

ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

GEOLOGY
AND GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH

Том 10
№ 1 / 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
№ 1 / 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**, Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик
академик АНГ **Т.Л. Челидзе**, Институт геофизики им. М. Нодия, Грузия
член-корр. НАНА **Г.Д. Етирмишли**, Республиканский Центр Сейсмологической Службы при НАНА, Азербайджан
член-корр. РАН **Д.Р. Каплунов**, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва
член-корр. НАН РА **С.М. Оганесян**, Институт геофизики и инженерной сейсмологии АН РА, Армения
член-корр. РАН **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. **Г.П. Ганапати**, Центр по смягчению последствий стихийных бедствий и управлению, Технологический институт Веллуру, 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 – Верховье Геналдона (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. Hovhannisyan, Academician of National
Academy of Sciences of the Republic of Armenia (NAS
RA) A. Nazarov Institute of Geophysics and Engineering
Seismology of NAS RA, Armenia

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

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

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 – The upper reaches of Genaldon (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Герасимов В. Ю.

- Догерцинские габбро-диориты верховьев реки Кубань (Северный Кавказ):
геодинамическая типизация, геохимия и минералогия 6

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Бергер М. Г.

- О современном состоянии Колкинской (Кармадонской) проблемы
и его причинах 21

Гиоргобиани Т. В.

- Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы
Большого Кавказа 35

ГЕОФИЗИКА

Григорян А. Г., Лиходеев Д. А.

- Отклик локального геомагнитного поля на геодинамические процессы при
подготовке Спитакского землетрясения 1988 г. 43

Керимов И. А.

- Методы гравитационной томографии на основе F-аппроксимации 55

Пападопулос Т. Д., Алексопулос Дж. Д., Дилалос С.

- Комбинированные геоэлектрические и геоэлектромагнитные исследования
вклада в местный гидрогеологический режим – на примере бассейна
Дельфины (остров Хиос – Греция) 68

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ**Богуш И. А., Рябов Г. В., Черкашин В. И.**

- Генезис и рудоносные структуры Чучкурского месторождения
благородных металлов Северного Кавказа 81

Яроцкий Г. П., Чотчаев Х. О.

- Размещение и прогноз рудных районов юго-запада Корякского нагорья 96

ГЕОЭКОЛОГИЯ

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

- Эколого-экономическое обоснование возможности утилизации попутного
нефтяного газа на нефтяных месторождениях Российской Федерации 114

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА

Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В.

- Управление геомеханикой массива путем оптимизации
технологии разработки 127

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Gerasimov V. Yu.

Pre-Hercynian gabbro-diorites from Kuban river head (Northern Caucasus):
geodynamical typification, geochemistry and minerageny 6

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Berger M. G.

On the current state of the Kolka (Karmadon) problem and its causes..... 21

T. V. Giorgobiani

Stages, Mechanism and Geodynamics of Formation of the Folded System of the
Greater Caucasus 35

GEOPHYSICS

Grigoryan A. G., Likhodeev D. A.

The response of the local geomagnetic field to geodynamic processes during the
preparation of the 1988 Spitak earthquake 43

Kerimov I. A.

Methods of gravitational tomography based on F-approximation..... 55

Papadopoulos T. D., Alexopoulos J. D., Dilalos S.

Combined geoelectrical and geoelectromagnetic survey for contributing to local
hydrogeological regime – The case study of Delfini basin (Chios isl. – Greece)..... 68

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION

OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Bogush I. A., Ryabov G. V., Cherkashin V. I.

Genesis and ore-bearing structures of the Chuchukur noble metals deposit of the
North Caucasus..... 81

Yarotskii G. P., Chotchaev Kh. O.

The location and Potential Assessment of the Ore Regions in the South-Western
Part of the Koryak Highland 96

GEOECOLOGY

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

Ecological and economic justification of the utilization of associated petroleum gas
at oil fields of Russian Federation 114

GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS

Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V.

Management of massif geomechanics through optimization
of development technologies..... 127

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59060](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59060)

Оригинальная статья

Догерцинские габбро-диориты верховьев реки Кубань (Северный Кавказ): геодинамическая типизация, геохимия и минерагения

В. М. Газеев^{1, 2}, к. г.-м. н., А. Г. Гурбанов^{1, 2}, к. г.-м. н., В. Ю. Герасимов³¹Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Старомонетный пер., 35, г. Москва 119017, Российская Федерация;²Владикавказский научный центр Российской академии наук, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ 362027, Российская Федерация, e-mail: gazeev@igem.ru;³Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана Российской академии наук, Ленинский пр-т, д. 18, кор. 2, г. Москва 119071, Российская Федерация, e-mail: gera-igem2008@yandex.ru

Статья поступила: 02.12.2019, после рецензирования: 10.01.2020, принята к публикации: 13.01.2020

