происходит по экспоненциальному закону, т.е. с уменьшением пористости удельное сопротивление возрастает. Для более полной характеристики модели электропроводности была определена зависимость параметра пористости от коэффициента открытой пористости (по керну).

На основании анализа диаграмм стандартного каротажа и изучения петрофизических свойств разреза некоторые исследователи делят отложения нефтекумской свиты на 15 пластов (Сосон М. Н., Борисенко З. Г., Плотников М. С. и др.). Породы 1-3 пласта характеризуются значениями УЭС по БК порядка 240-250 Ом•м, затем идет уменьшение сопротивления до 10 пласта (от 60 Ом•м до 150 Ом•м). Для 10 пласта вновь характерно увеличение сопротивления, и затем снова уменьшение до 15 пласта. Соответственно меняются и другие характеристики пород. В процессе работы были рассмотрены результаты испытания и интерпретации материалов ГИС. Анализировались данные по 120 скважинам [Сосон и др., 1985].

В результате проведенного анализа было определено, к каким пластам приурочены испытания скважин и получены притоки УВ. Основные испытания выполнялись в кровельной части.

В основном, притоки нефти были получены из отложений верхней подсвиты (1-6 пласты) нефтекумской свиты: в 17 случаях были получены притоки нефти или нефти с водой, в 8 случаях – притоки воды, в 5 случаях – нет притока.

В отложениях средней подсвиты, наиболее продуктивными оказались 11-12 пласты, представленные доломитами или доломитизированными известняками, что еще раз подтверждает вывод об улучшении емкостно-фильтрационных характеристик вследствие доломитизации пород.

Поровое пространство карбонатных коллекторов нефтекумской свиты, было изучено с помощью акустического каротажа, достоверность результатов которого была подтверждена результатами лабораторного исследования образцов керна с использованием установки ИСУ-1 (измеритель скорости ультразвука). Ультразвуковые волны, распространяясь в различных средах, поглощаются и рассеиваются с различной интенсивностью в зависимости от плотности, пористости, однородности состава и других текстурно-структурных свойств породы. Исследованные таким образом карбонатные породы изучаемых отложений показывают довольно большой разброс скоростей распространения ультразвука, от 3500 до 6000 м/с.

Проведенная оценка емкостных свойств карбонатных пород нефтекумской свиты по данным промыслово-геофизических исследований показала, что средняя величина трещиновато-кавернозной пористости составляет около 1,6% [Чепак и др., 1980].

Гидрогеологическая обстановка анизийских отложений практически не изучена, но опять-таки по аналогии с нефтекумскими известняками можно прогнозировать их схематическую характеристику.

Большинство скважин, вскрывших известняки, нефтекумской свиты, сосредото-

точены в пределах Величаевско-Максимокумского вала, к тому же около 30% их ликвидировано без опробования. Учитывая резкую изменчивость гидрогеологической обстановки, все это предопределило слабую гидрогеологическую изученность пермо-триасового комплекса.

Анализ петрофизических параметров указывает на то, что разные интервалы проницаемости имеют «свои» нижний и верхний пределы пористости, однако с низкими фильтрационными свойствами (доли мкм<sup>2</sup>) характеризуются наибольшими значениями пористости [Хасанов, 2011; Хасанов, Эльжаев, 2010; Хасанов и др., 2017; Hasanov et al., 2017; Ishiyama et al., 2010; Rogers et al., 2006; Ruchko, Kurgansky, 2015; Waxman, Smit, 1968].

В таблице представлены средние значения петрофизических параметров, которые были определены для трех подствит нефтекумской свиты.

Анализ петрофизических свойств свидетельствует о том, что карбонатные породы-коллекторы нижнего триаса относятся к трещинному типу.

Остаточная водонасыщенность в анализируемых образцах изменяется от 16,9

*Таблица 1. / Table 1.*

**Петрофизическая характеристика пород нефтекумской свиты. /  
Petrophysical characteristics of the rocks of the Neftekum suite**

Порода / Rock	К <sub>п. отк</sub> , %	К <sub>пр</sub> , мкм <sup>2</sup>	$\delta_{0, Г/см^3}$	CaCO <sub>3</sub>	К <sub>п. нас</sub> , %
Среднее значение петрофизических параметров для T <sub>1nf<sup>1</sup></sub> / The average value of the petrophysical parameters for T <sub>1nf<sup>1</sup></sub>					
известняки / limestones	1,7	0,16	2,64	80,3	1,2
мергели / marls	1,74	0,001	2,69	45,2	1,1
песчаники / sandstones	3,39	0,06	2,62	33,7	-
алевролиты / siltstones	2,03	0,16	2,69	26,7	-
Среднее значение петрофизических параметров для T <sub>1nf<sup>2</sup></sub> / The average value of the petrophysical parameters for T <sub>1nf<sup>2</sup></sub>					
известняки / limestones	2,05	0,14	2,66	83,3	2,69
доломиты / dolomites	6,87	0,76	2,64	91,3	-
мергели / marls	2,44	0,006	2,64	52,6	-
Среднее значение петрофизических параметров для T <sub>1nf<sup>3</sup></sub> / The average value of the petrophysical parameters for T <sub>1nf<sup>3</sup></sub>					
известняки / limestones	2,49	0,48	2,64	84,63	1,61
доломиты / dolomites	5,42	0,76	2,6	88,2	-
мергели / marls	4,31	-	2,57	54,4	-
песчаники / sandstones	5,1	0,5	2,4	9,01	-
алевролиты / siltstones	3,8	-	2,58	23,3	-

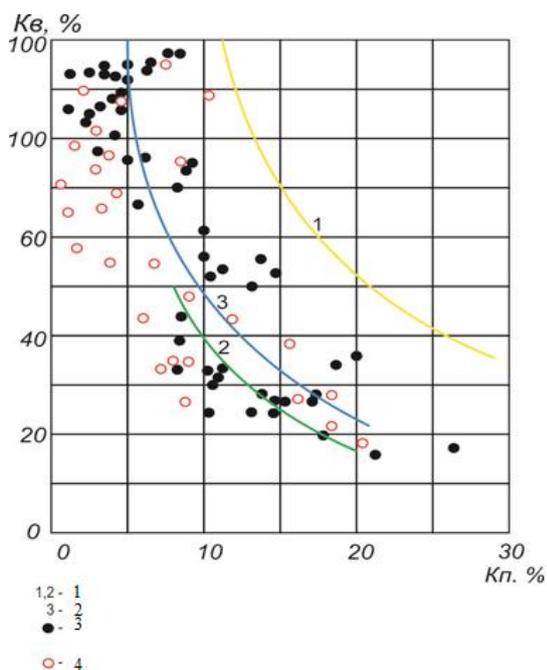


Рис. 1. Связь остаточной водонасыщенности с пористостью для нижне-триасовых отложений Равнинного Дагестана и Ставропольского края. Условные обозначения: 1) для мелкоподобных и мелкозернистых известняков (по Арчи) соответственно; 2) для карбонатных пород нижнего триаса Восточного Предкавказья; 3)  $K_v$  и  $K_l$  определены по керну равнинного Дагестана и Ставрополя соответственно (С.С. Итенберг, Г.А. Шнурман, 1984 г.); 4) точки, соответствующие данным, полученным Хасановым М.А./

Fig. 1. Relation of residual water saturation with porosity for the Lower Triassic deposits of Plain Dagestan and the Stavropol Territory. Legends: 1) for chalk-like and fine-grained limestones (according to Archi), respectively; 2) for carbonate rocks of the lower Triassic of the Eastern Caucasus; 3)  $K_v$  and  $K_l$  are determined from the core of plain Dagestan and Stavropol, respectively (S.S. Itenberg, G.A. Shnurman, 1984); 4) points corresponding to the data obtained by M.A. Khasanov.

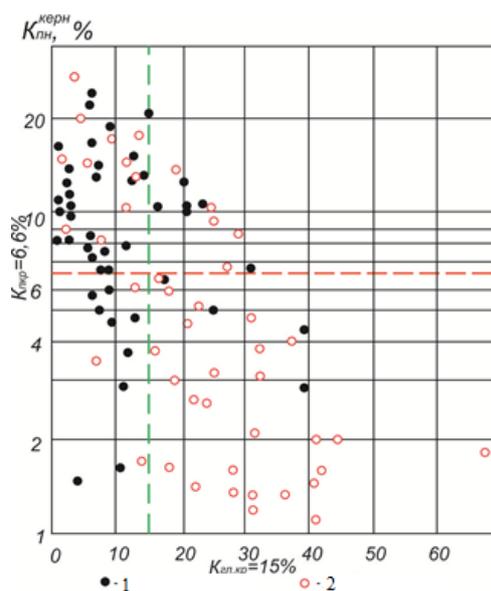


Рис. 2. Сопоставление величин пористости насыщения и объемной глинистости по керну (по пермо-триасовым отложениям Равнинного Дагестана). Условные обозначения: 1) Нефтекумские отложения; 2) Анизийские отложения /

Fig. 2. Comparison of the values of saturation porosity and clay volume by core (Perm-Triassic deposits of Plain Dagestan). Legends: 1) Neftekumsk sediments; 2) Aniziysk sediments

до 95,2% в зависимости от величины пористости (рис. 1), которая в свою очередь зависит от степени глинистости пород (рис. 2).

Наиболее важным и сложным вопросом в познании закономерностей размещения промышленных скоплений нефти и газа в разрезе пермо-триасового комплекса является изучение генезиса уже известных и возможных, еще не выявленных ловушек в нем – их форма, объем и типы, время формирования и заполнения углеводородами, а также рассредоточение в регионе.

Как известно, почти все выявленные в триасе Восточного Предкавказья залежи углеводородов связаны с небольшими локальными ловушками, геологическое строение которых и особенно их генезис, до настоящего времени не имеет однозначной трактовки. Обусловлено это не только своеобразным характером тектонического

развития территории Восточного Предкавказья в триасовое время, но также и сравнительно низкой степенью изученности этого комплекса.

Одни исследователи (Бурштар М. С. и др., 1972) считают, что основную роль в формировании локальных структур в пермо-триасе сыграли тектонические движения блоков фундамента, имевшие место в раннетриасовую, предсреднетриасовую и поздне-триасовую эпохи. С этими движениями связано широкое развитие многочисленных разрывных нарушений в пермо-триасовом комплексе. В результате складкообразовательных процессов образовались разрывно-блоковые структуры и складки с крутыми (до 60°) крыльями. Другие (Сократов Б. Г., Онищенко Б. А., 1976), отвергая блоко-глыбовую структуру, считают, что тектоника пермо-триасовых отложений определяется широким развитием линейных складок, характерных для областей умеренной складчатости. Третьи (Горкушин А. С. и др., 1974, Назаревич Б. П. и др., 1980) утверждают, что все локальные ловушки, в частности в карбонатных отложениях нефтекумской свиты, имеют рифогенное строение [Бурштар, Милешин, 1970].

Большинство же геологов (Гасангусейнов Г. Г., 1978, Стасенков В. В. и др., 1980, Полосин Б. А. и др., 1980. и др.) разделяют точку зрения, предполагающую эрозивно-останцевый характер происхождения локальных поднятий в карбонатной толще нефтекумской свиты Восточного Предкавказья, и генетически связанных с ними локальных поднятий в вышележащих среднетриасовых отложениях [Чепак и др., 1980; Шарафутдинов и др., 1978; Шнурман, Бирюкова, 1981].

Основным генетическим типом ловушек в разрезе пермо-триасового комплекса являются сложные стратиграфически экранированные ловушки, связанные с выступами или останцами трещиноватых и трещиновато-кавернозных известняков нефтекумской свиты.

Промышленная нефтегазоносность триасовых отложений приурочена к двум крупным структурным элементам: зоне Манычских прогибов и несколько меньшее их число приурочено к Прикумской свите поднятий. Запасы углеводородного сырья большей частью сконцентрированы в нижнетриасовой и среднетриасовой толщах триасовой системы. В каждой из названных толщ имеются нефтенасыщенные пласты-коллекторы, сохранность залежей в которых обеспечивается наличием мощных экранирующих толщ в разрезе.

В среднетриасовом комплексе таким пластом является пласт известняка, залегающий в подошве плавненской свиты (ладинский ярус), с которым связаны все известные в среднем триасе Восточного Предкавказья скопления нефти (Сухокумское, Восточно-Сухокумское, Солончаковое и др.). В нижнем триасе два таких объекта: один в култайской свите (оленекский ярус), а другой в нефтекумской (индский ярус). Сложены они также известняками, либо доломитами или доломитизированными известняками.

Залежи углеводородов в триасовых отложениях Восточного Предкавказья имеют довольно широкий диапазон по глубинам – от 3500 до 4800 метров, причем наибольшее их количество (63%) находится на глубинах свыше 4000 м, большая же часть выявленных запасов (68%) сосредоточена на глубинах до 4000 м.

Наряду с положительным влиянием различных факторов, определяющих закономерности формирования и размещения ловушек и залежей углеводородов в пермо-триасовом разрезе, их взаимодействие привело также и к отрицательным результатам, что определило степень перспективности или бесперспективности от-

дельных участков исследуемого района. Проявление главной фазы нефтеобразования в позднем триасе способствовало заполнению нефтью и газом всех ловушек в разрезе пермо-триасового комплекса, сформированных к этому времени. Наиболее же благоприятным взаимодействием рассмотренных факторов для формирования промышленных скоплений углеводородов оказалось для ловушек, связанных с трещиноватыми и трещиновато-кавернозными известняками нефтекумской свиты и образованных в позднем оленек-анизие.

Однако, активное проявление эрозионно-денудационных процессов на поверхности пермо-триасового комплекса в позднем триасе и ранней юре, привело к частичному или полному расформированию ловушек и залежей нефти в них. Этот фактор оказался главным в определении степени перспективности отдельных участков региона.

Разная глубина эрозии пермо-триасовых отложений в сводах крупных валлообразных поднятий – Ачикулакского, Величаевско-Максимокумского, Дадынского, предопределила и разную степень расформирования ловушек и залежей нефти в их пределах. В пределах Ачикулакского вала, занимающего самое высокое гипсометрическое положение в позднетриасовое время, эрозией были уничтожены ловушки, сформированные как в позднем оленеке – анизие, так и в позднем триасе.

Величаевско-Максимокумский вал занимал более низкое гипсометрическое положение, поэтому здесь ловушки, следовательно, и залежи нефти, связанные с известняками нефтекумской свиты, в позднем триасе – ранней юре претерпели частичное или полное расформирование. Ловушки в среднем триасе в сводовой части были полностью уничтожены. Возможные ловушки могли сохраниться лишь в бортовых зонах, на участках погружения отложений в сопредельные прогибы. В средней юре произошла повторная герметизация ловушек за счет накопления глинистых толщ пород, выполняющих роль покрышек. В связи с этим установленные и прогнозируемые здесь залежи нефти имеют, и будут иметь различную степень заполнения ловушек.

Западная и восточная части Дадынского вала в пределах изученной площади имеют различные условия сохранности ловушек в пермо-триасовом комплексе. В западной части вала (к западу от Арбалинской площади) ловушки подверглись расформированию в позднем триасе – ранней юре. Вновь сформированные здесь ловушки и залежи нефти в средней юре, расположенные на крыльях вала, являются вторичными и менее перспективными по степени их заполнения. В восточной части вала ловушки и залежи нефти не подвергались эрозии в позднем триасе и ранней юре, но здесь перспективы нефтеносности анизийских отложений являются сомнительными из-за их повышенной глинистости.

Благоприятная последовательность взаимодействия рассмотренных факторов (образование резервуаров – ловушек – проявление ГФН) могла привести также к формированию залежей нефти и газа в ловушках, связанных с трещиноватыми горизонтами карбонатных пород кизлярской, плавненской, закумской свит. Примеры таких залежей, приуроченных к плавненской свите, имеются в Равнинном Дагестане. Ловушки же в кизлярской свите, обладающие слабыми фильтрационно-емкостными свойствами вследствие повышенной глинистости карбонатных отложений, являются менее перспективными для поисков залежей нефти и газа по сравнению с ловушками в известняках нефтекумской свиты.

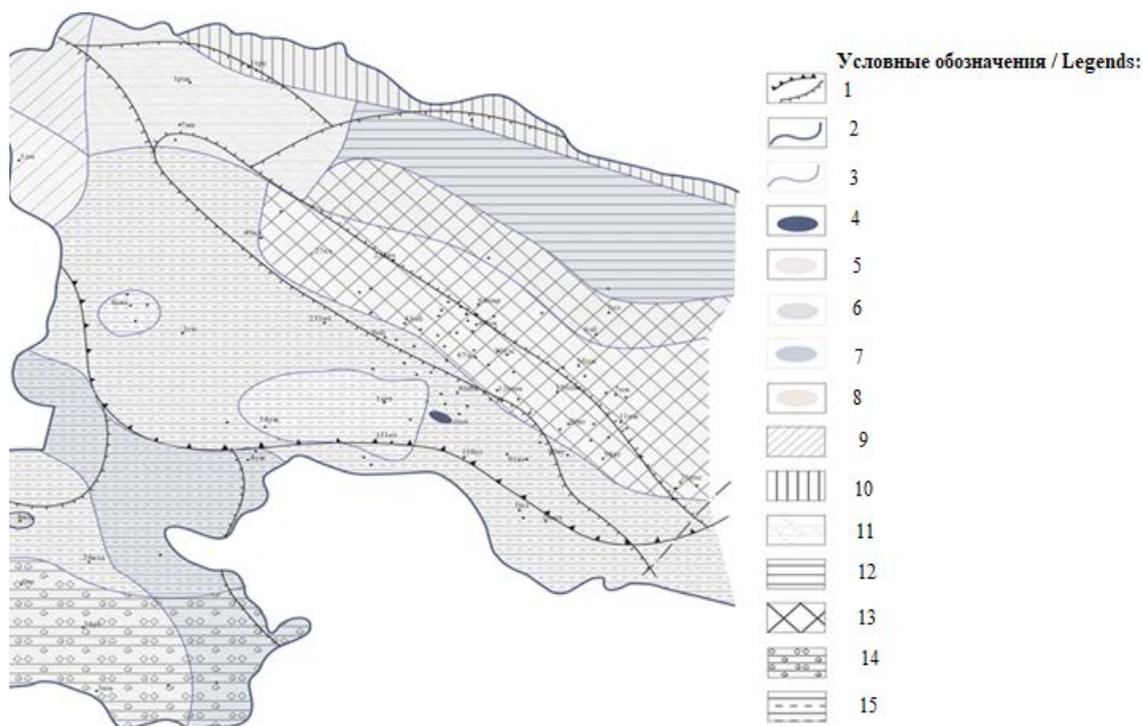


Рис. 3. Карта распространения резервуаров различных классов нижнетриасовых отложений Восточного Предкавказья. Условные обозначения: 1) границы тектонических элементов I и II порядков; 2) граница распространения нефтекумской свиты; 3) границы распространения классов коллекторов; 4) область отсутствия отложений нефтекумской свиты; 5) коллектор III класса; 6) коллектор IV класса; 7) зоны предполагаемого отсутствия коллекторов; 8) локальный природный резервуар III класса в области развития одиночных биогермных построек; 9) природный резервуар в области относительно глубоководного осадконакопления с проявлением вулканизма; 10) природный резервуар в относительно глубокой области открытого бассейна нормальной солености; 11) природный резервуар в области мелководного карбоната накопления с привнесом терригенных пород; 12) область мелководной карбонатной и глинистой седиментации в условиях гидродинамического режима; 13) природный резервуар в области массового развития биогермных построек и межрифтовых понижений; 14) природный резервуар в области мелководного осадконакопления с проявлениями вулканизма; 15) природный резервуар в области мелководного карбоната накопления (зернистые и органогенные известняки). /

Fig. 3. Map of the distribution of reservoirs of various classes of Lower Triassic sediments of the Eastern Ciscaucasia. Legends: 1) boundaries of tectonic elements of I and II orders; 2) boundary of distribution of the Neftekumsk formation; 3) boundaries of distribution of collector classes; 4) the area of the lack of Neftekumsk sediments suites; 5) class III collector; 6) class IV collector; 7) areas of presumed lack of collectors; 8) local natural reservoir of class III in the field of development of single biohermal construction; 9) natural reservoir in the area of relative deep-water sedimentation with the manifestation of volcanism; 10) a natural reservoir in a relatively deep area of an open pool of normal salinity; 11) natural reservoir in the area of shallow-water carbonation with the introduction of terrigenous soils; 12) the area of shallow water carbonate and clay sedimentation under hydrodynamic conditions; 13) natural reservoir in the area of mass development of biohermal construction and inter-reef depressions; 14) natural reservoir in the area of shallow sedimentation with manifestations of volcanism; 15) natural reservoir in the area of shallow water carbonation (granular and organogenic limestones)

Следует также учитывать то обстоятельство, что большая часть ловушек и залежей нефти в среднетриасовых отложениях претерпела частичное или полное расформирование в позднем триасе – ранней юре за счет эрозионно-денудационных процессов. Вторичная герметизация оставшихся ловушек произошла в средней юре.