Резюме: Актуальность работы. Магматические породы на Большом Кавказе присутствуют в разрезах от ордовика до четвертичного периода. Выделены десятки разновозрастных магматических комплексов и свит содержащих вулканические породы приуроченных к узким структурно-формационным зонам. Однако геохимических исследований пород, на основе анализа распределения редкоземельных и редкометалльных элементов, все еще недостаточно и в первую очередь эта проблема касается раннепалеозойских образований. **Целью исследования** является получение (количественных) аналитических данных для расшифровки геодинамики раннего палеозоя. Объектом для исследований были выбраны тела догерцинских, огнейсованных габбро-диоритов «аманкольского» комплекса, распространенные в верховьях р. Кубань. **Методы.** Методы изучения, кроме геологического и петрографического описания, включали количественные RFA и ICP-MS анализы магматитов, рассмотрение геохимических характеристик, построение дискриминационных диаграмм, сравнение их с породами (эталоны) близких петрохимических типов, сформировавшихся в разнообразных геодинамических обстановках. **Полученные результаты и их обсуждение.** В результате комплексного изучения установлено, что габбро-диориты являются высокоглиноземистыми, умеренно титанистыми, умеренно магнезиальными породами извещково-щелочной серии. Предполагается, что исходный расплав основного состава образовался при невысокой (1-3%) степени плавления шпинелевых перидотитов. Низкие значения $Mg\#$ 0,42-0,54, и содержания Ni позволяют считать, что, в процессе эволюции расплава происходило фракционирование оливина и пироксенов. Несовместимые элементы в габбро-диоритах и REE, нормированные по N-MORB и хондриту, образуют спектры наклонных линий, расположенных между профилями OIB и E-MORB. La_n/Yb_n отношение в пределах 6,4-8,0. Порода характеризуется повышенными концентрациями LILE, LREE, MREE и элементов индикаторов флюидного субдукционного компонента – Ba, U, Sr. На петрогенетических диаграммах фигуративные точки габбро-диоритов тяготеют к полям островодужных толеитов, андезитов океанических островов или активных континентальных окраин. Негативные аномалии Nb, Ta, P, Ti, Hf указывают на то, что породы формировались в надсубдукционных условиях. **Выводы.** Сравнение габбро-диоритов с породами близких петрохимических типов, показало, что они хорошо сопоставимы с породами зрелых вулканических островных дуг. Геохимическая специализация пород «аманкольского» комплекса литофильно-халькофильная. На основании полученных результатов сделано предположение о том, что в силурийское время (450-400 млн лет назад), на севере «Палеотетиса» в Прото-Кавказском регионе существовала островодужная геодинамическая обстановка.

Ключевые слова: петрография, дискриминационные диаграммы, островодужная геодинамическая обстановка, минерагения.

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

Для цитирования: Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Герасимов В. Ю. Догерцинские габбро-диориты верховьев реки Кубань (Северный Кавказ): геодинамическая типизация, геохимия и минерагения. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (1): 6-20. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59060.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59060](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59060)

Original paper

Pre-Hercynian gabbro-diorites from Kuban river head (Northern Caucasus): geodynamical typification, geochemistry and minerageny

V. M. Gazeev^{1,2}, A. G. Gurbanov^{1,2}, V. Yu. Gerasimov³

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russian Federation;

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

³Mineralogical museum named A. E. Fersman, Russian Academy of Sciences, 18-2 Leninsky Avenue, Moscow 119071, Russian Federation, e-mail: gera-igem2008@yandex. ru

Received: 02.12.2019, revised: 10.01.2020, accepted: 13.01.2020

Abstract: The relevance of the work. Igneous rocks in the Greater Caucasus are present in sections from the Ordovician to the Quaternary. Dozens of different ages of magmatic complexes, confined to narrow structural and formation zones, are identified here. However, geochemical studies of rocks, based on an analysis of the distribution patterns of rare-earth and rare-metal elements, are still insufficient and this problem primarily concerns the Early Paleozoic formations. **Object.** In connection with this object, the bodies of pre-Hercynian, fire-bound gabbro-diorites of the "Amankol" complex, locally distributed in the upper part of Kuban river, were selected for research. **Methods.** The research methods, in addition to geological and petrographic descriptions, included quantitative RFA and ICP-MS analyzes of magmatites, consideration of geochemical characteristics, construction of discriminatory diagrams, their comparison with rocks (samples) of similar petrochemical types formed in various geodynamic settings. **Results.** As a result of a comprehensive study, it was found that gabbro-diorites are high-alumina, moderately titanitic, moderately magnesian rocks of the calc-alkaline series. It is assumed that the initial melt of the basic composition was formed at a low (1-3%) degree of melting of spinel peridotites. The low values of Mg # 0.42-0.54, and the Ni content suggest that, during the evolution of the melt, olivine and pyroxenes were fractionated. Incompatible elements in gabbro-diorite and REE, normalized to N-MORB and chondrite, form slanted line spectra located between the OIB and E-MORB profiles, La^u/Yb^u ratio in the range of 6.4-8.0. The rock is characterized by increased concentrations of LILE, LREE, MREE and elements indicators of the fluid subduction component – Ba, U, Sr. On the petrogenetic diagrams, the figurative points of gabbro-diorites gravitate toward the fields of island-arc tholeiites, andesites of oceanic islands, or active continental margins. Negative anomalies of Nb, Ta, P, Ti, Hf indicate that rocks were formed under suprasubduction conditions. Comparison of gabbro-diorites with rocks of similar petrochemical types showed that they are well comparable with the rocks of mature volcanic island arcs. Geochemical specialization of rocks of the "Amankol" complex is lithophilic-chalcophilic. Based on the results obtained, it was assumed that in the Silurian time (450-400 million years ago), an island-arc geodynamic situation existed in the north of the Paleotetis in the Proto-Caucasian region.

Key words: petrography, geodynamical typification, geochemical specialization, minerageny.

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

For citation: Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Gerasimov V. Yu. Pre-Hercynian gabbro-diorites from Kuban river head (Northern Caucasus): geodynamical typification, geochemistry and minerageny. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (1):6-20. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59060.

Введение

В верховьях р. Кубани и устьевых частях ее притоков Аминкол, Даут, Джаланкол, Худес, среди средне-верхнерифейских метапесчанников, филлитов, амфибо-

В тектоническом плане ГД АК приурочены к Кубанскому тектоническому блоку Карачаево-Черкесского горст-антиклинория, расположенному во фронтальной части Скифской эпигерцинской плиты. Рассматривая историю геологического развития региона, с целью разобраться с какими региональными геодинамическими процессами связано появление рассматриваемых пород отметим, что наиболее полно эта история может быть воссоздана только начиная с позднегерцинского вре-

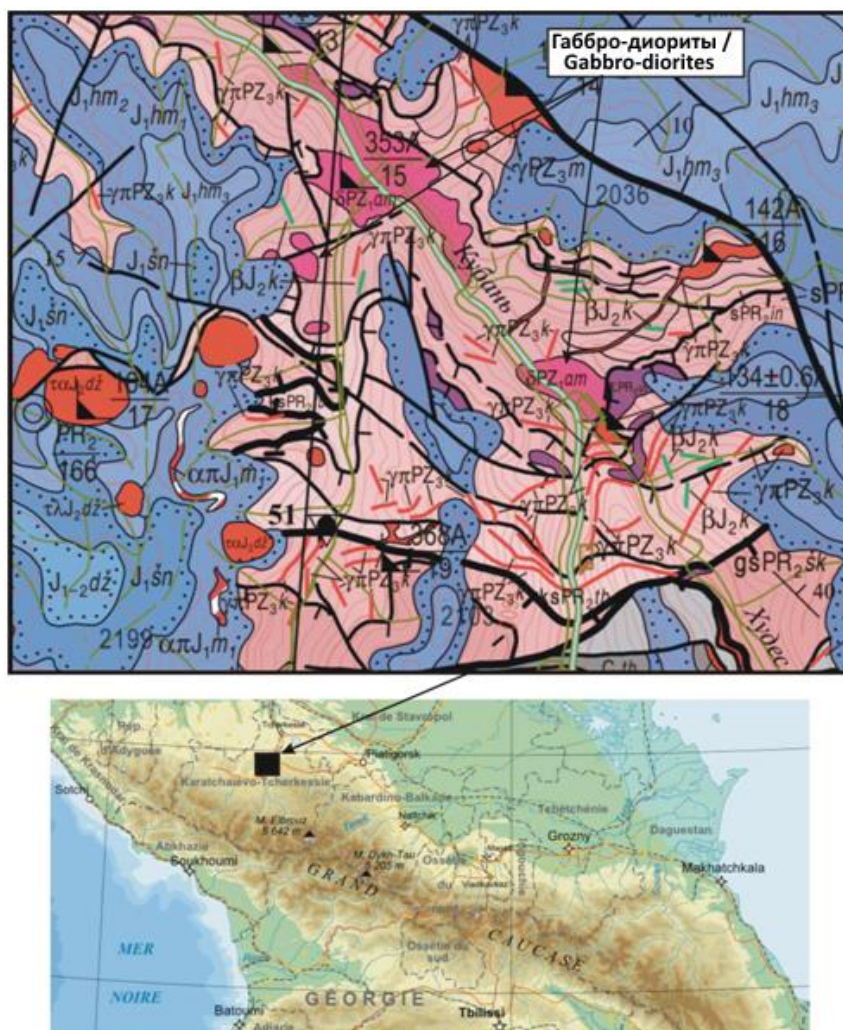


Fig. 1. Geological map with intrusive of gabbro-diorite composition on Kuban river head (according materials of FGUP 'Kavkazgeols'emka' listy K-38-I, VII, 2004)