Это обстоятельство также отрицательно сказалось на степени заполнения ловушек нефтью.

### Выводы

Руководствуясь общепринятой классификацией карбонатных коллекторов в изучаемом регионе, выявлены области распространения коллекторов III и IV классов, а также области предполагаемого отсутствия коллекторов (рис. 1).

Область спорадического распространения резервуара III класса отмечается на северном склоне Величаевско-Максимокумского вала и Таловской ступени (площади Зимняя Ставка, Величаевско-Колодезная, Безводненская и др.). Коллектор резервуара представлен светло-серыми и белыми трещиновато-кавернозными известняками. Емкостно-фильтрационные свойства резервуара в основном обусловлены вторичной пористостью известняков и доломитов. Среднее значение открытой пористости известняков – 3,25%, доломитов – 3,44%.

В районе Довсунского прогиба и северного склона Ачикулакского вала возможно развитие локальных резервуаров III класса, связанных с единичными органогенными постройками.

На севере и юге рассматриваемой территории были выделены зоны отсутствия коллекторов в отложениях нефтекумской свиты. В пределах северной зоны, приуроченной к Восточно-Манычскому прогибу, получили развитие единичные органогенные постройки, расположенные на границе с северной областью распространения резервуара IV класса.

Из комплексного анализа распределения головных петрофизических параметров и результатов испытания скважин видно, что большая часть территории занята породами с низкими емкостно-фильтрационными характеристиками. Водонасыщенные коллектора, в основном, расположены на юге территории, и лишь на юго-востоке получены притоки нефти из карбонатных коллекторов нефтекумской свиты. В области хемогенного (доломитового) карбонатонакопления продуктивными являются XI-XII пласты средней подсвиты, в области массового развития биогермных построек и межрифовых понижений продуктивными являются I-VI пласты нефтекумской свиты. В областях мелководного карбонатонакопления находятся водонасыщенные коллектора.

### Литература

1. Бурштар М. С., Милешина А. Г. Геология триасовых отложений Восточного Предкавказья. // Геология нефти и газа. – 1970. – № 10. – С. 25-27.
2. Вобликов Б. Г., Чумаченко И. А. Анализ стратиграфического распределения нефтегазоносности в отложениях нефтекумской свиты и прогноз зон нефтегазонакопления в пределах Восточного Предкавказья. // Материалы V региональной научно-технической конференции «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону». Часть 1. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2001. – С. 45.
3. Вобликов Б. Г., Стерленко З. В., Гридин В. А., Туманова Е. Ю., Чумаченко И. А. Условия формирования и закономерности распространения нефтекумского природного резервуара в пределах Центрального и Восточного Предкавказья. // Теория и практика добычи, транспорта и переработки газоконденсата. – Сборник научных трудов. Выпуск 1. – Астрахань. – 1999. – С. 39-45.
4. Вобликов Б. Г., Стерленко З. В., Туманова Е. Ю., Мельников С. А., Туманова Н. Ю., Хасанов М. А. Условия нефтегазоносности пермо-триасовых отложений Восточного Пред-

кавказья. // Материалы XXXIX научно-технической конференции по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ за 2009 год. Том I. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – 206 с.

5. Сосон М. Н., Борисенко З. Г., Плотников М. С. Подсчет и пересчет запасов нефти и растворенного газа Зимне-ставкинско-Правобережного (с Поварковским полем) и Пушкинского м-ний Ставропольского края. // СевКавНИПИнефть, Ставропольнефтегаз. Газы горючие и благородные, Нефть. – Пятигорск. – 1985.

6. Туманова Е. Ю., Гридин В. А., Стерленко З. В., Вобликов Б. Г., Чумаченко И. А. Исследования петрофизических параметров пород-коллекторов нефтекумской свиты Восточного Предкавказья. // Материалы XXIX научно-технической конференции по результатам научно-исслед. Работы проф.-препод. состава, аспирантов и студентов за 1998 г. Том 1. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 1999. – С. 38-39.

7. Хасанов М. А. Емкостно-фильтрационная модель пород-коллекторов нижнего триаса Восточного Предкавказья. // Каротажник. – 2011. – № 4 (202). – С. 12-19.

8. Хасанов М. А., Эльжаев А. С. Особенности емкостно-фильтрационной характеристики нижне-триасового природного резервуара Восточного Предкавказья. // Вестник Академии наук Чеченской Республики. – 2010. – № 1 (12). – С. 84-88.

9. Хасанов М. А., Эзирбаев Т. Б., Гацаева С. С. А., Эльжаев А. С. Геолого-геофизическая характеристика нижнетриасового природного резервуара Восточного Предкавказья. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа, коллективная монография по материалам VII Всероссийской научно-технической конференции. – 2017. – С. 181-190.

10. Чепак Г. Н., Полосин Б. А., Плотников М. С. и др. Коллекторские свойства пород триаса и верхнего мела Восточного Ставрополя. // Нефтегазовая геология и геофизика. – 1980. – № 12. – С. 6-9.

11. Шарафутдинов Ф. Г., Мирзоев Д. А., Гасанусейнов Г. Г. и др. Геология и нефтегазонасыщенность доюрских образований Восточного Предкавказья. // Институт геологии, Дагфиллиал АН СССР. – 1978. – № 2 (16). – 120 с.

12. Шнурман Г. А., Бирюкова О. В. Технология выделения и оценки сложных карбонатных коллекторов в пермотриасовых отложениях Ставропольского края, Дагестана и Южного Мангышлака, методами промысловой геофизики. // Руководящий документ (РД 39-4-544-81). – 1981. – 124 с.

13. Hasanov M. A., Aleksandrov B. L., Eljayev A. S., Ezirbaev T. B., Gatsaeva S. S. Forecasting cracked collectors on anticlinal type structures at late stage of exploration in oil and gas area. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, IPDME. – 2017. – No. 87. – Pp. 052008.

14. Ishiyama T., Ikawa H., Belaid K. AVO applications for porosity and fluid estimation of carbonate reservoirs offshore Abu Dhabi. // First Break. – 2010. – No. 28 (2).

15. Rogers S., Cosma C., Shiner P., Emsley S., Enescu N. VSP fracture imaging to bridge the well-to-seismic scale gap for a fractured carbonate reservoir. // First Break. – 2006. – No. 24 (5).

16. Ruchko K., Kurgansky V. M. The results of interpretation the data of electric and pulsed neutron-neutron logging methods for the study of low-resistivity reservoirs, example is terrigenous sediments of the Dnieper-Donets basin. // Conference Proceedings, 14th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, May 2015. – Pp. 1-5.

17. Waxman M. H., Smits L. J. M. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. // Soc. Pet. Eng. Journal. – June, 1968. – pp. 107-122.

18. Wanias HA., Soliman H. E. Permo-Triassic Qiseib Formation, Western Side of the Gulf of Suez, Egypt: A Link of Fluvial Facies with Sequence Stratigraphy. // Journal of Geology & Geophysics. – 2018. – Vol. 7. Issue 3. – pp. 1-8.

19. Vergés J., Almar Y., Poprawski Y., Drzewiecki P. Tectono-sedimentary evolution of Jurassic – Cretaceous diapiric structures: Miravete anticline, Maestrat Basin, Spain. // Basin Research. – April 2020.

20. Juan I. Soto, Joan Flinch, Gabor Tari. Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins, 1st Edition, Tectonics and Hydrocarbon Potential. // Elsevier. – 2017. – 632 p.

## References

1. Burshtar M. S., Mileschina A. G. Geology of the Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia. Geology of oil and gas. 1970. No. 10. pp. 25-27. (In Russ.)
2. Voblikov B. G., Chumachenko I. A. Analysis of the stratigraphic distribution of oil and gas in the deposits of the Neftekumskaya Formation and the forecast of oil and gas accumulation zones within the Eastern Ciscaucasia. Materials of the V regional scientific and technical conference “University science – to the North Caucasus region”. Part 1. Stavropol. SevKavSTU, 2001. p. 45. (In Russ.)
3. Voblikov B. G., Sterlenko Z. V., Gridin V. A., Tumanova E. Yu., Chumachenko I. A. Formation conditions and patterns of distribution of the Neftekumsky natural reservoir within the Central and Eastern Ciscaucasia. Theory and practice of production, transport and processing of gas condensate. Collection of scientific papers. Issue 1. Astrakhan. 1999. pp. 39-45. (In Russ.)
4. Voblikov B. G., Sterlenko Z. V., Tumanova E. Yu., Melnikov S. A., Tumanova N. Yu., Khasanov M. A. Oil and gas conditions of Permian-Triassic sediments of the Eastern Ciscaucasia. Materials of the XXXIX scientific and technical conference based on the results of the work of the faculty of SevKavSTU for 2009. Volume I. Natural and exact sciences. Technology. Stavropol: SevKavSTU. 2010. 206 p. (In Russ.)
5. Soson M. N., Borisenko Z. G., Plotnikov M. S. Calculation and recounting of oil and dissolved gas reserves of Zimnestavkinsk-Pravoberezhny (with Povarkovsky field) and Pushkarsky deposit of the Stavropol Territory. SevKavNIPIneft, Stavropolneftegaz. Combustible and noble gases, Oil. Pyatigorsk. 1985. (In Russ.)
6. Tumanova E. Yu., Gridin V. A., Sterlenko Z. V., Voblikov B. G., Chumachenko I. A. Studies of petrophysical parameters of reservoir rocks of the Neftekum Formation of the Eastern Ciscaucasia. Materials of the XXIX scientific and technical conference on the results of scientific research. The work of prof. composition, graduate students and students for 1998. Volume 1. Stavropol: Publishing House of SevKavSTU, 1999. pp. 38-39. (In Russ.)
7. Khasanov M. A. Capacitive-filtration model of reservoir rocks of the Lower Triassic of the Eastern Ciscaucasia. Logger. 2011. No. 4 (202). pp. 12-19. (In Russ.)
8. Khasanov M. A., Elzhaev A. S. Features of the capacitance-filtration characteristics of the Lower Triassic natural reservoir of the Eastern Ciscaucasia. Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic. 2010. No. 1 (12). pp. 84-88. (In Russ.)
9. Khasanov M. A., Ezirbaev TB, Gatsaeva S. S. A., Elzhaev A. S. Geological and geophysical characteristics of the Lower Triassic natural reservoir of the Eastern Ciscaucasia. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus, a collective monograph based on the materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference. 2017. pp. 181-190. (In Russ.)
10. Chepak G. N., Polosin B. A., Plotnikov M. S. et al. The reservoir properties of the Triassic and Upper Cretaceous rocks of the Eastern Stavropol Territory. Oil and gas geology and geophysics. 1980. No. 12. pp. 6-9. (In Russ.)
11. Sharafutdinov F. G., Mirzoev D. A., Gasanuseynov G. G. et al. Geology and oil and gas potential of pre-Jurassic formations of the Eastern Ciscaucasia. Institute of Geology, Dagestan of the USSR Academy of Sciences. 1978. No. 2 (16). 120 p. (In Russ.)
12. Shnurman GA, Biryukova O. V. Technology for the identification and evaluation of complex carbonate reservoirs in the Permian-Triassic deposits of the Stavropol Territory, Dagestan and Southern Mangyshlak, by methods of field geophysics. Guiding document (RD 39-4-544-81). 1981. 124 p. (In Russ.)

13. Hasanov M. A., Aleksandrov B. L., Eljayev A. S., Ezirbaev T. B., Gatsaeva S. S. Forecasting cracked collectors on anticlinal type structures at late stage of exploration in oil and gas area. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, IPDME. 2017. No. 87. pp. 052008.

14. Ishiyama T., Ikawa H., Belaid K. AVO applications for porosity and fluid estimation of carbonate reservoirs offshore Abu Dhabi. First Break. 2010. No. 28 (2).

15. Rogers S., Cosma C., Shiner P., Emsley S., Enescu N. VSP fracture imaging to bridge the well-to-seismic scale gap for a fractured carbonate reservoir. First Break. 2006. No. 24 (5).

16. Ruchko K., Kurgansky V.M. The results of interpretation the data of electric and pulsed neutron-neutron logging methods for the study of low-resistivity reservoirs, example is terrigenous sediments of the Dnieper-Donets basin. Conference Proceedings, 14th EAGE International Conference on Geoinformatics. Theoretical and Applied Aspects, May 2015. pp. 1-5.

17. Waxman M.H., Smits L.J. M. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. Soc. Pet. Eng. Journal. June, 1968. pp. 107-122.

18. Wanas HA., Soliman HE. Permo-Triassic Qiseib Formation, Western Side of the Gulf of Suez, Egypt: A Link of Fluvial Facies with Sequence Stratigraphy. Journal of Geology & Geophysics. Vol. 7. Issue 3, 2018. pp. 1-8.

19. Vergés J., Almar Y., Poprawski Y., Drzewiecki P. Tectono-sedimentary evolution of Jurassic – Cretaceous diapiric structures: Miravete anticline, Maestrat Basin, Spain. Basin Research. April 2020.

20. Juan I. Soto, Joan Flinch, Gabor Tari. Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins, 1st Edition, Tectonics and Hydrocarbon Potential. // Elsevier, – 2017. P. 632

УДК 697.941:661.92

DOI: [10.46698/VNC.2020.47.65.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.47.65.009)

Оригинальная статья

## Фиторемедиация токсичности воздуха автомобильных дорог

С. А. Бекузарова<sup>1,2</sup>, Д. И. Тебиева<sup>1</sup>, А. Д. Бекмурзов<sup>1</sup>,  
Л. А. Кебалова<sup>1</sup>, К. В. Корбесова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северо-Осетинский Государственный Университет им. К. Л. Хетагурова, Россия, 362025, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46, e-mail: bekos37@mail.ru;

<sup>2</sup>Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 25.01.2020, доработана: 05.04.2020, одобрена в печать: 06.04.2020

**Резюме: Актуальность работы.** Атмосферный воздух – главный компонент окружающей среды, представляющий собой смесь газов атмосферы и вредных для живых организмов элементов, получивших распространение под влиянием выхлопных газов автомобилей. Актуальной проблемой охраны окружающей среды являются, прежде всего, исследования, направленные на улучшение воздуха автомобильных дорог, особенно на Северном Кавказе, где сосредоточены курорты и базы отдыха. Основными источниками поступления загрязняющих веществ в атмосферу являются промышленные предприятия и автотранспорт. Ежегодное увеличение количества автотранспорта вызывает тревогу в связи с загрязнением атмосферы вдоль дорожного полотна, влияющего на здоровье человека. **Целью** работы было расширение ассортимента растений на обочинах автодорог, которые обладают способностью сорбировать токсиканты воздуха. **Методы исследования.** На обочинах автодорог, высевались смеси из семян растений, способных максимально сорбировать химические вещества из воздуха (пасленовые, крестоцветные, сложноцветные, бобовые и злаковые). Пасленовые растения обладают способностью поглощать соединения кадмия, бобовые и злаковые (маревые) сорбируют тяжелые металлы, крестоцветные – улавливают из воздуха мышьяк и ртуть. Затем эти травы оставляли на несколько лет для самообновления. **Результаты.** Проведенный анализ сорбционной способности аккумулирующих тяжелые металлы растений, позволил выделить фитоиндикаторы, способные снижать токсичность воздуха и почвы. Подобранный состав фитоценоза позволяет значительно снизить токсичность воздуха автомобильных дорог. Представителей этих видов семейств не скашивают, оставляя их для возобновления роста с помощью семян, осыпающихся в начале июня. Преимущество должны иметь растения из семейства пасленовых, сорбирующие больше кадмия, а растения с опушенными листьями больше поглощают мышьяк и ртуть. Результаты проведенных работ показали, что с целью снижения содержания вредных химических веществ вдоль автомагистралей рационально высевать растения с гипераккумулирующими свойствами из семейства пасленовых, крестоцветных, астровых, сложноцветных, злаковых и бобовых в комплексе.

**Ключевые слова:** токсиканты, атмосферный воздух, гипераккумуляторы, фитоценоз, автодороги.

**Для цитирования:** Бекузарова С. А., Тебиева Д. И., Бекмурзов А. Д., Кебалова Л. А., Корбесова К. В. Фиторемедиация токсичности воздуха автомобильных дорог. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 127-135. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009.