мени. О раннегерцинском этапе известно лишь то, что в результате сближения и коллизии Предкавказского и Центрально Кавказского мегаблоков, их скучивания и шарьирования был создан первичный каркас Скифской эпигерцинской плиты (СП), с разделяющей их Армави́ро-Неви́номысской (Предкавказской) межблоковой шовной зоной. Считается, что в составе Центрально-Кавказского мегаблока были тектонически совмещены фрагменты Макерской, Буульгенской, Армовско-Шаукольской и Бечасынской континентальных микроплит и колчеданосных комплексов раннегерцинской Большекавказской островной дуги. Возникшая раннегерцинская покровно-складчатая расслоенная структура на этапе тектонического додавливания была рассечена системой субширотных разрывных нарушений сбросово-левосдвиговой морфологии. Раннегерцинская коллизия уже в карбоне плавно сменилась обстановкой активной окраины островодужного (андского) типа. С внедрением позднепалеозойских гранитных интрузивных комплексов происходила консолидация земной коры с окончательным оформлением фундамента молодой Скифской плиты. Догерцинская история развития региона менее изучена и различается в каждой из тектонически совмещенных микроплит [Письменный, и др., 2004]. В разные годы XX века ГД АК рассматривались в составе двух самостоятельных формаций: 1 – позднепалеозойской сиенит – диоритовой локализованной в зоне Передового хребта; 2 – раннепалеозойской габбро-сиенитовой, развитой в догерцинском кристаллическом субстрате Бечасынской зоны [Брюшкова, Красивская, 1977]. На государственных геологических картах Большого Кавказа изданных в конце XX и начале XXI веков раннепалеозойские магматические образования представлены породами аманчатского, туялинского и архызского комплексов. Их геохимическое изучение представляется актуальным для уточнения типов геодинамических процессов влиявших на региональные структуры в раннем палеозое. В настоящей публикации приведены результаты петролого-геохимического изучения огнейсованных ГД АК, рассмотрена их геодинамическая типизация и минерогения.

Цели и методы исследования. На государственных геологических картах Большого Кавказа изданных в конце XX и начале XXI веков раннепалеозойские (ордовик-силурийские) магматические образования представлены породами аманчатского, туялинского и архызского комплексов и вулканитами Карабекской и Даутской свит. Целью исследования является получение сопоставимых (количественных) аналитических данных и в последующем проведение корреляционного анализа для расшифровки геодинамики раннего палеозоя. **Объектом изучения** выбраны огнейсованные габбро-диориты «аманкольского» комплекса, локально распространённые в верховьях р. Кубани. Материалом для исследования послужила коллекция образцов собранная авторами в 2017 г. Из образцов изготовлены шлифы и проведено их петрографическое изучение. Аналитические работы выполнены в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика»: в 9 пробах проведены определения концентраций петрогенных и микроэлементов рентгено-флюоресценным анализом (*XRF*) на спектрометре «Респект-100»; рудных, редких и редкоземельных элементов, – методом спектроскопии с индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием (*ICP-MS*) на масс-спектрометре *X-Series II*. Использованы методики и условия анализов принятые в ЦКП «ИГЕМ – Аналитика» и ФГБУН ИГЕМ РАН. Точность анализа контролировалась путем измерения российских и международных стандартных образцов. На основании полученных результатов построены классификационные, дискриминационные диаграммы и графики. Проведено сравнение

концентраций элементов с породами (эталоны) близких петрохимических типов разнообразных геодинамических обстановок. Дополнительно, при построении диаграмм использованы химические анализы из литературных источников [Брюшкова, Красивская, 1977].

Краткая петрографическая характеристика пород

Обследованные участки интрузивных тел сложены равномерно – средне, либо крупнозернистыми габбро-диоритами, которые заметно деформированы и метаморфизованы, что выражается в их гнейсовидной текстуре и повсеместном развитии вторичных минералов. Микроструктура пород реликтовая габбровая (рис. 2-1). Первоначальная структура часто изменена до гетерогранобластической и нематобластической (рис. 2-2). Порода состоит из плагиоклаза (андезин) который наблюдается в виде широкопластинчатых, иногда зональных, заметно деформированных и сосюритизированных кристаллов, содержащих включения карбоната *in-situ*, в суммарном количестве плагиоклаз заметно преобладает над темноцветными минералами, которые представлены амфиболом, актинолитом, биотитом, флогопитом, хлоритом. В меньших количествах присутствуют эпидот, клиноцоизит, цоизит, кар-

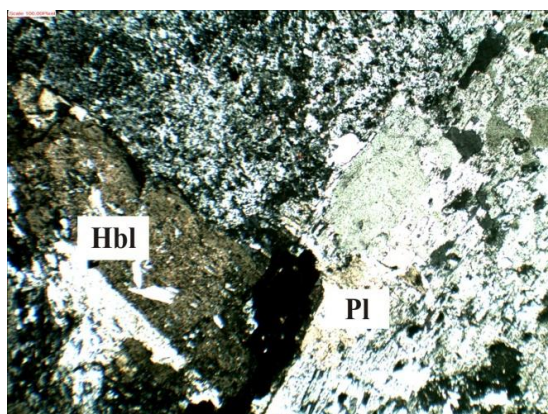


Рис. 2-1. Структура реликтовая габбровая. /
Fig. 2-1. Strcuture relict gabbro

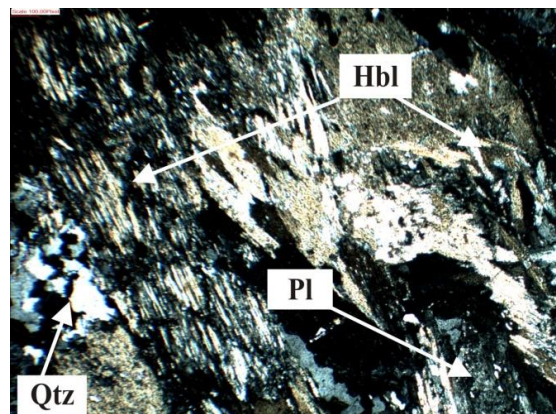


Рис. 2-2. Структура нематобластическая. /
Fig. 2-2. Nematoblastic strcuture

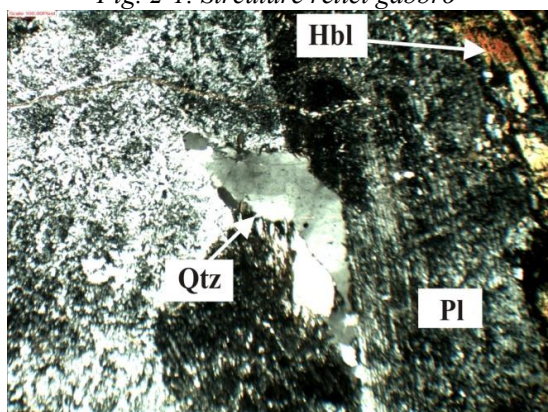


Рис. 2-3. Зерна кварца между кристаллами
плагиоклаза. /
Fig. 2-3. Grains of quartz between crystals of
plagioclase

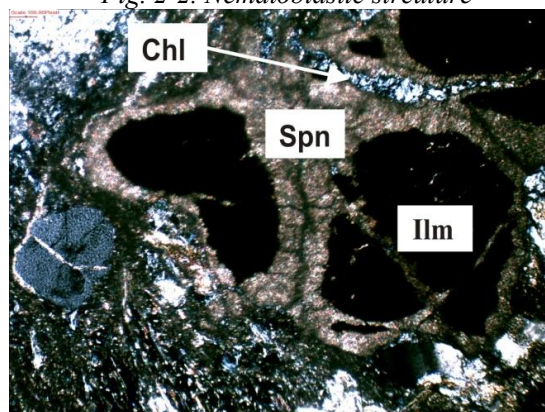


Рис. 2-4. Каемка сфена на кристаллах
ильменита. /
Fig. 2-4. Rim of sphene on the crystal of ilmenite

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

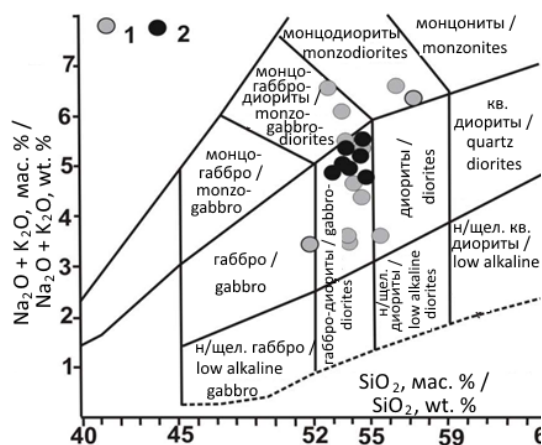


Рис. 3-1. $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$ /
Fig. 3-1. $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$

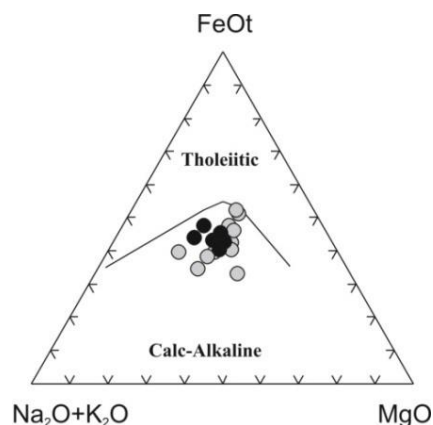


Рис. 3-2. $(Na_2O+K_2O)-FeOt-MgO$ /
Fig. 3-2. $(Na_2O+K_2O)-FeOt-MgO$

Рис. 3. Составы пород на классификационных диаграммах. Условные обозначения:

1 – анализы из публикаций; 2 – RFA. «ИГЕМ-Аналитика».