DOI: [10.46698/VNC.2020.47.65.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.47.65.009)

Original paper

## Phytoremediation of air toxicity of roads

S. A. Bekuzarova<sup>1,2</sup>, D. I. Tebieva<sup>1</sup>, A. D. Bekmurzov<sup>1</sup>,  
L. A. Kebalova<sup>1</sup>, K. V. Korbesova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>North Ossetian State University after K. L. Khetagurov, 44-46 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation, e-mail: bekos37@mail.ru

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

Received: 25.01.2020, revised: 05.04.2020, accepted: 06.04.2020

**Abstract: Relevance.** An urgent problem of environmental protection is, first of all, research aimed at improving the air of roads, especially in the North Caucasus, where resorts and recreation centers are concentrated. The main sources of air pollution are industrial enterprises and motor vehicles. The annual increase in vehicles is alarming for air pollution along the roadway, affecting human health. In order to expand the assortment of plants on highways with a hyper accumulative ability to sorb air toxicants, plant seeds from families of nightshade, cruciferous, asteraceae, legumes and cereals were sown on strips 3-4 m along the highway. **Aim.** Expanding the assortment of plants on roadsides that have the ability to absorb air toxicants. **Methods.** On the roadsides, mixtures of plant seeds were sown that were capable of absorbing chemicals from the air (nightshade, cruciferous, asteraceae, legumes and cereals). Solanaceous plants have the ability to absorb cadmium compounds, legumes and cereals (haze) adsorb heavy metals, cruciferous ones capture arsenic and mercury from the air. Then these herbs were left for several years for self-renewal. **Results.** The analysis of the sorption ability of plants accumulating heavy metals has been carried out; phytoindicators have been identified that can reduce the toxicity of air and soil. The selected composition of the phytocenosis can significantly reduce the air toxicity of roads. Representatives of these species of families are not mowed, leaving them to resume growth using seeds that crumble in early June. Plants of the nightshade family, which sorb more cadmium, should have an advantage, while plants with lowered leaves absorb arsenic and mercury more. The results of the work showed that in order to reduce chemicals along highways, sow plants with hyperaccumulative properties from the family of nightshade, cruciferous, aster, asteraceae, cereals and legumes in the complex.

**Key words:** toxicants, atmospheric air, hyperaccumulators, phytocenosis, highways.

**For citation:** Bekuzarova S. A., Tebieva D. I., Bekmurzov A. D., Kebalova L. A., Korbesova K. V. Phytoremediation of air toxicity of roads. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (2): 127-135. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009.

### Введение

Согласно данным Всемирной организации охраны здоровья за последние годы ежегодно в мире умирает около 4 млн человек по причине влияния загрязненности воздуха, как в помещении, так и в атмосфере. Доказано, что загрязнение воздуха является главной причиной заболеваемости онкологией [Науменко и др., 2015; Хучунаев и др., 2019].

По данным Росприроднадзора по республике Северная Осетия-Алания общее количество загрязняющих веществ, поступающее в атмосферный воздух от автотранспорта, составило в среднем, за последние три года более 7 тыс. тонн, причем

этот показатель ежегодно возрастает. Следовательно, количество выбросов в динамике значительно возрастает.

К выбросам относят: кальция оксид, неорганические соединения свинца, аммиак, хлористый водород, серную кислоту, сероводород, метан, ксилол, неорганическую пыль (двуокись кремния) и другие вредные вещества для живых организмов [Федеральный закон..., 2002].

Главный химический загрязнитель атмосферы – сернистый газ, выделяющийся при сжигании каменного угля, сланцев, нефти, при выплавке железа, меди, производстве серной кислоты и др. Сернистый газ служит причиной выпадения кислотных дождей. Под воздействием интенсивного солнечного излучения химические вещества, выбрасываемые в атмосферу промышленными предприятиями и транспортом, могут вступить в реакции друг с другом, образуя высокотоксичные соединения. Такой вид смога получил название – фотохимического [Безуглая, Смирненко, 2002].

В некоторых местах Республики отмечены высокие колебания кадмия (5-10 мг/кг сухой массы), что значительно превышает предельно допустимые концентрации. Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха осуществляется РОСПРИРОДО-НАДЗОРОМ по РСО-АЛАНИЯ и Гидрометцентром на 4-х стационарных и 6-ти подвижных постах наблюдения, которые отмечают 14 веществ, загрязняющих воздух. По данным этих служб среднегодовой индекс загрязнения составляет  $P_a$  – более 8 [Гигиенические нормативы, 2018].

Загрязнители воздуха являются причиной образования озоновых дыр в атмосфере. С понижением содержания озона в верхних слоях атмосферы медики связывают рост количества онкологических заболеваний кожи [ГОСТ 32965-2014, 2014; Об утвержденном методе..., 2017].

В последние годы происходит некоторое изменение баланса азота в атмосфере за счет хозяйственной деятельности людей, проявляющееся во включении атмосферного азота в сложные химические соединения при производстве азотных удобрений. Уменьшается поступление его в атмосферу из-за нарушения почвообразовательных процессов на значительных территориях. Уменьшение поступления кислорода в атмосферу происходит за счет сокращения площадей лесов, степей, деградации сенокосов и пастбищ [Куриленко, Осмоловская, 2018; *Thlaspi caerulescens subspecies...*, 2018; Бекузаров и др., 2018]. Об этом свидетельствуют работы и зарубежных ученых [Brook, 2007; Yin-Ming Li et al., 2018; Carreras, 2006; Hadden, 2012; Lingard, 2006; Berkowich, 2016; Vlek, Michon, 1992].

Следовательно, для снижения токсичности воздуха необходимы растительные организмы, обладающие высокой сорбционной способностью поглощать вредные вещества в процессе фотосинтеза.

В современных научных исследованиях зарубежных стран говорится об очистке воздуха с помощью растений, которые своей корневой системой извлекают тяжелые металлы из почвы и надземными органами из воздуха [Sozaeva, 2018].

Однако в известном способе продуктивность растений невысокая, низкие темпы роста, неполное поглощение вредных веществ воздуха, низкая ограниченность используемого растения, что с помощью растений снижается количество токсических веществ почвы.

Это растения однолетних бобовых трав, поглощающие тяжелые металлы с помощью корневой системы. При этом используют биопрепарат для интенсивности

роста после укоса срезаемых растений [Борисюк, 2013; Berkowicz, 2016]. Используются растения одного семейства бобовых трав, которые образуют небольшую надземную биомассу, что ограничивает возможность поглощать токсиканты из воздуха.

Известно также, где в качестве растений – ремедиантов воздуха используются деревья ясеня, тополя, березы и вяза [Русакова, 2014]. Однако наличие деревьев на автодорогах, накапливающих в течение ряда лет огромное количество кадмия и других вредных химических веществ, загрязняющих автодорожные трассы и недостаточно очищающих атмосферу, не целесообразно.

Наиболее значимо предложение авторов, которые считают, что в течение вегетации на небольших участках необходимо выделять растения, максимально сорбирующие тяжелые металлы, выбирая индикаторные виды [Вольнов, 2012].

Однако в данной технологии можно отметить следующие недостатки:

- определяют аккумулирующие способности образцов в пять этапов, и для определения токсикантов в растениях, охватывают только часть площади, где выделяют аккумулирующие способности растений;

- проводят анализы только на естественных и доминирующих растениях;

- не решается вопрос по снижению вредных веществ в воздухе, поскольку из произрастающих растений проводят анализы и выделяют растения с небольшой способностью аккумулировать токсиканты воздуха (клевер луговой, мать-и-мачеха, одуванчик).

С целью расширения ассортимента растений на автодорогах, обладающих гипераккумулирующей способностью сорбировать токсиканты воздуха, проводили следующие исследования:

### Методы и объекты исследований

На обочинах автодорог, шириной полос не менее 3-4 метров, высевали смесь семян растений, обладающих способностью максимально сорбировать химические вещества из воздуха, в частности, семейства: пасленовые – 40-50%, крестоцветные 20-30%, астровые (сложноцветные) – 20-25%, маревые и бобовые по 10–15%, при этом, количество видов растений определяется нормой высева культуры на гектар. На участке автотрассы Владикавказ – Ростов, протяженностью 100 км на обочинах дорог подготовили полосы шириной 3 метра. После обработки почвы и прикапывания полос, высевали смесь мелкосеменных трав: никандру в количестве 40% от нормы высева на гектар, то есть 7 кг/га, рыжик озимый 3 кг/га, цикорий 4 кг/га, пайзу и клевер по 2 кг/га. Высеянные травы оставляли в течение 2-3 лет для самообновления.

### Результаты исследований

Атмосферный воздух в последние десятилетия интенсивно загрязняется путем привнесения в него или образования в нём загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих нормативы качества или уровень естественного содержания, оказывающих вредное воздействие на организмы. Вредные вещества, выбрасываемые в воздух, составляют миллионы тонн и превышают пределы способности атмосферы к самоочищению. Вредные вещества легко проникают в ткани растений через устьица и могут непосредственно влиять на обмен веществ в клетках. Под

действием загрязняющих элементов происходит подавление фотосинтеза, нарушение водообмена, многих биохимических процессов, снижение транспирации, общее угнетение роста и развития. Это приводит к изменению окраски листьев, некрозу, опаданию листьев, изменению формы роста и другим отклонениям. Самыми опасными токсикантами являются оксид кадмия, бенз (а) пирен, хлор, ртуть, мышьяк и другие химические вещества, общее количество которых составляет 200-400 наименований. К числу крупнейших источников загрязнения атмосферного воздуха относится автотранспорт, многочисленные выбросы которого обладают токсическим действием. Значительной сорбционной способностью извлекать соединения кадмия из воздуха обладают растения семейства пасленовых, в частности, никандра физалисовидная (*Nicandra physaloides* L.), высота которой достигает более 1 метра. Это однолетнее растение произрастает повсеместно вдоль дорог, на пустырях, накапливая наибольшее количество кадмия в конце вегетации. Посевы таких трав значительно очищают воздух не только от соединений кадмия (из почвы более 70%, из воздуха более 30%), но и других вредных веществ. Учитывая, указанные выше, свойства никандры, её количество превалирует по отношению к другим подобранным видам для фиторемедиации (40-50%).

Из семейства крестоцветных (капустных) высевают рыжик озимый (*camelina silvestris* Waller), высотой более 70 см, который характеризуется большим количеством листьев. Стебли и листья опушенные, за счет чего из воздуха поглощается большее количество вредных веществ, в том числе соединения ртути и мышьяка, что не присуще другим семействам растений, произрастающих на обочинах дорог.

Семейство астровых (сложноцветные) представлено цикорием обыкновенным (*cichorium intybus* L.), широко распространенным в естественном фитоценозе придорожных полос. Высота растения более 1,5 м, мощный стержневой корень глубоко проникает в почву, листья крупные. Обладает высокими аккумуляционными свойствами, поглощая ряд вредных веществ из воздуха (углеводороды, оксиды углерода, соединения хлора, выхлопные газы и др.)

Бобовые травы (семейство бобовых) представляют однолетние виды клевера – *Trifolium* (*incarnatum*, *alexandrinum*, *resupinatum*), высеваемые в летний период и к весне достигающие максимального развития; эти травы хорошо облиственны и способны сорбировать значительное количество токсичных элементов.

Представителей этих видов не скашивают, оставляя их для возобновления роста с помощью семян, осыпавшихся в начале июня.

Семейство (мятликовые) маревых представлено видом пайза (ежовник хлебный – *Echinochloa frumentata*, кормовая культура). В период созревания достигает высоты более 1 м, и в количестве 10-15% от общего объема травостоя дополняет разнообразие трав аккумуляторов загрязнений воздуха, поглощая такие элементы и вещества, как железо, кобальт, диоксиды магния и другие. Полученные результаты свидетельствуют, что при комплексном подборе растений – аккумуляторов токсикантов воздух автодорог значительно очищается до предельно допустимых концентраций (табл. 1)

Кроме указанных токсикантов в таблице, за счет аккумуляющей способности растений, в воздухе снизились показатели оксидов углерода, серы, хлорбромидов, оксидов азота, углеводородов топлива.

Таблица 1. / Table 1.

Снижение содержания токсикантов в воздухе автодорог (по результатам исследования) /  
 Reducing the content of toxicants in the air of roads (based on the research findings)

Токсикант / Toxicant	Содержание в воздухе автодорог до начала опыта / Content in the air of roads before the experiment started	Никандра + рьжик + цикорий + пайза, клевер по 10-15% / Nisandra + saffron + chicory + barnyard grass, clover 10-15%	Никандра + рьжик по 30% / Nisandra + saffron 30%	Пайза + клевер по 30% / barnyard grass + clover 30%	Никандра 40% + рьжик 20% / Nisandra 40% + saffron 20%	Никандра 40%+пайза + клевер 30% / Nisandra 40%+ barnyard grass + clover 30%	Предлагаемое / Offered	ПДК, мг/м <sup>3</sup> / MPC, mg/m <sup>3</sup>
Кадмия оксид / Cadmium oxide	0,9	0,4	0,035	0,39	0,28	0,19	0,001	0,0003
Бенз (а) пирен / Benz (a) pyrene	0,18	0,15	0,14	0,15	0,11	0,09	0,04	0,1 м/100м <sup>3</sup> / 0,1 mg/100 m <sup>3</sup>
Ртуть / Mercury	0,03	0,2	0,12	0,24	0,09	0,06	0,002	0,0003
Свинец / Lead	0,15	0,13	0,14	0,16	0,09	0,06	0,004	0,0003
Меди оксид / Copper oxide	0,5	3,5	1,22	0,36	0,031	0,03	0,002	0,002

## Заключение

Комплексный подбор растений, обладающих аккумулярующей способностью из семейства пасленовых, астровых (сложноцветных), маревых подобранных по их сорбционным свойствам, снижает количество токсикантов в воздухе автодорог, загрязненных выше предельно допустимых концентраций. Следовательно, вдоль автотрасс для снижения токсических элементов необходимо высевать растения с гипераккумуляторными способностями из семейства пасленовых, крестоцветных, астровых, сложноцветных, злаковых и бобовых в комплексе.

## Литература

1. Безуглая Э.Ю. Смиренко И.В. Проблемы загрязнения воздуха. Крупнейшие города России. Загрязнение воздуха городов. – СПб. – 2002. – С. 31-48.
2. Бекузарова С.А., Бушуева В.И., Картыжева Л.Е. и др. Способ ремедиации и мелиорации почв. // Патент №2665073, опубликован 28.08.2018. Бюл. №25, МПК А01В79/02, В09С1/00.
3. Борисюк, Н.В. Автомобильно-дорожный комплекс в системе городской экологии. Чем грозят горожанину мелкодисперсные взвешенные частицы, попадающие в воздух над дорогами и магистралями. / Н.В. Борисюк, С.М. Дмитриев. // Научно-популярный журнал «Экология и жизнь». – 2013. – №1. – С. 63-68.
4. Вольнов, А.С. Методы оценки и пути снижения уровня экологической опасности автотранспортных предприятий. / К.В. Щурин, Л.Н. Третьяк, Е.М. Герасимов, А.С. Вольнов. // Экология и промышленность России. – 2012. – №2. – С. 44-46.
5. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.6.3492-17. Приложение. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. – М. – 2018.
6. ГОСТ 32965-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока. – М. – 2014.
7. Куриленко В.В., Осмоловская Н.Г. Фиторемедиационный способ очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами. // Патент на изобретение №2665073, опубликован 28.08.2018. Бюл. №25. МПК А01В79/02.
8. Науменко О.А. Соколова О.Я., Бибарцева Е.В. Проблемы экологии Южного Урала. // Вестник Оренбургского Государственного Университет. – 2015. – №10 (85). – С. 225-228.
9. Об утверждении методов расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе / Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 06.06.2017 №273. – М.: Минюст РФ, 2017. – С. 80.
10. Русакова, Т.И. Исследование динамики загрязнения атмосферного воздуха на улицах при выбросах автотранспорта / Т.И. Русакова, Н.Н. Беляев, В.И. Карплюк // Вестник Днепропетровского университета. Серия «Механака». – 2014. – №5. Вып. 18. Т. 1. – С. 127-138.
11. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» №7-ФЗ от 10.01.2002
12. Хучунаев Б.М., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Оценка антропогенного воздействия на состояние атмосферного воздуха в районе строительства Малой ГЭС (пос. Верхняя Саниба). // Сборник УРГТК. – 2019. – С. 118-124.
13. Berkowicz, R. Modelling traffic pollution in streets [Электронный ресурс] / R. Berkowicz [et al.]. National Environmental Research Institute, Roskilde, Denmark. Режим доступа: [http://www2.dmu.dk/1\\_viden/2\\_Miljoetilstand/3\\_luft/4\\_spredningsmodeller/5\\_OSP\\_M/5\\_description/ModellingTrafficPollution\\_report.pdf](http://www2.dmu.dk/1_viden/2_Miljoetilstand/3_luft/4_spredningsmodeller/5_OSP_M/5_description/ModellingTrafficPollution_report.pdf) – 20.09.2016.
14. Brook J.R. Investigation of the motor vehicle exhaust contribution to primary fine particle organic carbon in urban air. / J.R. Brook, L. Graham, J.P. Charland, Y. Cheng, X. Fan, G. Lu,

S. M. Li, C. Lillyman, P. MacDonald, G. Caravaggio, J.A. MacPhee. // *Atmos, Environ.* – 2007. – Vol. 41. No. 1. – Pp. 119-135.

15. Carreras H.A. In situ monitoring of urban air in Cordoba, Argentina using the Tradescantia-micronucleus (Trad-MCN) bioassay. / H.A. Carreras, M.L. Pignata, P.H. N. Saldiva. // *Atmos, Environ.* – 2006. – Vol. 40. No. 40. – Pp. 7824-7830.

16. Hadden E.J. Beautiful no-mow yards 50 amazing lawn alternative / E.J. Hadden. – London: Timber press, 2012. – 237 p.

17. Lingard J.J. N. Observations of urban airborne particle number concentrations during rush-hour conditions: analysis of the number based size distributions and modal parameters. // J.J. N. Lingard, E.L. Agus, D.T. Young, G.E. Andrews, A.S. J. Tomlin. // *Environ Monit.* – 2006. – Vol. 8. No. 12. – Pp. 1203-1218.

18. Sozaeva L.T. Evaluation of Emission of Pollutants in the Atmosphere Produced by Heating Enterprises of Nalchik Town. *Materials Science Forum.* October 2018. Vol. 931. Pp. 1047-1051.

19. Vlek S., Michon J. Why we should and how we could decrease the use of motor vehicles in the near future. *IATSS Research.* – 1992. – Vol. 15. No. 2. – Pp. 82-93.

20. Yin-Ming Li, Rufus L., Chaney, Roger D. Reeves, J. Scott Angle, Alan J.M. Baker. *Thlaspi caerulescens* subspecies for cadmium and zinc recovery. Patent US 7049492 B1. Published 20.06.2018).

## References

1. Bezuglaya E. Yu. Smirenko I. V. Air pollution problems. The largest cities in Russia. Air pollution in cities. Saint Petersburg. 2002. pp. 31-48. (In Russ.)

2. Bekuzarova S.A., Bushueva V.I., Kartyzheva L.E. et al. The method of remediation and land reclamation. Patent No. 2665073, published on 28.08.2018. Bul. No. 25, MPK A01B79/02, B09C1/00. (In Russ.)