Fig. 3. Rocks composition on classificational diagram. Legend:

1 – analysis from articles; 2 – RFA. “IGEM-Analytica”

бонат, кварц, сфен, рутил, ильменит, лейкоксен, пирит, апатит. Крайне редко встречается моноклинный пироксен, замещаемый актинолитом, и циркон. Кварц отмечается в незначительных количествах и обычно он располагается между кристаллами деанортизированного плагиоклаза – на участках с реликтовой кристаллизационной структурой (рис. 2-3) и на участках с нематобластическим структурным узором. Зерна кварца обладают волнисто-дымчатым погасанием. Сфен образует каемки на кристаллах ильменита (рис. 2-4).

Петрохимические и геохимические характеристики пород

На классификационных диаграммах (рис. 3) фигуративные точки составов изученных пород АК преимущественно группируются в поле габбро-диоритов $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$ известково-щелочной серии $(Na_2O+K_2O)-FeOt-MgO$.

На диаграммах SiO_2 – петрогенные элементы (рис. 4) не отмечаются корреляционные тренды петрогенных оксидов из-за малого интервала по содержанию SiO_2 в рассматриваемой выборке. Габбро-диориты АК (табл. 1) являются высоко и умеренно титанистыми, высоко глиноземистыми $Al = 1,19-1,5$, умеренно магниальными $Mg\# 0,42-0,54$, умеренно калиевыми породами, с кали-натровым и натровым типом щелочности $Na_2O/K_2O = 2,3-7,4$. U/Th отношение варьирующее от 0,39 до 0,61 указывает на отсутствие изменений состава пород наложенными процессами. На петрогенетических и дискриминационных диаграммах фигуративные точки (ФТ) ГД АК расположены в полях пород следующих геодинамических обстановок: на диаграмме $TiO_2-MnO^*10-P_2O_5^*10$ [Mullen, 1983] (рис. 5-1) ФТ группируются вдоль границы полей толеитов островных дуг и андезитов океанических островов; на диаграмме $FeOt-MgO-Al_2O_3$, в поле базальтоидов вулканических дуг и активных континентальных окраин (рис. 5-2); на диаграмме $La/10-Y/15-Nb/8$ в поле известково-щелочных базальтов вулканических дуг [Cabanis, Lecolle, 1989] (рис. 5-3); на