3. Borisyuk, N. V. The road complex in the urban ecology system. What threatens the city dweller the finely dispersed suspended particles falling into the air over roads and highways. In: Popular science magazine “Ecology and Life”. 2013. No. 1. pp. 63-68. (In Russ.)

4. Vol'nov, A. S. Assessment methods and ways to reduce the level of environmental hazard of road transport enterprises. In: Ecology and industry of Russia. 2012. No. 2. pp. 44-46. (In Russ.)

5. Hygienic standards. GN 2.1.6.3492-17. Appendix. Maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the air of urban and rural settlements. Moscow. 2018. (In Russ.)

6. GOST 32965-2014. General automobile roads. Accounting methods for traffic intensity. Moscow. 2014. (In Russ.)

7. Kurilenko V.V., Osmolovskaya N.G. Phytoremediation method for cleaning soils contaminated with heavy metals. Patent for invention No. 2665073, published on 28.08.2018. Bull. No. 25. A01B79/02. (In Russ.)

8. Naumenko O.A. Sokolova O. Ya., Bibartseva E.V. Ecological problems of the Southern Urals. *Bulletin of the Orenburg State University.* 2015. No. 10 (85). pp. 225-228. (In Russ.)

9. On approval of calculation methods for emissions dispersion of harmful (polluting) substances in the air. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated 06.06.2017 No. 273. Moscow. Ministry of Justice of the Russian Federation, 2017. pp. 80. (In Russ.)

10. Rusakova, T. I., Belyaev N. N, Karplyuk V.I. Investigation of the dynamics of atmospheric air pollution in the streets with vehicle emissions. *Bulletin of the Dnepropetrovsk University. Series “Mechanika”.* 2014. No. 5. Issue. 18. Vol. 1. pp. 127-138. (In Russ.)

11. Federal Law “On Environmental Protection” No. 7-FZ under date of 10.01.2002 (In Russ.)

12. Khuchunaev B.M., Kesheva L.A., Teunova N.V. Assessment of anthropogenic impact on the state of atmospheric air in the construction area of the Small Hydroelectric Power Station (Verkhnyaya Saniba settlement). Collection of URGTK. 2019. pp. 118-124. (In Russ.)
13. Berkowicz, R. Modelling traffic pollution in streets. National Environmental Research Institute, Roskilde, Denmark. Link: [http://www2.dmu.dk/1\\_viden/2\\_Miljoetilstand/3\\_luft/4\\_spredningsmodeller/5\\_OSPM/5\\_description/ModellingTrafficPollution\\_report.pdf](http://www2.dmu.dk/1_viden/2_Miljoetilstand/3_luft/4_spredningsmodeller/5_OSPM/5_description/ModellingTrafficPollution_report.pdf) – 20.09.2016.
14. Brook J.R., Graham L., Charland J.P., Cheng Y., Fan X., Lu G., Li S.M., Lillyman C., MacDonald P., Caravaggio G., MacPhee J.A. Investigation of the motor vehicle exhaust contribution to primary fine particle organic carbon in urban air. *Atmos, Environ.* 2007. Vol. 41. No. 1. pp. 119-135.
15. Carreras H.A., Pignata M.L., Saldiva P.H. N. In situ monitoring of urban air in Cordoba, Argentina using the Tradescantia-micronucleus (Trad-MCN) bioassay. *Atmos, Environ.* 2006. Vol. 40. No. 40. pp. 7824-7830.
16. Hadden E.J. Beautiful no-mow yards 50 amazing lawn alternative. London, Timber press, 2012. 237 p.
17. Lingard J.J. N., Agus E.L., Young D.T., Andrews G.E., Tomlin A.S. J Observations of urban airborne particle number concentrations during rush-hour conditions: analysis of the number based size distributions and modal parameters. *Envirion Monit.* 2006. Vol. 8. No. 12. pp. 1203-1218.
18. Sozaeva L. T. Evaluation of Emission of Pollutants in the Atmosphere Produced by Heating Enterprises of Nalchik Town. *Materials Science Forum.* October 2018. Vol. 931. Pp. 1047-1051.
19. Vlek S., Michon J. Why we should and how we could decrease the use of motor vehicles in the near future. *IATSS Research.* 1992. Vol. 15. No. 2. pp. 82-93.
20. Yin-Ming Li, Rufus L., Chaney, Roger D. Reeves, J. Scott Angle, Alan J.M. Baker. *Thlaspi caerulescens* subspecies for cadmium and zinc recovery. Patent US 7049492 B1. (Published 20.06.2018).

УДК 628.16.065.2

DOI: [10.46698/VNC.2020.22.93.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.22.93.010)

Оригинальная статья

## Применение технологии магнитно-реагентного осветления питьевой воды для интенсификации процессов водоподготовки

И.А. Голубев<sup>1</sup>, И.К. Супрун<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-технологический комплекс «Новые технологии и материалы» Национальный исследовательский университет ФГАОУ ВО «СПбПУ» кафедра геоэкологии, Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 29, к. 11;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: [www.igor\\_suprun@mail.ru](mailto:www.igor_suprun@mail.ru)

Статья поступила: 06.03.2020, доработана: 23.04.2020, одобрена в печать: 30.04.2020

**Резюме: Актуальность работы.** Одной из актуальных задач, связанных с улучшением здоровья населения, является возможность потребления воды, по показателям качества, соответствующей нормативам на питьевую воду. Вместе с тем, по данным ВОЗ только 1% воды из источников питьевого и рыбохозяйственного назначения на Земле пригоден для использования без предварительной подготовки. Во всех остальных случаях очистка воды, включающая её обеззараживание, просто необходима. В зависимости от физико-химического состава воды и её микробиологических загрязнений выбирается та или иная технология водоподготовки. **Цель работы.** В этой связи, на объектах водоподготовки всё более необходимым является включение в технологическую схему новых инновационных решений, которые не предусматривают полную реконструкцию существующих систем, а позволяют эффективно модернизировать уже имеющиеся. Одним из наиболее перспективных решений в этом направлении могло бы явиться применение методов обработки воды магнитно-реагентным способом. **Методы исследования.** Предложена технология магнитно-реагентной обработки воды, позволяющая интенсифицировать этап реагентного осветления, без существенных затрат на реконструкцию объекта. Опытные испытания на станции водоподготовки позволили установить, что магнитная обработка увеличивает скорость коагуляции взвесей, снижает требуемое время пребывания воды в осветлителе, сокращает расход реагентов на 25-30%. **Результаты работы.** В статье рассмотрена основная проблема классической системы водоподготовки, связанная с большим расходом реагентов и необходимостью систематического подбора оптимальной дозировки под изменяющиеся параметры среды. Показано, что предлагаемая технология может рассматриваться как в качестве модернизации существующих станций водоподготовки работающих по типовой схеме, так и при проектировании новых объектов. Вне зависимости от сложности применяемых для очистки поверхностных вод технологий в начальной стадии очистки, как правило, используется метод отстаивания, осуществляемый путем введения в воду коагулирующих реагентов для формирования флокул, в которые входят извлекаемые из воды загрязнения. Несмотря на высокую эффективность, применение данного метода сопряжено, как с расходом дорогостоящих реагентов, так и с необходимостью осуществления постоянного контроля за их дозировками, что объясняется непрерывными изменениями показателей качества поверхностных вод по сезонам года.

**Ключевые слова:** очистка воды, магнитная обработка, реагентное осветление, сокращение расхода реагентов, водоподготовка.

**Для цитирования:** Голубев И.А., Супрун И.К. Применение технологии магнитно-реагентного осветления питьевой воды для интенсификации процессов водоподготовки. *Геология и Геофизика Юга России*. 2020. 10(2): 136-146. DOI: [10.46698/VNC.2020.22.93.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.22.93.010).

DOI: [10.46698/VNC.2020.22.93.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.22.93.010)

Original paper

# The use of magnetic reagent clarification of drinking water to intensify water treatment processes

I.A. Golubev <sup>1</sup>, I.K. Suprun <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific and technological complex “New technologies and materials” National Research University FGAOU VO “SPbPU”, 29, к. 11, Polytechnic str., St Petersburg 195220, Russian Federation;

<sup>2</sup>St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russian Federation, e-mail: [www.igor\\_suprun@mail.ru](mailto:www.igor_suprun@mail.ru)

Received: 06.03.2020, revised: 23.04.2020, accepted: 30.04.2020

**Abstract: Relevance.** One of the urgent tasks associated with improving public health is the possibility of water consumption, in terms of quality, consistent with drinking water standards. At the same time, according to WHO, only 1% of water from drinking and fishery sources on Earth is suitable for use without prior preparation. In all other cases, water treatment, including its disinfection, is simply necessary. Depending on the physicochemical composition of the water and its microbiological contaminants, one or another water treatment technology is selected. **Aim.** In this regard, at water treatment facilities, it is increasingly necessary to include new innovative solutions in the technological scheme that do not provide for the complete reconstruction of existing systems, but allow for the effective modernization of existing ones. One of the most promising solutions in this direction could be the use of methods for treating water with a magnetic reagent method. **Methods.** The technology of magnetic reagent water treatment is proposed, which allows to intensify the reagent clarification stage, without significant costs for the reconstruction of the facility. Experimental tests at the water treatment station made it possible to establish that magnetic treatment increases the coagulation rate of suspensions, reduces the required residence time of water in the clarifier, and reduces the consumption of reagents by 25-30%. **Results.** The article considers the main problem of the classical water treatment system associated with a high consumption of reagents and the need for a systematic selection of the optimal dosage for changing environmental parameters. It is shown that the proposed technology can be considered both as a modernization of existing water treatment plants operating according to the standard scheme, and when designing new facilities. Regardless of the complexity of the technologies used for surface water purification in the initial stage of purification, as a rule, the settling method is used, which is carried out by introducing coagulating reagents into the water to form flocs that include contaminants extracted from water. Despite its high efficiency, the use of this method involves both the consumption of expensive reagents and the need to constantly monitor their dosages, which is explained by continuous changes in surface water quality indicators over the seasons of the year.

**Keywords:** water treatment, magnetic treatment, reagent clarification, reduction of reagent consumption, water treatment.

**For citation:** Golubev I.A., Suprun I.K. The use of magnetic reagent clarification of drinking water to intensify water treatment processes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. 10(2): 136-146. (In Russ.) DOI: [10.46698/VNC.2020.22.93.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.22.93.010).

## Введение

Попытки магнитной обработки водных систем для придания им новых свойств предпринимались во многих отраслях промышленности, медицине, сельском хо-

зайстве [Возная, 1979]. Причем результаты использования, представленные в отечественной и зарубежной научно-технической литературе, и патентной информации во многом противоречивы. Этим объясняется ограниченное и осторожное применение аппаратов магнитной обработки (МО).

### Актуальность

Большой объем научно-исследовательских работ, проведенных в Новочеркасском политехническом институте, Московском энергетическом институте, Азербайджанском государственном научно-исследовательском и проектно-институте нефти, Уфимском государственном нефтяном техническом университете (УГНТУ) и других организациях [Тебенихин, 1977; Классен, 1978; Инюшин и др., 2000], позволил создать теоретические предпосылки и начать широкое применение магнитной обработки на объектах теплоэнергетики – для снижения накипеобразования, в строительстве – для получения улучшенных характеристик материалов, в медицине – для снижения послеоперационных осложнений, в нефтяной промышленности – для разрушения водонефтяных эмульсий [Иванов, 1956].

Несмотря на убедительные достижения в области магнитной обработки промысловых сред [Лесин, 2003; Мирзаджанзаде и др. 1997], существуют проблемы, связанные с невысокой повторяемостью удовлетворительных результатов на практике.

В силу специфики нефтепромыслового оборудования наибольшее распространение получили аппараты с постоянными магнитами, легко-монтажные и не требующие специальной подготовки обслуживающего персонала [Лаптев и др., 2015]. Но низкая эффективность таких аппаратов, обусловленная малой напряженностью МП, не позволила применять их для широкого круга задач. Другой тип используемых аппаратов – электромагнитные установки, имеет принципиально другое исполнение, однако схожие с аппаратами на постоянных магнитах проблемы: низкая напряженность магнитного поля [Chibowski et al., 2003].

### Цель

Предлагаемая нами установка относится ко второму типу аппаратов МО, однако работает в принципиально другом режиме – импульсном. Такой вид аппарата позволяет создавать магнитное поле высокой напряженности, оказывающее максимальное воздействие на обрабатываемую среду [Frenkel et al., 2018; Ghauri, Ansari, 2006; Jha et al., 2017]. Импульсная магнитная установка (ИМУ) состоит из генератора токов низкой частоты и соединенного с ним посредством кабеля соленоида, монтируемого фланцевым соединением на участок трубопровода. Установка позволяет подвергать проходящую через соленоид жидкость воздействию сильным (400 кА/м) низкочастотным импульсным магнитным полем (<50 Гц).

### Методы исследования

#### *Очистка нефтезагрязненных сточных вод*

Наиболее широко распространенными загрязнителями сточных вод предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) являются нефтепродукты – неидентифицированная группа углеводородов нефти, мазута, керосина, масел и их примесей, которые вследствие их высокой токсичности, принадлежат, согласно данным ЮНЕСКО, к числу десяти наиболее опасных загрязнителей окружающей

среды. В сбрасываемых сточных водах предприятий ТЭК наблюдаются, в ряде случаев, тысячекратные превышения нормативов [Coeu, 2012; Kitazawa, 2001].

Основными источниками загрязнения нефтью и нефтепродуктами являются предприятия по добыче нефти и твердых полезных ископаемых. Как правило, очистные сооружения предприятий ТЭК не справляются со значительными объемами нефтезагрязненных сточных вод, что приводит при их сбросе к загрязнению поверхностных и подземных вод. Анализ деятельности предприятий показал, что в настоящее время более 50% сточных вод, сбрасываются недоочищенными.

В нефтедобывающей промышленности, при организации разработки методом закачки воды в пласт с целью поддержания пластового давления, в связи с постоянным ростом обводненности добываемой продукции существующее оборудование подготовки не справляется с такими объемами подтоварной воды, что влечет за собой закачку неподготовленной воды в пласт.

При использовании для заводнения продуктивных пластов подтоварных вод с высоким остаточным содержанием нефтепродуктов происходит ощутимое снижение приемистости скважины (вплоть до полного прекращения закачки). Это чаще всего нефть со значительным содержанием АСПО, диспергированных в водной фазе. Остаточная нефть, проникая в более крупные капиллярные каналы ПЗП, постепенно коалесцируя и накапливаясь, может существенно снизить приемистость скважины.

В этой связи, самой актуальной проблемой является повышение качества очистки сточных вод на уже имеющихся установках. Поскольку говорить о полной или частичной реконструкции, как правило, не представляется возможным из-за экономической неэффективности предлагаемого метода решения, организации ведут поиск по внедрению дешевого и эффективного способа модернизации уже имеющихся очистных сооружений. Одной из наиболее перспективных технологий интенсификации процессов водоподготовки является технология обработки водо-нефтяных сред магнитным полем.

При обработке импульсным магнитным полем водо-нефтяных систем наблюдается рост динамики седиментации (расслоения в/н эмульсий), объясняющийся тем, что МП воздействует на бронирующие глобулы нефтепродукта включающего ферромагнетики (оксиды железа) и парамагнетики (АСПО). Молекулы этих веществ легко ориентируются в магнитном поле, происходит их коагуляция в результате магнитного взаимодействия [Рахимов и др., 2012; Лаптев и др., 2000]. Ориентация этих частиц (втягивание, притяжение) определяется градиентом напряженности магнитного поля (изменение магнитного поля во времени). Именно по этому параметру импульсная магнитная установка превосходит всех прямых конкурентов и показывает наилучший эффект от воздействия.

Эффективность магнитной обработки нефтезагрязненной воды была подтверждена экспериментально. В ходе исследований оценивалось качество сепарированной воды при различных вариантах ее обработки фотометрическим методом. Метод основан на извлечении (экстрагировании) нефти из воды органическим растворителем (хлороформом), который растворяет нефть, но сам практически не растворяется в воде. Растворившаяся в хлороформе нефть окрашивает его. Интенсивность окраски пропорциональна концентрации нефти. Погрешность метода  $\pm 1\%$ .

В качестве среды испытания использовалась сепарированная попутнодобываемая вода со следующими параметрами (табл. 1).

Таблица 1. / Table 1.

**Основные параметры исследуемой воды /  
Main parameters of the investigated water**

№	Свойства / Features	Единица измерения / Unit of measurement	Величина / Value
1.	Плотность воды в стандартных условиях. / Density of water under standard conditions.	кг/м <sup>3</sup> / kg/m <sup>3</sup>	1007,00
2.	Общая минерализация. / Total mineralization.	г/дм <sup>3</sup> / g/dm <sup>3</sup>	12010,70
3.	pH	ед. pH / pH unit	7,6
4.	Температура. / Temperature.	°C	20
5.	Содержание остаточных нефтепродуктов в воде. / Residual oil content in water	мг/л / mg/l	58–60

В ходе исследований испытывались следующие варианты обработки воды (табл. 2):

1. Магнитная обработка нефтезагрязненных сточных вод приводит к ускорению процесса естественного разделения в/н эмульсии после обработки при отстое;
2. Остаточное содержание нефтепродуктов в исходной пробе воды – 58 мг/дм<sup>3</sup>;
3. Использование гидрофобного фильтра снижает остаточное содержание нефтепродуктов до ~ 30 мг/л;
4. Обработка воды магнитным полем снижает остаточное содержание нефтепродуктов до ~ 16 мг/л;
5. Комплексное применение обработки электромагнитным полем частотой 22 Гц и гидрофобного фильтра приводит к увеличению эффективности очистки воды от нефтепродуктов, проявляется синергетический эффект – совместное действие превосходит эффект от применения обработки магнитным полем или гидрофобного фильтра отдельно.
6. Возможно снижение остаточного содержания нефтепродуктов в воде до ~ 5 мг/л.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты лабораторных испытаний / Laboratory test results**

Обр. №. / Sample Number	Обработка. / Processing	Концентрация, мг/л. / Concentration, mg/l
1	<i>ФОН (ХОЛ)</i> / FON (HOL)	57,7
2	<i>ГФФ</i> / GFF	30,2
3	<i>МП</i> / MP	16,3
4	<i>МП+ГФФ</i> / MP+GFF	5,1

- *ФОН* (Холостая проба – проба воды без обработки магнитным полем и без фильтра) / FON (blank sample – water sample without magnetic field treatment and without filter);

- *ГФФ* (Проба воды пропущена через гидрофобный фильтр) / GFF. (Water sample passed through a hydrophobic filter);

- *МП* (Проба воды, обработана магнитным полем, и без фильтра) / *MP* (Water sample, magnetic field treated, and without filter);

- *МП + ГФФ* (Проба воды, обработанная магнитным полем и пропущена через гидрофобный фильтр) / *MP+GFF* (Water sample after magnetic field treatment and passed through a hydrophobic filter).

#### *Очистка воды питьевого назначения*

Большинство эксплуатируемых сегодня станций водоподготовки используют классическую систему реагентного осветления, разработанную в 60-х годах XX века. В воду, подлежащую очистке вводят коагулянты, способствующие связыванию частиц, обуславливающих цветность и мутность, в хлопья, что ускоряет их выпадение в отстойниках. Для более глубокого осветления воду после отстойников направляют на фильтры, для задержания остаточных взвешенных веществ в фильтрующем слое. Попутно с осветлением воды при коагулировании и фильтрации происходит в значительной степени освобождение ее от бактерий, благодаря чему повышается ее качество с санитарной точки зрения.

Несмотря на высокую эффективность, применение данного метода сопряжено, как с расходом дорогостоящих реагентов, так и с необходимостью осуществления постоянного контроля за их дозировками, что объясняется непрерывными изменениями показателей качества поверхностных вод по сезонам года.

В этой связи, на объектах водоподготовки всё более необходимым является включение в технологическую схему новых инновационных решений, которые не предусматривают полную реконструкцию существующих систем, а позволяют эффективно модернизировать уже имеющиеся. Одним из наиболее перспективных решений в этом направлении является применение методов обработки воды магнитно-реагентным способом.

Как показали результаты многочисленных исследований, выполненных в лабораторных и опытно-промышленных условиях [Cefalas et al., 2008; Chang, Weng, 2006; Holysz et al., 2003; Krems, 2004], магнитное поле позволяет снизить расход реагентов, включающих ингибиторы коррозии, депарафинизаторы и деэмульгаторы.

Поскольку механизм действия реагентов, применяемых в нефтяной промышленности и в практике водоподготовки, принципиально схожи между собой, было выдвинуто предположение что, магнитное поле способно оказывать положительный эффект и при очистке питьевых вод на этапе коагуляции.

Именно с этой целью было осуществлено исследование эффективности использования технологии магнитно-реагентной обработки воды в процессе её очистки на станции водоподготовки, расположенной в деревне Лесколово Всеволожского района (Ленинградская обл.), направленное на изучение изменения динамики осветления воды, предварительно обработанной реагентами для коагулирования, в присутствии магнитного поля и без него.

Водоподготовка на данном объекте осуществляется по классической схеме двухступенчатой очистки с реагентной обработкой: вода подается насосами станции первого подъема из источника – озеро Лемболовское, затем по водоводам на смеситель водоочистных сооружений. В смеситель поэтапно вводятся реагенты (аналит для обеззараживания, коагулянт, флокулянт и сода) для осветления воды. Из смесителя вода поступает в осветлители с взвешенным осадком, где происходит формирование хлопьев, с последующим выделением их основной части из воды осажением, после чего частично осветленная вода направляется на скорые филь-

тры, для конечной очистки. Обеззараживание воды осуществляется методом её хлорирования.

В рамках проводимых исследований пилотная установка ИМУ-2 монтировалась перед гребенкой из шести параллельно работающих осветлителей на участке подачи воды из смесителя (рис. 1), позволяя тем самым подвергать магнитной обработке весь поток воды, прошедшей стадию реагентной очистки.

При этом эффективность магнитной обработки оценивалась путем поэтапного изменения технологических параметров водоподготовки, а именно за счет снижения количества одновременно работающих осветлителей (на ВОС их шесть штук) и уменьшения расхода реагентов.

На протяжении всех экспериментов осуществлялся непрерывный контроль за показателями качества воды (цветность, мутность, остаточный алюминий) на выходе с осветлителей после включения магнитной установки. В качестве сравнения использовали показатели эффективности водоподготовки ВОС в аналогичные сезонные периоды по предыдущим годам, когда магнитная обработка не применялась.



*Рис. 1. Установка «ИМУ-2». /  
Fig. 1. Installation of «IMU-2».*

### Полученные результаты и их обсуждение

Ход испытаний:

1. Сбор статистических данных по работе объекта до внедрения магнитной установки.

2. Старт испытаний февраль 2019-го года.

Поэтапное снижение количества работающих осветлителей с 6-и до 2-х, за счет увеличения подачи воды на оставшиеся аппараты. Однако, поскольку производительности объекта в этом случае не хватало для обеспечения поселка водой - расход подняли, увеличив кол-во осветлителей до 4-х.

Вынужденное снижение производительности объекта на 10% от стандартного режима вызвано гидродинамическими ограничениями работы осветлителей (разрушения слоя взвешенного осадка возросшим напором воды), а не пропускной способностью магнитной установки.

Результаты испытаний приведены в таблице 3.

### Выводы (Заключение)

Опытные испытания позволили установить, что предложенная установка магнитной обработки позволяет обеспечить одинаково высокую эффективность очистки воды в различные сезоны года независимо от качества воды в источнике питьевого водоснабжения озера Лемболовское.

Проведенные исследования позволили получить следующие практические результаты:

Таблица 3 / Table 3

**Сравнительные данные по качеству воды на объекте Лесколово по годамдо и после внедрения магнитного аппарата ИМУ / Comparative data on water quality at the Leskolovo facility over the years before and after the introduction of the IMU magnetic apparatus**

Даты / Dates	Период / Period	Исходная вода / Source water		№	Qв, м³/сут sub. m/day	Расход реагентов, л/ч / Reagent consumption, l/h		Вода после осветлителей / water after clarifiers	
		Цветность / Chromaticity	Мутность / Feculence			Коагулянт / Coagulant	Щелочь / Alkali	Цветность / Chromaticity	Мутность / Feculence
Февраль 2017 / February 2017	Март 2017 / March 2017	280-320	1,5-1,7	6	1000	4,3-4,7	35-40	16-21	0,6-0,7
		317-340	2,2-3,5	6	1000	3,7-4,2	25-30	17-20	0,6-0,7
Апрель 2017 / April 2017	Начало месяца / Beginning of the month	330	8-14	6	1000	2,8-3,7	20-25	18-20	0,6-0,7
	Конец месяца* / End of the month	180-140	1,7-1,9	6	1000	1,8-2,4	20	18-20	0,6-0,7
Февраль 2018 / February 2018	Март 2018 / March 2018	200	0,7-0,9	6	1000	3,6-4,2	40	13-15	0,6-0,7
		220-230	0,9-1	6	1000	3,3-3,7	35-40	18-20	0,6-0,7
Апрель 2018 / April 2018	Начало месяца / Beginning of the month	230-260	1,2-3	6	1000	3,1-3,4	20	16-15	0,6-0,7
	Конец месяца / End of the month	140-120	2,5-3	6	1000	1,9-2,4	40	17-18	0,6-0,7
Февраль 2019 / February 2019	Март 2019 / March 2019	160-180	1,5	2	900	3,1-2,5	15	17-20	0,6-0,7
		230-260	1,5-2	4	1000	2,4-2,7	10	15-20	0,6-0,7
Апрель 2019 / April 2019	Апрель 2019 / April 2019	230-240	2-2,3	4	1000	2,6-2,9	10	15-20	0,6-0,7

N – количество параллельно работающих осветлителей / quantity of parallelly working clarifiers;

Qв – производительность водоканала / yield capacity of water utility;

\* - во второй половине апреля начинается сезонное изменение качества исходной воды, связанное с таянием льдов / in the second half of April begins a seasonal change in the quality of the source water, associated with melting ice.

- сократить время очистки воды и удаления осадка, а также количество необходимых промывок емкостей для осветления воды почти в два раза;
- увеличить скорость (примерно в два раза) коагуляции взвесей и выпадения осадка в «плотный хлопок»;
- сократить расход реагентов (в сравнении с ранее аналогичными периодами, когда магнитная обработка не применялась): коагулянта в среднем на 25–30%, щелочи на 50–60%;
- стабилизировать качество воды, подаваемой в водопроводную сеть д. Лесково независимо от сезонного качества исходной воды источника.

Предлагаемая технология предварительной подготовки смеси воды и коагулянта с использованием аппарата магнитной обработки жидкости позволяет применять ее, как для модернизации станций водоподготовки, работающих по типовой схеме, так и при проектировании вновь строящихся объектов.

### Литература

1. Возная Н.Ф. Химия воды и микробиология. – М.: Высшая школа. – Издание 2-е. – 1979. – 140 с.
2. Иванов Т.Ф. Разрушение водонефтяных эмульсий в неоднородном магнитном поле. // Т.Ф. Иванов. // Журнал физической химии. – Т. 30. Вып. 11. – 1956. – С. 2593–2595.
3. Инюшин Н.В., Каштанова Л.Е., Мугтабаров Ф.К. Магнитная обработка промышленных жидкостей. – Уфа: Гос. издат. науч.-техн. литературы «Реактив», 2000. – 178 с.
4. Классен В.И. Омагничивание водных систем. – М.: Химия, 1978. – 240 с.
5. Лаптев А.Б., Шайдаков В.В., Максимочкин В.И., Хасанов Н.А. Разработка установок для магнитной обработки нефтяных шламов. // Материалы второй Всероссийской Научно-практической конференции: «Отходы - 2000». - Уфа. – 2000. – С. 157-158.
6. Лаптев А.Б., Рахимов С.Р., Латыпов О.Р., Тюсенков А.С., Ахияров Р.Ж., Бугай Д.Е. Электрохимический метод разделения водонефтяных эмульсий – Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – № 3 (101). – 2015. – С. 59–69.
7. Лесин В.И. Физико-химические основы применения магнитных полей в процессах добычи, транспортировки, разработки и подготовки нефти. – Фундаментальный базис нефтегазовых технологий – М.: Геос, 2003. – С. 130–135.
8. Мирзаджанзаде А.Х., Алиев Н.А., Юсифзаде Х.Б. и др. Фрагменты разработки морских нефтегазовых месторождений. – Баку: Изд. «Елм», 1997. – 250 с.
9. Рахимов С.Р. Лаптев А.Б., Бугай Д.Е. О возможности использования магнитогидродинамической обработки для расщепления водонефтяных эмульсий - Инновационная деятельность предприятий по исследованию и получению современных материалов и сплавов: матер. междунар. науч. конф. – Орск, М.: Машиностроение. - Т. 1. – 2012. – С. 506–510.
10. Тебенихин Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках. – М.: Энергия, 1977. – 184 с.
11. Cefalas A.C., Kobe S., Drazic G., Sarantopoulou E., Kollia Z., Strazisar J., Meden A. Nanocrystallization of CaCO<sub>3</sub> at solid liquid interfaces in magnetic field: a quantum approach. // Appl. Surf. Sci. – 2008. – No. 254. – Pp. 6715–6724.
12. Chang K.T., Weng C.I. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamic simulation. // J. Appl. Phys. – 2006. – No. 100. Pp. 043917.
13. Chibowski E., Holysz L., Szczes A., Chibowski M. Precipitation of calcium carbonate from magnetically treated sodium carbonate solution. // Colloid. Surf. A. – 2003. -- No. 225. – Pp. 63–73.
14. Coey J. Magnetic water treatment how might it work. // Philos. Mag. – 2012. – No. 92. – Pp. 3857–3865.

15. Frenkel M., Danchuk V., Multanen V., Bormashenko E., Magnetic field inspired contact angle hysteresis drives floating polyolefin rafts. // *Colloid Interface Sci. Commun.* – 2018. – No. 22. – Pp. 38–41.
16. Ghauri S.A., Ansari M.S. Increase in water viscosity under the influence of magnetic field. // *J. Appl. Phys.* – 2006. – No. 100. – Pp. 066101-066102.
17. Holysz L., Chibowski E., Szczes A. Influence of impurity ions and magnetic field on the properties of freshly precipitated calcium carbonate. // *Water Res.* – 2003. – No. 37(14). – Pp. 3351–3360.
18. Jha P.K., Xanthakis E., Jury V., Le-Bail A. An overview on magnetic field and electric field interactions with ice crystallisation; application in the case of frozen food. // *Crystals.* – 2017. – No. 7 (299). – Pp. 1–22.
19. Kitazawa K., Ikezoe Y., Uetake H., Hirota N. Magnetic field effects on water, air and powders. // *Phys. B.* 294e295. – 2001. – Pp. 709–714.
20. Krems R.V. Breaking van der Waals molecules with magnetic fields. // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – No. 93. – Pp. 013201.

## References

1. Voznaya N.F. Water chemistry and microbiology. Moscow. Higher School. 2nd Edition. 1979. 140 p. (In Russ.)
2. Ivanov T.F. Destruction of oil-water emulsions in an inhomogeneous magnetic field. *Journal of Physical Chemistry.* T. 30. No. 11. 1956. pp. 2593-2595. (In Russ.)
3. Inyushin N.V., Kashtanova L.E., Mugtabarov F.K. Magnetic processing of commercial fluids. Ufa. State. published scientific and technical literature “Reagent”. 2000. 178 p. (In Russ.)
4. Klassen V.I. Magnetization of water systems. Moscow. Chemistry. 1978. 240 p. (In Russ.)
5. Laptev A.B., Shaydakov V.V., Maksimochkin V.I., Khasanov N.A. Development of installations for the magnetic treatment of oil sludge. Materials of the second All-Russian Scientific and Practical Conference: “Waste - 2000”. Ufa. 2000. Pp. 157-158. (In Russ.)
6. Laptev A.B., Rakhimov S.R., Latypov O.R., Tusenkov A.S., Akhiyarov R.Zh., Bugai D.E. The electrochemical method of separation of oil-water emulsions. Problems of the collection, preparation and transport of oil and oil products. 2015. No.3 (101). pp. 59-69. (In Russ.)
7. Lesin V.I. Physico-chemical principles of the use of magnetic fields in the processes of oil production, transportation, development and preparation. Fundamental basis of oil and gas technologies. Moscow. Geos. 2003. pp. 130–135. (In Russ.)
8. Mirzadzhanzade A.Kh., Aliev N.A., Yusifzade H.B. and other. Fragments of the development of offshore oil and gas fields. Baku. Ed. “Elm”. 1997. 250 p. (In Russ.)
9. Rakhimov S.R., Laptev A.B., Bugai D.E. On the possibility of using magnetohydrodynamic treatment for delaminating water-oil emulsions - Innovative activities of enterprises in the research and production of modern materials and alloys: mater. Int. scientific conf. Orsk, Moscow. Mashinostroenie. 2012. T. 1. pp. 506-510. (In Russ.)
10. Tebenikhin E.F. Non-reagent water treatment methods in power plants. Moscow. Energy. 1977. 184 p. (In Russ.)
11. Cefalas A.C., Kobe S., Drazic G., Sarantopoulou E., Kollia Z., Strazisar J., Meden A. Nanocrystallization of CaCO<sub>3</sub> at solid liquid interfaces in magnetic field: a quantum approach. *Appl. Surf. Sci.* 2008. No. 254. pp. 6715-6724.
12. Chang K.T., Weng C.I. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamic simulation. *J. Appl. Phys.* 2006. No.100. 043917.
13. Chibowski E., Holysz L., Szczes A., Chibowski M. Precipitation of calcium carbonate from magnetically treated sodium carbonate solution. *Colloid. Surf. A.* 2003. No. 225. pp. 63-73.
14. Coey J. Magnetic water treatment how might it work. *Philos. Mag.* 2012. No.92. pp. 3857-3865.

15. Frenkel M., Danchuk V., Multanen V., Bormashenko E., Magnetic field inspired contact angle hysteresis drives floating polyolefin rafts. *Colloid Interface Sci. Commun.* 2018. No.22. pp. 38-41.
16. Ghauri S.A., Ansari M.S. Increase in water viscosity under the influence of magnetic field. *J. Appl. Phys.* 2006. 100. pp. 066101-066102.
17. Holysz L., Chibowski E., Szczes A. Influence of impurity ions and magnetic field on the properties of freshly precipitated calcium carbonate. *Water Res.* 2003. No. 37(14). pp. 3351-3360.
18. Jha P.K., Xanthakis E., Jury V., Le-Bail A. An overview on magnetic field and electric field interactions with ice crystallisation; application in the case of frozen food. *Crystals.* 2017. No. 7 (299). pp. 1-22.
19. Kitazawa K., Ikezoe Y., Uetake H., Hirota N. Magnetic field effects on water, air and powders. *Phys. B/ 294e295.* 2001. pp. 709-714.
20. Krems R.V. Breaking van der Waals molecules with magnetic fields. *Phys. Rev. Lett.* 2004. No. 93. pp. 013201.

## ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА

УДК 504.55.054:622 (470.6)

DOI: [10.46698/VNC.2020.93.21.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.93.21.011)

Оригинальная статья

## Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений

В. И. Голик , О. Г. Бурдзиева , Б. В. Дзеранов , Х. О. Чотчаев 

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

Статья поступила: 01.04.2020, доработана: 08.06.2020, одобрена в печать: 11.06.2020

**Резюме:** Актуальность проблемы комплексного освоения и сохранения недр в настоящее время повышается необходимостью совершенствования основанных на новых принципах технологических процессов, что объясняет необходимость разработки новых и модернизации известных методов управления геодинамическими явлениями в массиве. **Объектом исследования** являются скальные сложно-структурные месторождения Садонской группы Центрального Кавказа, разработка которых увеличивает напряжения в рудовмещающих массивах с ухудшением качественных показателей использования недр и делает необходимым учет технологических воздействий на массив и меры геомеханического мониторинга его состояния. **Целью исследования** является обоснование возможности и целесообразности использования продуктов горного и обогатительного передела руд и изготовленных на их основе после извлечения из них полезных компонентов закладочных смесей. **Методы** достижения поставленной цели исследования включают в себя систематизацию и ранжирование связанных с управлением массивом геологических, технологических и экономических данных, разработку критериев оптимальности и формирование концепции ресурсосберегающей технологии разработки месторождений. **Результаты.** Детализирована концепция управления геомеханикой рудовмещающих массивов. Дано условие прочности массива на различных стадиях разработки месторождения. Предложена математическая модель взаимодействия переменных факторов. Сформулирован механизм сочетания традиционной технологии с открытым выработанным пространством и новой технологии с выщелачиванием металлов, как в блоках, так и в дезинтеграторах. Даны результаты оценки возможности использования хвостов обогащения в качестве сырья для изготовления твердеющих смесей, полученные в ходе полнофакторных исследований по программам государственных грантов. Даны сведения о гидрохимических способах получения металлов на рудниках. Вмещающим породам Садонских месторождений характерно перераспределение напряжений, в том числе, в геодинамическом режиме. Управление геодинамикой рудовмещающих пород путем регулирования величины напряжений в рудовмещающих массивах требует использования искусственных массивов из хвостов технологических процессов. Показано, что отработка вовлекаемых в производство некондиционных руд и хвостов обогащения запасов и доработка имеющихся запасов по комбинированной схеме может быть рентабельной.

**Ключевые слова:** концепция, управление, массив, земная поверхность, геомеханика, напряжения.

**Для цитирования:** Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 147-160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011.