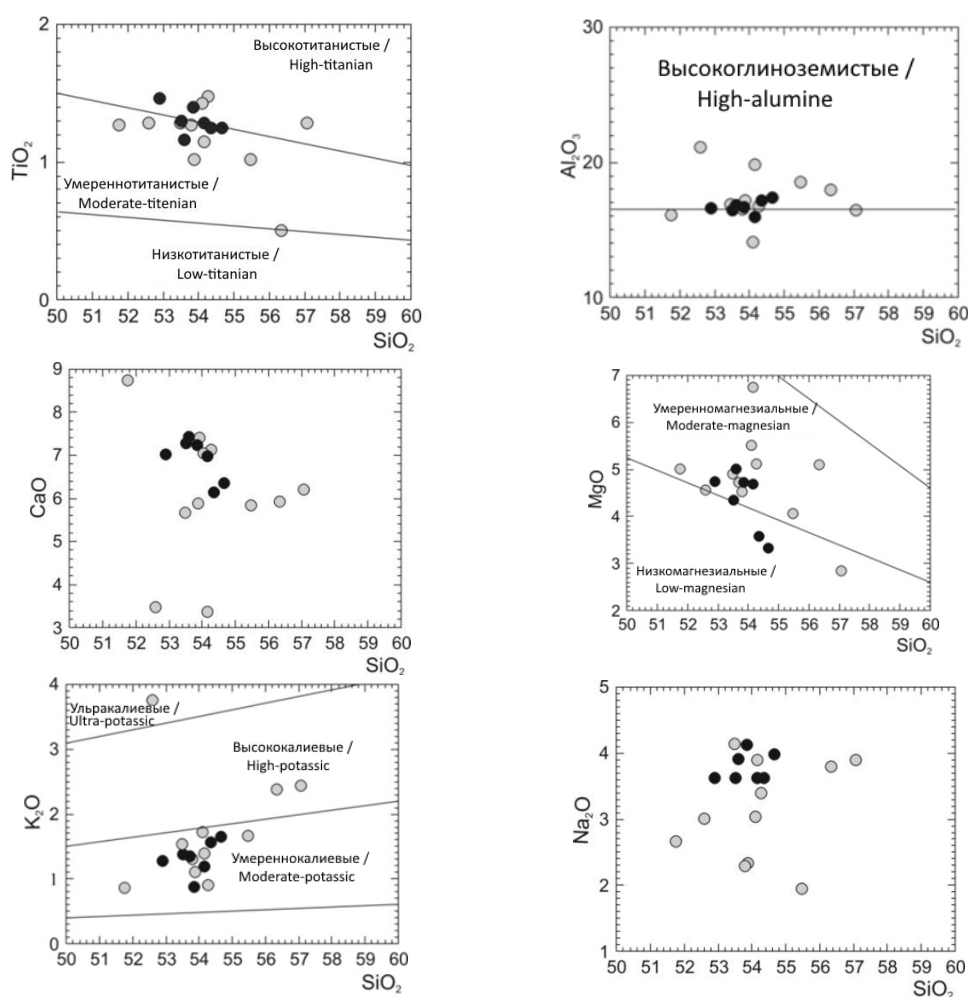


Рис. 4. Диаграммы концентраций петрогенных компонентов (в мас. %). Условные обозначения см. на рисунке 3. /
 Fig. 4. Diagrams of petrogenic components (in wt. %) concentration.
 Legend on Fig. 3.

диаграмме $Ba/Nb - La/Nb$ в поле базальтов вулканических дуг [Pang et al., 2013] (рис. 5-4); на диаграмме разграничения мантийных источников $Nb/Y-Zr/Y$ [Condie, 2005] (рис. 5-5) фигуративные точки сгруппированы в поле *OPB* – базальтов океанических плато и частично в поле (*IAB*, *ACMB*) – пород островных дуг и активных континентальных окраин, образуя область, простирающуюся от *PM* (компоненты примитивной мантии) к *EN* (компонента обогащенной мантии); на диаграмме $Sm/Yb-La/Sm$ (рис. 5-6) составы ГД АК группируются вблизи тренда плавления шпинелевых перидотитов [Школьник и др., 2009]. Ni/Co отношение для мантийных выплавов находится в пределах 2,5-5,0, а у ГД АК этот показатель варьирует в пределах 1,7-2,0.

Редкоземельные элементы (табл. 2) нормированные по хондриту [San, McDonough, 1989] образуют спектр наклонных линий, расположенных между профилями *OIB* и *E-MORB* (рис. 6). Концентрации *LREE* и *MREE* ближе к *OIB*. La^n/Yb^n отношение (показатель степени фракционирования *REE*) находится в пределах 6,4-8,0; $La^n/Sm^n - 2,1-2,7$; $Gd^n/Yb^n - 2,1-2,4$. Величина количественного дефицита

европия Eu/Eu^* ($Eu^* = (Sm^{II} + Gd^{II})/2$) составляет 0,86-1,04. Сумма REE составляет 131-147 г/т. Концентрации несовместимых элементов, нормированные по *N-MORB* [San, McDonough, 1989], образуют спектр состоящий из криволинейных линий, располагающихся между профилями *E-MORB* и *OIB*. Заметно обогащение пород крупноионными литофилами – *LILE*, *LREE*. Отмечается, что содержания элементов индикаторов флюидного субдукционного компонента *Ba*, *U*, *Sr* образуют положительные аномалии выше линии *OIB*. Высокозарядные элементы *Nb*, *Ta*, *P*, *Ti* образуют негативные и отрицательные *Hf* аномалии.

Для уточнения геохимической специализации ГД АК составлены ранжированные ряды кларков концентрации ($K_k > 1,1$) и они имеют следующий вид:

– $Be_{3,5} U_{2,6} Ag_{2,0} Th_{1,9} Pb_{1,8} Ce_{1,7} Ba_{1,7} Bi_{1,4}$

Их геохимическое сравнение с породами близкого петрогеохимического типа, двенадцати геодинамических обстановок [Гусев и др., 1999] показывает, что они сопоставимы с магматическими породами зрелых и развитых островных дуг, и краевых вулканоплутонических поясов активных континентальных окраин.