DOI: [10.46698/VNC.2020.93.21.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.93.21.011)

Original paper

## Ground geodynamics control by regulating stress level

V. I. Golik<sup>ID</sup>, O. G. Burdzieva<sup>ID</sup>, B. V. Dzeranov<sup>ID</sup>, Kh. O. Chotchaev<sup>ID</sup>

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: v. i. golik@mail. ru

Received: 01.04.2020, revised: 08.06.2020, accepted: 11.06.2020

**Annotation: Relevance.** of the problem of integrated development and conservation of mineral resources is currently increasing by the need to improve technological processes based on new principles, which explains the need to develop new and modernize well-known methods for managing geodynamic phenomena in the massif. **Aim.** The object of the study is the rock complex structural deposits of the Sadon group of the Central Caucasus, the development of which increases stresses in ore-bearing massifs with a deterioration in the quality of subsoil use and makes it necessary to take into account technological impacts on the massif and measures of geomechanical monitoring of its condition. The aim of the study is to substantiate the feasibility and advisability of using the products of mining and concentration processing of ores and made on their basis after extracting from them the useful components of filling mixtures. **Methods** to achieve the research goal include systematization and ranking of geological, technological and economic data related to managing an array of data, development of optimality criteria and the formation of a concept for resource-saving technology for field development. **Results.** The concept of managing the geomechanics of ore-bearing arrays is detailed. The condition of the array strength at various stages of field development is given. A mathematical model of the interaction of variable factors is proposed. The mechanism of combining traditional technology with open mined space and a new technology with leaching of metals, both in blocks and in disintegrators, is formulated. The results of evaluating the possibility of using enrichment tailings as raw materials for the manufacture of hardening mixtures, obtained in the course of full-factor studies on state grant programs. Information is given on hydrochemical methods for producing metals in mines. The host rocks of the Sadon deposits are characterized by a redistribution of stresses, including in the geodynamic regime. Management of the geodynamics of ore-bearing rocks by regulating the magnitude of stresses in ore-bearing massifs requires the use of artificial arrays from the tailings of technological processes. It is shown that the mining of substandard ores and tailings from the enrichment of reserves involved in the production and the refinement of existing reserves using a combined scheme can be cost-effective.

**Keywords:** concept, management, array, Earth surface, geomechanics, voltage.

**For citation:** Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (2): 147-160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011.

### Введение

Проблема комплексного освоения и сохранения недр Земли решается совершенствованием процессов разработки месторождений полезных ископаемых и глубокой переработки минерального сырья [Borshchovskiy et al., 2017; Golik et al., 2015a, c], что обеспечивается использованием возможности инструментального контроля напряженно-деформированного состояния массива.

Технологии разработки рудных месторождений Садонской группы характеризуются потерями металлов в некондиционных рудах и в хвостах обогащения руд.

Полноту использования недр и сокращение объемов химически агрессивных отходов на земной поверхности могут обеспечить прорывные технологии, основанные на принципиально новых принципах.

Такие технологии рождаются, в том числе, в результате анализа опыта малоотходных технологий разработки природных и техногенных месторождений и нетрадиционных технологий добычи металлов из некондиционного сырья в условиях месторождений Садонской группы.

Такой опыт накоплен авторами посредством исследований в рамках 4 грантов с получением количественных показателей извлечения металлов из руд выщелачиванием.

Доказано, что механохимическое воздействие на минералы адекватно позволяет изменять их свойства и изменять фазовое состояние рудных минералов с переводом металлов в мобильное положение.

Выщелачивание металлов в подземных блоках и дезинтеграторах – активаторах осуществлено экспериментально на рудах Садонского рудного узла [Golik et al., 2015d; Golik, Lukyanov, 2013].

Сведения о перспективах выщелачивания могут быть востребованы для возрождения горной отрасли, создания новой практически неограниченной сырьевой базы предприятий и реальной минимизации химического загрязнения не только в РСО-Алания, но и других регионов.

Оптимизация технологических процессов горного производства по фактору управления геомеханикой рудовмещающих массивов включает в себя важный раздел обоснования целесообразности использования хвостов подземного выщелачивания металлов из руд и использование закладочных смесей из утилизируемых отходов горного производства на земной поверхности после извлечения из них полезных компонентов.

## Цель

Целью таких исследований являются:

- создание сырьевой базы для изготовления твердеющих закладочных смесей на основе техногенных запасов некондиционного сырья;
- глубокое извлечение металлов из хвостов добычи и переработки минерального сырья путем комбинированного химического обогащения и их механической активации с приложением высокой энергии.

Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается реакцией слагающих их массивов, по силе сравнимой с экстремальными природными явлениями. Чувствительность стабильно неустойчивых участков земной коры проявляется в виде сейсмического отклика на техногенное изменение естественного поля напряжений.

Управление состоянием природно-технической геомеханической системы сводится к оптимизации энергетических потоков по критериям эффективности, безопасности и полноты использования недр.

Разработка скальных месторождений увеличивает напряжения до уровня критических с ухудшением качественных показателей использования недр, что повышает актуальность проблемы управления геодинамическими процессами при техногенном вмешательстве для сохранения массива от разрушения.

Состояние скальных массивов при добыче руд определяется совокупностью природных и техногенных факторов: объемом пустот, технологией и временем существования.

Максимальные напряжения развиваются при стадийной отработке залежей камерно- целиковыми системами в местах оборудования временных и постоянных целиков и на участках изменения мощности рудных тел, где уровень критических напряжений повышается в 2-3 раза.

### Методика

Оптимальное соотношение параметров отбойки руд и уровня напряжений обеспечивается при использовании методики оптимизации технологий на основе учета сейсмозрывных воздействий на массив и поверхностные объекты, в том числе, за счет разделения взрывных волн во времени.

Эффективное управление геомеханическим состоянием рудовмещающего массива в сложных горно-геологических условиях обеспечивается геомеханическим мониторингом его напряженно-деформированного состояния. Основу такого мониторинга составляют геофизические методы, совершенствование которых и адаптация к конкретным условиям месторождения весьма актуальны. Особой трудностью для геофизического сопровождения процессов разработки отличаются месторождения, возраст которых достигает 200 лет, например, Садонского.

### Результаты

В основе управления геомеханикой массивов лежит теория М. М. Протодяконова (1933), в соответствии с которой на выработку действует вес пород, заключенный в пределах свода. А. А. Борисов (1964) увязал ее с устойчивостью слоя пород в кровле выработки, а В. Д. Слесарев (1948) – с сопротивлением разрыву образующих балку пород. С. В. Ветров (1975) сформулировал корреляцию между прочностью заклинивающихся пород, образующих шарнирную арку в кровле выработки и весом пород в пределах свода естественного равновесия.

Принципиальные условия геомеханической сбалансированности массива сводятся к тому, чтобы фактические размеры горных выработок не превышали предельных для данных условий размеров, а влияние горных работ не распространялось до земной поверхности.

Способом регулирования напряжений в скальных месторождениях в отличие от месторождений других типов является регулирование величины и направления напряжений или целенаправленная корректировка несущей способности пород во времени и пространстве технологическими методами на всех стадиях добычных работ.

Концепция природоохранной и ресурсосберегающей технологии разработки месторождений Садонского рудного пояса предусматривает управление состоянием массива путем регулирования уровня, формируемых совокупностью сейсмотектонических воздействий и техногенной сейсмичности.

Извлечение руды из недр происходит в условиях суммарного воздействия природных и техногенных напряжений [Чотчаев и др., 2018; Golik et al., 2016].

При разработке месторождений разубоживание руд породами достигало 60%, а потери руд были не менее 20%. При добыче в целиках теряли до 40% запасов руды, а при обогащении ее – до 30% металлов. Воронки обрушения достигали земной

поверхности.

Для разработки месторождений Садонской группы характерны деконцентрация добычных работ, высокие потери и разубоживание руд при нарушении геомеханической стабильности участков месторождений; активизация разрушения массива с увеличением глубины разработок выборочной выемки разнорудных руд.

Инструментальными исследованиями состояния массивов в период разработки установлено:

- показатели эффективности добычи руд коррелируют с величиной возникающих напряжений;
- эффективное управление напряжениями осуществляется технологиями с заполнением пустот монолитными твердеющими смесями.

Это условие обеспечивается разделением месторождений рудными или искусственными целиками, а также массивами хвостов подземного выщелачивания.

Условие прочности массива на различных стадиях разработки описывается моделью В. Голика:

$$\sigma_1 \pm k\sigma_{2,3} \leq \sigma_{сж} = \begin{cases} \sigma_{сж}^0 = \int_0^{Z_0^{\max}} f(x, dx_1, dx_2, \dots, dx_n) \rightarrow \begin{cases} \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0^{\max}} f(x, dH_s) \\ \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0^{\max}} f(x, dH_s + dH_c) \end{cases} \\ \sigma_{сж}^{\text{ост}} \text{ при } H_c = H \rightarrow \sigma_{закл} = \int_0^B f(x, dH) \end{cases}$$

где  $\sigma_1$  – вертикальная составляющая главных напряжений, МПа;  $\sigma_{2,3}$  – горизонтальная результирующая составляющая, МПа;  $k$  – коэффициент искажения напряжения структурно-тектоническими условиями;  $\sigma_{сж}$  – напряжения в верхнем слое разупроченных отдельностей массива, МПа;  $\sigma_{\pm}$  – напряжения в зоне влияния работ, МПа;  $\sigma_{сж}^{\text{ост}}$  – остаточная прочность пород, МПа;  $Z_0$  – пролет плоской формы выработки, м;  $x_1, \dots, x_n$  – свойства пород;  $\sigma_{закл}$  – прочность закладочного массива при сжатии, МПа;  $B$  – ширина зоны обрушения, м;  $H$  – высота зоны обрушения, м;  $H_c$  – высота зоны влияния работ, м;  $H_s$  – высота закладочного массива, м.

Сохранность рудовмещающих массивов и земной поверхности над ними определяется высотой свода С. В. Ветрова:

$$h_c = a' / v,$$

где  $a'$  – полупролет свода;  $v$  – коэффициент устойчивости трещиноватых пород:

$$V = 2 \frac{d_r R''_{сж}}{d_1 R'_{сж}},$$

где  $d_r, d_1$  – вертикальный и горизонтальный размер структурных блоков;  $R''_{сж}, R'_{сж}$  – отношение сопротивления пород сжатию в направлении распора свода и в направлении действия массы пород.

Результаты расчета должны удовлетворять условию сохранности земной поверхности по ВНИМИ:

$$H' > H_p = \kappa l \ell_{\text{экв}},$$

где  $H'$  – глубина верхней границы выработанного пространства от выветренных пород и рыхлых отложений, м;

$H_p$  – расчетная глубина выработанного пространства от выветренных пород, м;  
 $k_1$  – коэффициент, учитывающий свойства горных пород в зависимости от свойств покрывающих пород.

В недрах Садонских месторождений за 200 лет их истории образовано до 5 млн м<sup>3</sup> незаполненных пустот, которые оказывают влияние на геодинамику массивов региона. Основным фактором технологического воздействия на рудовмещающие массивы является взрывание зарядов взрывчатых веществ для отделения от массива и дробления руд.

Горные выработки существуют в полях сейсмических и гравитационных напряжений, образованных естественными и техногенными динамическими явлениями, и реагируют на изменение параметров полей.

В результате природно-техногенных сейсмических воздействий возникают дополнительные к гидростатическим напряжения. При увеличении сейсмичности с 7 до 9 баллов динамические напряжения увеличиваются от 0,5 до 1,5 МПа.

Взаимодействие влияющих на породный массив факторов описывается схемой (рис. 1):

Управляемость массивом достигается сочетанием традиционной технологии с открытым выработанным пространством и новой технологии с выщелачиванием. В качестве закладочного материала служит горная масса, с помощью химико-физических процессов переведенная из одного агрегатного состояния в другое, набирающая прочность до 0,5-1,0 МПа и представляющая собой стабильную породную конструкцию.

Прочные хвосты выщелачивания, составляют объект комбинации вместе с искусственными массивами, созданными на участках извлеченных богатых руд. В зависимости от того, что находится в кровле: породный массив или искусственный массив из твердеющей закладки возможны варианты породных конструкций. При выемке запасов первой очереди в кровле над ними возникает зона разгрузки. Опорное давление перераспределяется на камеры второй очереди.

Использование хвостов обогащения в качестве сырья для получения металлов и изготовления твердеющих смесей может быть возможным при изменении их активности путем извлечения металлов реагентами в момент образования свежих поверхностей минералов в активаторе-дезинтеграторе (рис. 2).



*Рис. 1. Модель взаимодействия геомеханических факторов. /  
 Fig. 1. Geomechanical interaction model of the geomechanical factors.*

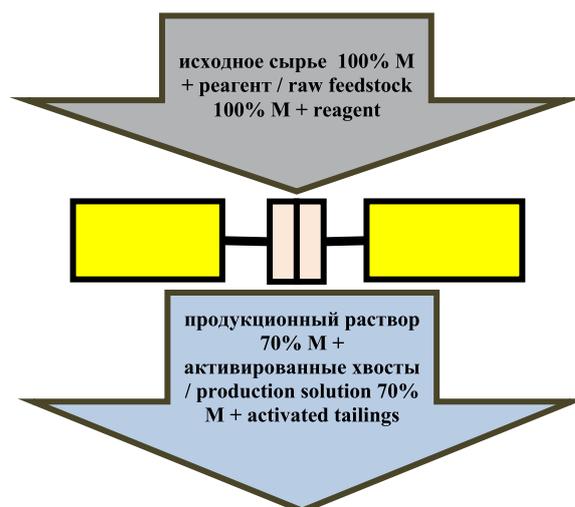


Рис. 2. Выщелачивание металлов в дезинтеграторе с механохимической активацией. /  
Fig. 2. Leaching of metals in a disintegrator with mechanochemical activation.

Возможность использования хвостов обогащения в качестве сырья для изготовления твердеющих смесей определена авторами в ходе полнофакторных исследований по программам государственных грантов.

Прочность твердеющих смесей для каждого варианта активации исследовали по стандартной методике.

Содержание металлов во вторичных хвостах после однократного выщелачивания уменьшается в 3-4 раза.

Изменение прочности выщелоченных хвостов в бетонной смеси при постоянном количестве ингредиентов, кг/м<sup>3</sup>: хвосты 1445, цемент 10, вода 380 дано в таблице 1.

Таблица 1. / Table 1.

**Изменение прочности смеси с цементом в зависимости от варианта активации хвостов, МПа. / Change in the strength of the mixture with cement, depending on the version of tailings activation, MPa.**

Вариант активации / Activation version	Прочность, МПа, время, сутки / Strength, MPa, 24 hours		
	7	14	28
Агитационное выщелачивание / Agitation leaching	1,04	1,11	1,20
Агитационное выщелачивание после механической активации / Agitation leaching after mechanical activation	1,16	1,25	1,32
Однократное выщелачивание в дезинтеграторе / Single leaching in the disintegrator	0,68	0,73	0,88
Агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе / Agitation leaching after leaching in the disintegrator	0,73	0,77	0,94
Трехкратное выщелачивание в дезинтеграторе / Triple leaching in the disintegrator	1,12	1,20	1,32

Таблица 2. / Table 2.

**Изменение прочности выщелоченных хвостов без цемента в зависимости от варианта и времени активации, МПа. / The change in the strength of leached tailings without cement, depending on the version and time of activation, МПа.**

Вариант активации / Activation version	Прочность, МПа, сутки / Strength, МПа, 24 hours		
	7	14	28
Агитационное выщелачивание / Agitation leaching	0,64	0,81	1,01
Агитационное выщелачивание после механической активации / Agitation leaching after mechanical activation	0,86	0,95	1,12
Однократное выщелачивание в дезинтеграторе / Single leaching in the disintegrator	0,60	0,69	0,78
Агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе / Agitation leaching after leaching in the disintegrator	0,63	0,71	0,84
Трехкратная механохимическая активация / Triple leaching in the disintegrator	0,82	1,00	1,12

Таблица 3. / Table 3.

**Влияние активации хвостов на прочность смеси. / The effect of tailings activation on the strength of the mixture.**

Вариант активации / Activation version	Прочность, МПа, 28 суток / Strength, МПа, 28 days		
	цемент 100 кг/м <sup>3</sup> / cement 100 kg/m <sup>3</sup>		активация без цемента / activation without cement
	без активации / without activation	с активацией / with activation	
Агитационное выщелачивание / Agitation leaching	1,20	-	1,01
Агитационное выщелачивание после механической активации / Agitation leaching after mechanical activation	-	1,32	1,12
Агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе / Agitation leaching after leaching in the disintegrator	-	0,88	0,78
Однократное выщелачивание в дезинтеграторе / Single leaching in the disintegrator	-	0,94	0,84
Агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе / Agitation leaching after leaching in the disintegrator	-	1,10	0,99
Трехкратное выщелачивание в дезинтеграторе / Triple leaching in the disintegrator	-	1,32	1,12

Та же закономерность прослеживается и при изготовлении бесцементных смесей на основе вторичных хвостов, как в качестве заполнителя, так и в качестве вяжущего (табл. 2)

Активация хвостов обогащения повышает прочность смесей на их основе при одинаковом расходе цемента на 10%, а бесцементная смесь после дезинтегратора сравнима со смесью при среднем расходе цемента по традиционной технологии (табл. 3).

Полученные результаты исследований по выщелачиванию металлов из хвостов обогащения полиметаллических руд Садонских месторождений сведены в таблице 4.

Таблица 4. / Table 4.

**Извлечение металлов в раствор альтернативными вариантами. /  
Extraction of metals into solution by alternative ways.**

Агитационное выщелачивание / Agitation leaching				Выщелачивание в дезинтеграторе / Leaching in the disintegrator			
Содержание в хвостах, % / Content in tailings, %				Содержание в хвостах, % / Content in tailings, %			
Цинк – 0,95 / Zinc – 0.95		Свинец – 0,84 / Lead – 0.84		Цинк – 0,95 / Zinc – 0.95		Свинец – 0,84 / Lead – 0.84	
Извлечение за 0,2-1,0 ч., % / Recovery for 0.2-1.0 hours, %		Извлечение за 0,2-1,0 ч., % / Recovery for 0.2-1.0 hours, %		Извлечение за 10 с., % / Recovery for 10 seconds, %		Извлечение за 10 с., % / Recovery for 10 seconds, %	
Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлече- но / Ex- tracted	Остаток / Resi- due
24	72	16	71	28	69	24	62

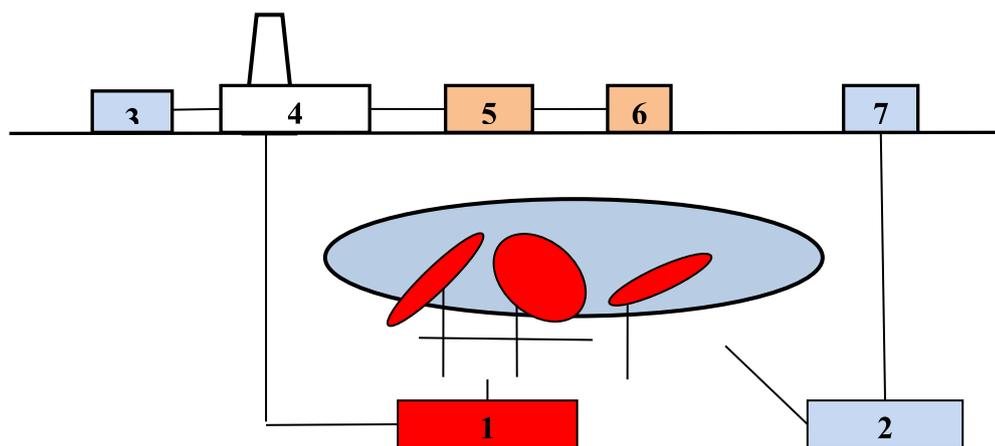
На пути реализации хвостов в промышленном производстве встают проблемы извлечения металлов из раствора выщелачивания, нейтрализации маточных растворов, повышения механической и химической стойкости рабочего органа активатора и др.

Гидрохимические способы получения металлов предпринимались уже во второй половине прошлого века. На Фиагдонском руднике из рудничных стоков за 48 суток получено 32 т цинка в геле с влажностью 65-78%. На Архонском руднике за 51 рабочий день получено 40 т цинка в геле влажностью 65-78%.

Эффективное освоение месторождений должно осуществляться по единому проекту добычи запасов взаимоувязанными и оптимизированными по эколого-экономическим критериям способами добычи (рис. 3).

Реализация проекта предупреждает увеличение напряжений до уровня критических с ухудшением качественных показателей использования недр, что позволяет управлять геодинамическими процессами при техногенном вмешательстве.

Природные катастрофы в регионах связаны с региональной геотектоникой, поэтому состояние скальных массивов при добыче руд определяется совокупностью природных и техногенных факторов: объемом пустот, технологией и временем существования.



*Рис. 3. Комбинированная разработка месторождения: 1 – богатые руды; 2 – бедные руды; 3 – куча выщелачивания; 4 – рудо-контрольная станция; 5 – обогатительная станция; 6 – складочный комплекс; 7 – цех приготовления растворов реагентов. /*

*Fig. 3. Combined development of the deposit: 1 – rich ores; 2 – poor ores; 3 – heap leaching; 4 – ore-control station; 5 – enrichment station; 6 – stowing complex; 7 – workshop for the preparation of reagent solutions.*

Снижение уровня напряжений до безопасной величины обеспечивается инженерными мероприятиями, которые обеспечивают состояние налегающих пород без разрушения сплошности.

Оптимальное соотношение параметров технологий и уровня напряжений обеспечивается при использовании методики оптимизации технологий на основе учета сейсмозрывных воздействий на массив и поверхностные объекты, в том числе, за счет разделения взрывных волн во времени.

Проект разработки месторождений включает в себя комплекс мер управления взаимодействием слагающих природные и искусственные массивы путем регулирования величины напряжений. От традиционных проектов новая технология отличается использованием хвостов подземного блокового выщелачивания и хвостов обогащения руд после извлечения из них металлов для управления геомеханикой массива.

В выработанном пространстве только Садонского месторождения в виде эксплуатационных потерь находится до 600 тыс. т руды, в которой содержится около 28 тыс. т свинца и 53 тыс. т цинка.

Технологии с выщелачиванием металлов исследованы в промышленных масштабах при отработке Фиагдонских месторождений. В границах Какадурского месторождения было определено около 335 тыс. т руды, содержащей 2,07% цинка и 1,26% свинца. После добычи 60 тыс. т руды добыча была прекращена из-за неготовности цеха для гидрометаллургической переработки концентратов. При подземном выщелачивании рудное тело разделяют на секции, в которых балансовая руда одним из вариантов традиционной системы извлекается и выдается на земную поверхность в объеме около 40% от запасов из условия создания компенсационного пространства для дробления оставшейся части балансовой и забалансовой руды.

Важной составной частью проекта является поиск и обоснование новых технологий подготовки складочных смесей [Дмитрак, 2000; Дмитрак, Вержанский, 2000; Дмитрак и др., 2007].

В хвостах обогащения руд доля неизвлеченных компонентов от их количества в исходной руде составляет, %: цинка 26-47; свинца 23-39; молибдена 19-53; меди

13-36. Показатель извлечения основных полезных ископаемых составляет 65-78%, а попутных элементов – от 10 до 30%. Практически не извлекаются редкоземельные металлы In, Ga, Tl, Bi, Hg.

Хвосты обогащения комплексных руд содержат перспективные для рентабельной переработки концентрации ценных и редких металлов.

В число крупных техногенных месторождений рудного минерального сырья входят хвосты обогащения Садона и шлаки металлургического завода Электроцинк. Суммарная ценность металлов в них сопоставима с ценностью потенциальных ресурсов минерального сырья в недрах.

Целью проекта становится не эффективное извлечение запасов месторождения с точки зрения сегодняшней конъюнктуры традиционными способами, а получение максимального дохода от освоения месторождения в течение всего срока эксплуатации.

Оптимизация геомеханического воздействия процессов разработки на окружающую среду сопряжена с исследованиями состояния сырьевой базы приготовления закладочных смесей [Дмитрак и др., 2006; Емельяненко, 2011].

Эффективность использования некондиционных руд и хвостов обогащения для управления массивом складывается из экономии труда и материалов при подземных работах. Оптимизация влияния напряжений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок уменьшает разубоживание руд породами и снижает опасность травмирования работающих отслаивающимися породами. При одинаковых затратах на разведку и вскрытие месторождений увеличивается объем добычи и прибыль предприятия [Burdzieva et al., 2015; Golik et al., 2015b].

Результаты исследования коррелируют с выводами специалистов обозначенного профиля в аналогичных условиях [Ben-Awuah et al., 2016; Goodarzi, Oraee-Mirzamani, 2011; Chen G. et al., 2015; Snelling et al., 2013; Wang et al., 2015; Zhou et al., 2015].

## ВЫВОДЫ

Для вмещающих пород Садонских месторождений характерно перераспределение напряжений, в том числе, в геодинамическом режиме. Управление геодинамикой рудовмещающих пород путем регулирования величины напряжений в рудовмещающих массивах требует использования искусственных массивов из хвостов технологических процессов.

Традиционные технологии разработки месторождений Садонской группы не обеспечивают действенного управления геомеханикой массива, поэтому убыточны и опасны для окружающей среды. Технологиями, позволяющими извлекать металлы на основе рационального управления геомеханикой массива, являются варианты с закладкой технологических пустот твердеющими смесями и хвостами подземного выщелачивания руд.

Отработка вовлекаемых в производство некондиционных руд и хвостов обогащения запасов и доработка имеющихся запасов должна осуществляться по комбинированной схеме. Ценные руды извлекаются в первую очередь с закладкой пустот твердеющими смесями. Руды с меньшим содержанием металлов выщелачиваются на месте залегания с использованием хвостов подземного выщелачивания для управления напряжениями, путем перераспределения техногенных напряжений, а также изменяющихся под влиянием работ природных напряжений.

## Литература

1. Дмитрак Ю.В. Теория движения мелющей загрузки и повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения горных пород. // Автореферат дис. доктора технических наук / Московский гос. горный ун-т. – М. – 2000.
2. Дмитрак Ю.В., Вержанский А.П. Тенденции применения оборудования для тонкого измельчения горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №6. – С. 184-188.
3. 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.
4. Дмитрак Ю.В., Зиновьева Т.А., Сычёв Н.Н. Использование системы msc. Nastran для оптимизации силовой конструкции вибрационной мельницы. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №4. – С. 295-299.
5. Емельяненко, Е.А. Исследование технологических свойств техногенных объектов медно-колчеданных месторождений [Текст] / М.В. Рыльникова, Е.А. Горбатова, Е.А. Емельяненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №6. – С. 148-156.
6. Чотчаев Х.О., Колесникова А.М., Майсурадзе М.В., Шепелев В.Д. Физические поля как производные деформации горного массива и технология их мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №4. – С. 179-190.
7. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2016. – Vol. 26. Iss. 6. – Pp. 1065-1071.
8. Borshevsky S.V., Kachurin N.M., Burdzieva O.G., Golik V.I. Prospects for extraction of metals from mine waste water. // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2017. – Т. 9. No. 1. – Pp. 81-91.
9. Burdzieva O., Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Modelling of rock massifs tension at underground ore mining. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Т. 7. No. 8. – Pp. 540-543.
10. Chen G., Chen J., Peng J. Effect of mechanical activation on structural and microwave absorbing characteristics of high titanium slag. // Powder Technology. – 2015. – Vol. 286. – Pp. 218-222.
11. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015a. – Т. 7. No. 4. – Pp. 321-324.
12. Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015b. – Т. 7. No. 5. – Pp. 401-405.
13. Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V., Burdzieva O.G. Metal extraction in the case of non-waste disposal of enrichment tailings. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015c. – Т. 7. No. 10. – Pp. 213-217.
14. Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V., Zaalishvili V.B. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015d. – Т. 7. No. 4. – Pp. 325-329.
15. Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V., Burdzieva O.G. Simulation of rock massif tension at ore underground mining. // Metallurgical and mining industry. – 2016. – Vol. 7. – Pp. 76-79.
16. Golik V.I., Lukyanov V.G. Optimization of filling mixture strength considering rock intensity. // In: Environmental geotechnologies in mining. – Belgorod. – 2013. – 195 p.
17. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. // 30<sup>th</sup> International Conference on Ground Control in Mining. – 2011. – Pp. 74-79.

18. Snelling P.E., Godin L., McKinnon S.D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 58. – Pp. 166-179.

19. Wang N., Wan B. H., Zhang P., Du X. L. Analysis on deformation development of open-pit slope under the influence of underground mining. // *Legislation, Technology and Practice of Mine Land Reclamation: Proceedings of the Beijing International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration (LRER 2014)*. – London: Taylor & Francis Group, 2015. – Pp. 53-58.

20. Zhou C., Gong Z., Hu J., Cao A., Liang H.A. Cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China. // *Waste Management*. – 2015. – Vol. 35. – Pp. 191-198.

## References

1. Dmitrak Yu. V. The theory of the movement of grinding feed and increasing the efficiency of equipment for fine grinding of rocks. Abstract of doctoral thesis (technical sciences). Moscow State Mountain University. Moscow. 2000. (In Russ.)

2. Dmitrak Yu. V., Verzhanskii A. P. Trends in the use of equipment for fine grinding of rocks. *Mountain Information and Analytical Bulletin*. 2000. No. 6. pp. 184-188. (In Russ.)

3. Dmitrak Yu. V., Logacheva V. M., Podkolzin A. A. Geophysical prediction of disturbance and watering of the rock massif. *Mountain Information and Analytical Bulletin*. 2006. No. 11. pp. 35-36. (In Russ.)

4. Dmitrak Yu. V., Zinov'eva T. A., Sychev N. N. Using the msc. Nastran system to optimize the power structure of the vibratory mill. *Mountain Information and Analytical Bulletin*. 2007. No. 4. pp. 295-299. (In Russ.)

5. Emelianenko E. A. Research of technological properties of technogenic objects of copper-pyrite deposits. Rynnikova M. V., Gorbatoeva E. A., Emelianenko E. A. *Mountain Information and Analytical Bulletin*. 2011. No. 6. pp. 148-156. (In Russ.)

6. Chotchaev Kh. O., Kolesnikova A. M., Maisuradze M. V., Shepelev V. D. Physical fields as derivatives of rock mass deformation and technology for their monitoring. *Geology and geophysics of Russian South*. 2018. No. 4. pp. 179-190. (In Russ.)

7. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26. Issue 6. pp. 1065-1071.

8. Borshevsky S. V., Kachurin N. M., Burdzieva O. G., Golik V. I. Prospects for extraction of metals from mine waste water. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017. T. 9. No. 1. pp. 81-91.

9. Burdzieva O., Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Modelling of rock massifs tension at underground ore mining. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol. 7. No. 8. pp. 540-543.

10. Chen G., Chen J., Peng J. Effect of mechanical activation on structural and microwave absorbing characteristics of high titanium slag. *Powder Technology*. 2015. Vol. 286. pp. 218-222.

11. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015a. Vol. 7. No. 4. pp. 321-324.

12. Golik V. I., Komashchenko V. I., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015b. T. 7. No. 5. pp. 401-405.

13. Golik V. I., Komashchenko V. I., Morkun V., Burdzieva O. G. Metal extraction in the case of non-waste disposal of enrichment tailings. *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015c. T. 7. No. 10. pp. 213-217.

14. Golik V. I., Komashchenko V. I., Morkun V., Zaalishvili V. B. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015c. T. 7. No. 4. pp. 325-329.

15. Golik V. I., Komashchenko V. I., Morkun V., Burdzieva O. G. Simulation of rock massifs tension at ore underground mining. *Metallurgical and mining industry*. 2016. Vol. 7. pp. 76-79.

16. Golik V.I., Lukyanov V.G. Optimization of filling mixture strength considering rock intensity: In: Environmental geotechnologies in mining. Belgorod. 2013. 195 p.

17. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. 30<sup>th</sup> International Conference on Ground Control in Mining. 2011. pp. 74-79.

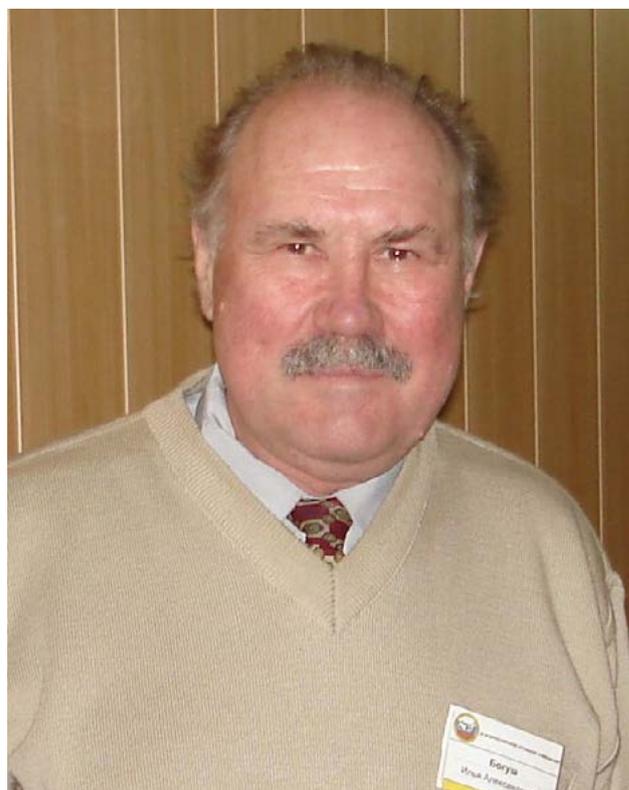
18. Snelling P.E., Godin L., McKinnon S.D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. pp. 166-179.

19. Wang N., Wan B. H., Zhang P., Du X. L. Analysis on deformation development of open-pit slope under the influence of underground mining. *Legislation, Technology and Practice of Mine Land Reclamation: Proceedings of the Beijing International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration (LRER 2014)*. London: Taylor & Francis Group. 2015. pp. 53-58.

20. Zhou C., Gong Z., Hu J., Cao A., Liang H.A. Cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China. *Waste Management*. 2015. Vol. 35. pp. 191-198.

## ЮБИЛЕИ

## Илье Александровичу Богушу – 85 лет!



Удивительная штука жизнь. Множество выдающихся людей, ученых скромно живут на Земле, абсолютно не выделяясь из общей массы, хотя своим повседневным трудом и научной деятельностью вносят огромный вклад в развитие геологической науки и воспитание молодежи – будущего нашей страны.

Одним из таких выдающихся ученых, воспитателем молодежи является геолог, эколог, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры «Прикладная геология» Южно-Российского государственного политехнического университета (Новочеркасского политехнического института) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ)) Илья Александрович Богуш, которому 10 июня 2020 г. исполнилось 85 лет.

Свою трудовую деятельность Илья Александрович Богуш начал в 1958 г. после окончания Новочеркасского политехнического института в Оренбургском геологическом управлении, где работал коллектором, геологом и в последствие начальником отряда. Была перспектива роста в этом направлении, но пылкость ума и стремление к новым познаниям в области геологии привели И. А. Богуша в научную среду. Он увлекся наукой и с 1961 г. связал свою судьбу с Новочеркасским политехническим институтом, где в этот же год поступил в аспирантуру НПИ. На основе имеющегося небольшого опыта работы в геологическом управлении и стремление познать новое в области минералогии позволило И. А. Богушу в кратчайший срок защитить кандидатскую и в скорости докторскую диссертации.

Учитывая высокий уровень познаний в области геологических наук, а также его авторитет, как ученого практика среди студенческой семьи, руководство университета утверждает И. А. Богуша в качестве заведующего кафедрой общей и исторической геологии, минералогии и петрографии, которую он возглавлял с 1992 г. по 2011 г.

Заслуги И. А. Богуша в подготовке кадров, развитии науки и техники неоднократно отмечались правительственными наградами: медалью к ордену «За заслуги перед Отечеством» 2-й степени, нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования России», «Отличник разведки недр», «Заслуженный профессор ЮРГТУ (НПИ)». Ему присвоены почетные звания «Заслуженный работник высшей школы РФ» и «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Он также широко известен научной общественности как специалист в области металлогении и минералогии месторождений полезных ископаемых, является автором более 400 научных работ, в том числе 6 монографий и 5 учебников и учебных пособий.

Научные разработки И. А. Богуша стали теоретической основой генетической и онтогенетической минералогии, были применены в геологии рудных месторождений. Фактически было создано новое направление исследований и новая научно-педагогическая школа минералофизики. Многолетние минералофизические исследования колчеданных руд Урала и Кавказа привели к созданию теории онтогенеза месторождений и разработке параметрических поисковых критериев и количественного прогноза колчеданного оруденения. Более 20-ти лет профессор И. А. Богуш возглавляет исследования благородного оруденения (золото, платиноиды) Северного Кавказа. Прецизионные микроминералогические исследования позволили впервые обнаружить минералы платиновой группы в черносланцевых формациях северокавказского региона. Результатом этих работ является установление перспектив Северного Кавказа как новой продуктивной черносланцевой провинции России.

И. А. Богуш – человек неравнодушный, с активной гражданской позицией. Он принимал участие в ФЦП «Экологическая безопасность России» в качестве научного руководителя исследований экологически неблагоприятных урбанизированных территорий. Его опыт минералого-геохимического анализа природных объектов, примененный для исследований окружающей среды г. Новочеркаска, позволил обосновать новую, пионерскую методику комплексной оценки городов с высокой степенью экологической напряженности.

Илья Александрович также известен как общественный деятель и проводник геолого-минералогических знаний. Длительное время он возглавлял Северо-Кавказское отделение Российского минералогического общества, являлся директором геологического музея университета.

И. А. Богуш – действительный член российской Академии естественных наук (РАЕН), Международной академии высшей школы.

В свои 85 лет он полон творческих сил, с завидным энтузиазмом передает свои знания студенческой молодежи, руководит аспирантами, организует и участвует в полевых экспедициях.

От лица коллег, друзей и товарищей поздравляем глубокоуважаемого Илью Александровича с 85-летием и желаем ему здоровья, долгих лет жизни, простых человеческих радостей и новых творческих свершений!

## Владимиру Ивановичу Голику – 80 лет!



**Голик Владимир Иванович** – главный научный сотрудник Отдела геологии, гидрогеологии и геоэкологии Геофизического института – филиала Владикавказского научного центра Российской академии наук, доктор технических наук, профессор.

1 мая 1940 г. в станице Васюринская Динского района Краснодарского края родился известный Горняк, Ученый, Педагог, Человек с большой буквы – Голик Владимир Иванович.



*Главный инженер рудника Ишимский. 1973 г.*

В 1957 г. В. И. Голик окончил с золотой медалью среднюю школу в с. Трехсельское Успенского района Краснодарского края. В 1962 г. окончил Северо – Кавказский горнометаллургический институт, получив звание «горный инженер» по специальности «разработка месторождений полезных ископаемых». Начал трудовую деятельность в Садонском свинцово-цинковом комбинате, где в 1962-1966 гг. прошел ступени горного линейного надзора: горный мастер, начальник участка, зам. главного инженера рудника.

В 1966-1990 г. В. И. Голик работал на горных предприятиях Первого Главного Управления Министерства среднего машиностроения СССР в должностях: начальник участка, главный инженер рудника, зам. начальника ПТО Целинного горно-химического комбината (Казахстан), начальник ПТО Приаргунского горно-химического комбината (г. Краснокаменск, Читинской области), главный инженер рудоправления № 4 Целинного горно-химического комбината (п. Красногорск, Тургайской обл.).

В период освоения урановых месторождений Северного Казахстана В. И. Голик участвовал в разработке технологий добычи руд, в частности, с управлением состоянием массива закладкой пустот твердеющими смесями из отходов горного и смежных производств, технологии добычи металлов выщелачиванием, создании и освоении буровой и доставочной техники нового поколения с электрогидрофицированным приводом и др. Руководил проходкой горной выработки одним забоем сечением 7,4 м<sup>2</sup> со скоростью 805,2 метров в месяц, что было на тот период мировым прорывом. Участвовал в общественной жизни. Так, он был членом Президиума общества «Знание» Казахской ССР и председателем общества «Знание» г. Степногорск Казахской ССР.

В. И. Голик без отрыва от производства защитил диссертации: – кандидатскую «Исследование и усовершенствование систем разработки и технологии очистной выемки рудных тел средней мощности со сложной морфологией», Москва, 1974, ВНИИХТ и – докторскую «Технологии погашения выработанного пространства с сохранением земной поверхности при разработке сложно-структурных месторождений», Москва, 1990, МГРИ.

В 1991 г. на альтернативной основе В. И. Голик был избран деканом горно-геологического факультета СКГТУ, где проработал в течение 15 лет. В 2006-2008 гг. работал заведующим кафедрой «технология разработки месторождений».



*Председатель общества «Знание»  
и инструктор ГККПСС*



*Декан горно-геологического факультета СКГМИ (ГТУ), 1995 г.*

В настоящее время Голик В. И. – главный научный сотрудник отдела геологии, гидрогеологии и геоэкологии Геофизического института ВНЦ РАН, профессор кафедры Северо-Кавказского государственного технологического университета, профессор кафедры Южно-Российского государственного технологического университета. За время работы в Вузах и НИИ принимал активное участие в проектировании и осуществлении проектов горного направления (например, проходка Зарамагского водопроводного комплекса). Направления научной деятельности: управление состоянием рудовмещающих массивов при добыче руд, добыча металлов подземным, кучным и скважинным выщелачиванием, утилизация отходов горной добычи и переработки с повышением качества компонентов подготовкой в активаторах, проходка горных выработок скоростными темпами, горная экология, природоохранная техника и технология, экономика недродопользования. Основатель нового научного направления «утилизация отходов переработки руд с извлечением металлов выщелачиванием в дезинтеграторе».

В. И. Голик – автор более 1000 научных трудов, в том числе, около 70 монографий, учебников и учебных пособий, 35 патентов и авторских свидетельств на изобретения, а также 4 прелестных поэтических сборников и искренних книг «Горняки урановой империи» и «Осетия глазами друга».

В. И. Голик – действительный член Российской Академии горных наук, Российской академии естественных наук, Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Он член диссертационных советов СКГТУ, ЮРГТУ и ГГНТУ. Он был научным консультантом и научным руководителем 40 докторов и кандидатов наук, соответственно.

В. И. Голик – заслуженный деятель науки Российской Федерации и РСО – Алания, Почетный работник высшего профессионального образования РФ. Полный кавалер знака «Горняцкая слава», Ветеран атомной промышленности, Почетный член Союза горняков и металлургов Саксонии. Заслуженный профессор ЮРГТУ,

ЮИМ, Экибастузского ИТИ, СКГТУ, Действительный член РАГН, РАЕН, МАНЭБ, член редколлегии журналов: «Известия Тул ГУ», «Известия ТПГУ», «Устойчивое развитие горных территорий», «Безопасность труда в промышленности», «CSITA»(Украина), «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений», «Известия УГГУ», «Маркшейдерия и недропользование», «Актуальные проблемы горного дела», «Вектор геонаук», он – Федеральный эксперт научно-технической сферы.

В. И. Голик имеет следующие общественные награды: медаль в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина (1970 г.), Знак «Победитель социалистического соревнования» (1973 г.), Медаль имени В. А. Легасова (1999 г.), Орден «Звезда ученого» (МАНЭБ) (2002 г.), Медаль «100 лет профсоюзам России», (2008 г.).

В. И. Голик был руководителем грантов: «Исследование и разработка инновационных технологий комбинированной механохимической активации извлечения металлов из некондиционного сырья», «Снижение риска и уменьшения последствий техногенных катастроф путем создания экологически безопасных технологий разработки техногенных месторождений с добычей из них полезных компонентов методами механохимической активации», «Разработка безотходных экологически безопасных способов добычи и переработки руд месторождений Северного Кавказа на основе комбинирования традиционных и инновационных технологий», «Разработка инновационных технологий повышения качества твердого, жидкого и сыпучего минерального сырья активацией в дезинтеграторах, с целью решения проблемы утилизации отходов добычи, снижающих негативное влияние на окружающую среду».

В. И. Голик женат. Имеет двоих детей 1962 и 1968 г. рождения, 4 внуков и одного правнука. Отличается любовью к земле: в годы развития садово-огородных кооперативов в начале 90-х прошлого столетия имел один из лучших участков в кооперативе СКГМИ в Северной Осетии и даже был героем местной телевизионной Программы. Наконец, обладая ярким и брызжущим жизнью юмором и генетической благородно-аристократической сутью и статью, Владимир Иванович – бессменный и непререкаемый руководитель традиционных осетинских застольных церемоний, мужских, шахтерских, да и просто товарищеских компаний в Северной Осетии и далеко за ее пределами (Китай, США, Израиль и т. д.).

От лица коллег, соратников, друзей, товарищей и учеников поздравляем глубокоуважаемого и нашего дорогого Владимира Ивановича Голика с 80-летием и желаем ему здоровья, долгих лет жизни, простых человеческих радостей и новых творческих свершений!

## Сергею Григорьевичу Параде – 70 лет!



**Парада Сергей Григорьевич** известен как специалист в области геологии, геохимии рудных месторождений и металлогении. Он является автором более 200 научных и учебно-методических работ, в том числе 2 монографий и 1 справочника. В своих работах Парада С.Г. на обширных геологических, металлогенических, геофизических и геохимических материалах впервые обосновал выделение первичных золоторудных (рудоподготовительных) систем, обеспечивающих дальнейшее золотое оруденение черносланцевых формаций.

Родился С.Г. Парада в г. Батайске Ростовской области. В 1968-1970 служил в рядах Советской армии.

В 1975 г. с отличием окончил Ростовский государственный университет по специальности «геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых», квалификация «инженер-геолог». По распределению был направлен в Дальневосточный институт минерального сырья Министерства геологии СССР (г. Хабаровск), где прошел трудовой путь от инженера до старшего научного сотрудника, участвовал в научно-исследовательских работах по изучению и переоценке месторождений различных полезных ископаемых в качестве начальника полевого отряда, ответственного исполнителя и руководителя НИР, был ученым секретарем научно-методического и ученого советов, участвовал в открытии золоторудного месторождения Маломыр в Амурской области. За открытие неизвестной ранее золотоносной россыпи в пределах Софийского прииска (Хабаровский край) награжден Премией Всесоюзного научно-технического горного общества.

С 1986 г. С.Г. Парада руководил геологоразведочными работами и разработкой полезных ископаемых в Социалистической Республике Вьетнам в должности главного инженера-геолога. За эффективное руководство оценкой и освоением месторождения Чай Кау награжден медалью Правительства этой страны.

С 1988 г. С.Г. Парада занимался подготовкой и повышением квалификации геологических кадров в Ростовском государственном университете, где прошел все ступени от преподавателя до профессора. В 1989 г. он назначен деканом факультета повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства геологии СССР при Ростовском университете. С 1991 по 2001 год – дважды избирался деканом геолого-географического факультета Ростовского госуниверситета.

В этот период он является председателем ученого совета факультета, членом президиума учебно-методического объединения университетов России, членом межведомственной (Минобразования и МПР) комиссии по геологическому образованию, членом ученого совета РГУ. За большой вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов С. Г. Парада награжден Почетной грамотой Министерства образования РФ.



С. Г. Парада принимал активное участие в крупных народнохозяйственных разработках и научно-технических программах, в том числе «Платина России», «Университеты России» и др., а также в международных проектах ЮНЕСКО «Металлоносные черные сланцы» (1985-1986 гг.), TACIS «Подготовка кадров в области управления охраной окружающей среды» (1997-2000 гг.), CRDF «Научно-образовательный эколого-аналитический центр Юга России» (1999-2002 гг.) и др.



С 2004 г. по настоящее время С. Г. Парада проводит работы по научному обеспечению поисков и оценки месторождений золота на Юге России. С 2007 по 2012 г. являлся главным геологом ООО «Каббалкгеологи». В 2009 г. под его руководством был обоснован проект по поискам рудного золота в Восточной части Передового хребта. В 2010 г. под его руководством и непосредственном участии открыта группа перспективных золоторудных проявлений, объединенных им в Гитче-Тырныаузское рудное поле. По количеству подсчитанных ресурсов золота это рудное поле соответствует крупному месторождению. В 2011 г. за полученные результаты Парада С. Г. награжден нагрудным знаком «Отличник разведки недр» Министерства природных ресурсов РФ.



С 2012 г. С. Г. Парада работает в Южном научном центре РАН в качестве заведующего отделом геологии, нефтегазовых и водных ресурсов, заместителем председателя ЮНЦ РАН. В настоящее время после укрупнения структуры ЮНЦ отдел преобразован в лабораторию региональной геологии. В ЮНЦ РАН С. Г. Парада осуществляет планирование, руководство и непосредственное выполнение НИР по изучению вещественно-структурных неоднородностей геологических формаций, разработке научно-методических основ моделирования, прогнозирования и технологий освоения месторождений полезных ископаемых юга России, освоения новых источников природного и техногенного сырья.

С 2017 г. С. Г. Парада работает по совместительству гл. н. с. в Геофизическом институте ВНЦ РАН, где проводит работы по исследованию минерально-сырьевой базы Северного Кавказа и разработке новых методов и технологий применения геофизических данных при прогнозе, поисках и оценке полезных ископаемых.

С. Г. Парада является наставником аспирантов (под его руководством защищено 6 кандидатских диссертаций), членом Совета по защите докторских диссертаций.

Сергей Григорьевич полон творческих сил, передает свои знания молодежи и активно работает на благо России.

От лица коллег, соратников, друзей, товарищей и учеников поздравляем глубокоуважаемого и нашего дорогого Сергея Григорьевича Параду с 70-летием и желаем ему здоровья, долгих лет жизни, простых человеческих радостей и новых творческих свершений!

## Юрию Константиновичу Чернову – 70 лет!



**Чернову Ю.К.** главному научному сотруднику Геофизического института – филиала Владикавказского научного центра РАН 13 сентября 2019 года исполняется 70 лет.

Чернов Юрий Константинович родился 13 сентября 1949 г. в г. Ташкенте Узбекской ССР. В 1957 г. поступил в первый класс средней школы №2 в г. Чирчике (пригород Ташкента). В 1967 г. поступил на геологический факультет Ташкентского Государственного Университета по специальности «Геофизика», который окончил в 1972 г. с отличием. В этом же году поступил на работу в Институт сейсмологии АН УзССР (г. Ташкент) на должность инженера в лабораторию «Сейсмического микрорайонирования», в которой проработал до 1990 г. в должностях младшего, старшего и ведущего научного сотрудника. В 1980 г. защитил в Институте физики Земли АН СССР диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук и в 1989 году – доктора физ.-мат. наук. В 1989 г. ему присвоено научное звание старшего научного сотрудника по специальности «Геофизика».

В 1990 г. по приглашению перевелся в Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения АН СССР (г. Южно-Сахалинск), где проработал до 1996 г. сначала по основному месту работы, затем по совместительству, в должности зав. лабораторией «Сейсмической опасности и риска». С 1993 г. по совместительству работал Южно-Сахалинском Государственном педагогическом институте (позже Сахалинском государственном университете), на кафедре физики, профессором. В 1994 г. переводом перешел туда на основную работу, на должность проректора по научной работе и профессора. В 1996 г. получил звание профессора.

В 1996 г. по приглашению перевелся в Северо-Кавказский филиал ПНИИИС Госстроя России (г. Ставрополь) на должность зам. директора по научной работе и зав. лабораторией «Инженерной сейсмологии», где по основному месту работы, а затем по совместительству работал до 2016 г. В 2006-2011 гг. работал главным научным сотрудником ПНИИИС Минстроя РФ (г. Москва). С 1998 г. по 2011 г. работал профессором на строительном факультете СевКавГТУ. В период с 1995 г. по настоящее время по контрактам и по совместительству работал в отечественных и зарубежных компаниях в должностях эксперта-консультанта, гл. сейсмолога, гл. геофизика.

С 2017 г. по настоящее время работает главным научным сотрудником Геофизического института ВНЦ РАН (г. Владикавказ).

В течение 48 лет профессионально занимается научными исследованиями и проектными разработками в области инженерной сейсмологии, прогноза долговременной сейсмической опасности и сейсмического риска, сейсмического районирования и микрорайонирования, оценок природных и техногенных опасностей и рисков, связанных с землетрясениями (разжижение грунтов, просадки, оползни).

Является автором метода вероятностного прогнозирования возможных сейсмических воздействий, успешно примененного для сейсмического районирования разных масштабов (ОСР, ДСР, СМР) и расчетов сейсмического риска в Узбекистане (Приташкентский район, Ферганская долина, Западный Узбекистан и др.), на Дальнем Востоке, на Кавказе, в Северной Африке, на Тайване и других районах мира. В частности на основании этих разработок в 1990 г. впервые выявлена недооценка нормативными документами СССР сейсмической опасности на Сахалине, что затем подтвердилось Нефтегорским землетрясением 1995 г.

Чернов Ю. К. один из основных исполнителей Государственной программы РФ по изучению сейсмичности северо-восточной Евразии, а также Государственной программы РФ по повышению безопасности строительства и других действий в сейсмоактивных районах.

Им разработано свыше 20 карт сейсмического микрорайонирования территорий городов и крупных объектов в Республике Узбекистан, на Сахалине, Курильских островах, в Приморском, Хабаровском, Ставропольском и Краснодарском краях. Разрабатываются новые карты ДСР для территории Северной Осетии.

По заданию разработчиков сахалинских нефтегазовых проектов (Sakhalin Energy Investment Company Ltd., Exxon, Mobil) выполнены оценки возможных сейсмических воздействий на морские добывающие платформы и береговые сооружения. Разработаны критерии антисейсмического проектирования. Разработана комплексная инженерно-сейсмологическая программа Ставропольского края, в рамках которой произведены оценки вероятных параметров сейсмических воздействий и сейсмического риска для промышленных и гражданских объектов.

По заданию Госстроя России в рамках ФЦП «Сейсmobезопасность территорий России» разработаны усовершенствованные модели сейсмических воздействий и комплексная методика оценки сейсмической опасности и сейсмического риска для целей строительства, охраны окружающей среды, управления и других задач.

По заданию ОАО «Институт Мосгипротранс» им проведены оценки расчетных сейсмических воздействий на суше и на дне моря, а также вероятностей сейсмогенного разжижения грунтов оснований на участке проектируемого железнодорожного перехода через пролив Невельского для различных сочетаний предполагаемых вариантов расположения створов и конструктивных решений (мост, тоннель).

В настоящее время является научным руководителем и ответственным исполнителем, проводимых в ГФИ ВНИЦ РАН исследований по созданию новой версии Карты детального сейсмического районирования (ДСР) территории РСО-Алания.

Профессор Чернов Ю. К. автор 3 монографий и более 100 научных опубликованных статей в области инженерной сейсмологии.

За время работы в г. г. Ташкенте, Южно-Сахалинске входил в состав различных Советов и Комиссий при органах власти. Так в 1995 г. организовал и возглавил Консультативный совет при областной Думе, а затем при губернаторе Сахалинской области.

От лица коллег, друзей и товарищей поздравляем глубокоуважаемого Юрия Константиновича Чернова с 70-летием и желаем ему здоровья, долгих лет жизни, простых человеческих радостей и новых творческих свершений!

---

---

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ**

---

---

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

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

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

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

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

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

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

### Инструкция для авторов

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

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

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

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

### Правила оформления статьи

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

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

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$  и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и единицах измерений ( $\text{МВт/см}^2$ ) – прямым

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

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

#### Адрес редакции:

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

---

---

**INFORMATION FOR AUTHORS**

---

---

The journal “Geology and Geophysics of 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 Russian South».

### Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <http://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of Russian South».

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),

- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

### The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames, academic degrees and titles (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site [www.naukagor.ru](http://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  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$ , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements ( $\text{H}_2\text{O}$ ) and measurement units ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ ) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and  $\nu$ , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (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  
(№ 2. 2020 г. Том 10)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 10.06.2020 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода 27.06.2020 г.

Усл. печ. лист 20,7. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 61.

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