Таблица 1 / Table 1

**Результаты RFA габбро-диоритов. (оксиды в масс. %; элементы в г /т). /
Results of RFA of gabbro-diorites. (oxides in wt. %, elements – in ppm)**

	76/17	77/17	78/17	79/17	80/17	81/17	82/17
SiO₂	53,53	54,16	52,91	53,86	53,59	54,35	54,66
TiO₂	1,30	1,28	1,46	1,40	1,16	1,25	1,25
Al₂O₃	16,47	15,96	16,61	16,68	16,72	17,18	17,40
Fe₂O₃	8,34	8,65	8,95	8,36	8,09	9,07	8,24
MnO	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,14	0,130
MgO	4,34	4,68	4,75	4,73	5,01	3,57	3,33
CaO	7,27	6,98	7,02	7,24	7,42	6,15	6,36
Na₂O	3,63	3,63	3,63	4,12	3,91	3,63	3,98
K₂O	1,38	1,19	1,28	0,88	1,35	1,56	1,65
P₂O₅	0,30	0,31	0,35	0,15	0,21	0,30	0,27
S	<0,02	<0,02	<0,02	0,04	<0,02	<0,02	<0,02
ppm	3,04	2,78	2,64	2,23	2,15	2,53	2,46
Сумма /	99,72	99,74	99,73	99,81	99,74	99,73	99,73
Cr	128	163	138	142	164	16	46
V	200	157	183	158	184	155	176
Co	24	26	28	24	26	15	17
Ni	45	51	49	48	49	10	12
Cu	22	29	15	<10	12	<10	7
Zn	92	98	101	90	88	88	97
Pb	14	14	<10	14	11	15	13
Rb	38	35	38	25	35	41	42
Sr	531	487	519	530	514	588	511
Ba	621	476	530	422	528	539	591
Nb	8	8	8	9	8	9	10
Zr	93	72	29	16	111	147	106
Y	25	25	30	22	25	29	30

Примечание: р. Даут – 76/17, 77/17; р. Аманкол – 78/17, 79/17, 80/17; устье р. Худес – 81/17, 82/17. /
Comment: r. (river) Daut – 76/17, 77/17; r. Amankol – 78/17, 79/17, 80/17; mouth r. Khudes – 81/17, 82/17

Таблица № 2 / Table 2

Результаты ICP-MS габбро-диоритов. / Results ICP MS gabbro-diorites.

Элементы в г/т Elements in ppm	Номера проб / Numbers of the samples					
	76/17	78/17	80/17	81/17	82/17	83/17
Li	21,2	25,0	16,2	16,5	17,9	16,8
Be	1,487	1,198	1,671	1,232	1,921	1,31
Sc	28,37	30,97	25,63	34,4	28,16	33,14
Ti	9823	11290	8611	14290	9392	13620
V	294,5	263,7	225,1	345,8	244,2	345
Cr	150,4	161,2	47,98	101,8	52,51	100,9
Mn	1156	1367	1130	1421	1306	1403
Co	30,8	34,88	20,74	34,9	22,2	34,06
Ni	52,01	59,96	19,34	40,86	20,66	38,65
Cu	32,54	24,94	14,63	32,65	15,84	32,36
Zn	121,6	137,3	116,6	131	124,9	131,1
Rb	46,23	45,72	46,38	15,62	50,19	15,49
Sr	685,8	691,5	609	800,8	665,3	764,9
Y	25,27	28,33	28,04	28,73	30,25	27,72
Zr	33,46	30,7	24,76	23,92	26,96	22,92
Nb	7,781	8,112	9,537	8,014	10,14	7,848
Mo	1,67	1,218	1,117	1,296	1,146	1,241
Ag	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Cd	0,169	0,203	0,198	0,211	0,165	0,234
Cs	0,768	0,882	1,113	0,887	1,196	0,842
Ba	751,4	636	610,5	376,6	662,7	364,4
La	22,55	24,99	25,28	21,41	27,21	20,72
Ce	50,26	55,69	54,67	49,04	58,56	48,13
Pr	6,583	7,571	7,375	6,671	7,63	6,655
Nd	27,78	31,79	29,62	28,72	31,12	28,42
Sm	5,823	6,629	6,108	6,374	6,533	6,338
Eu	1,721	2,025	1,749	2,171	1,916	2,188
Gd	5,911	6,623	6,087	6,512	6,693	6,282
Tb	0,84	0,931	0,884	0,944	0,989	0,9
Dy	4,319	4,914	4,787	5,025	5,299	5,017
Ho	0,902	0,987	0,998	1,042	1,082	1,014
Er	2,447	2,683	2,676	2,731	2,979	2,748
Tm	0,35	0,379	0,389	0,396	0,42	0,399
Yb	2,095	2,237	2,319	2,332	2,6	2,309
Lu	0,323	0,344	0,366	0,366	0,407	0,363
Hf	1,126	1,007	0,901	0,815	0,911	0,786
Ta	0,447	0,474	0,574	0,495	0,641	0,457
W	1,172	1,128	0,907	0,627	1,011	0,578
Pb	11,03	9,493	11,33	11,43	11,85	11,13
Bi	0,073	0,076	0,071	0,068	0,077	0,071
Th	4,184	5,526	3,199	2,561	3,527	2,471
U	2,1	2,61	1,252	1,253	1,413	1,234
ΣREE	131,9	147,8	143,3	133,7	153,4	131,5

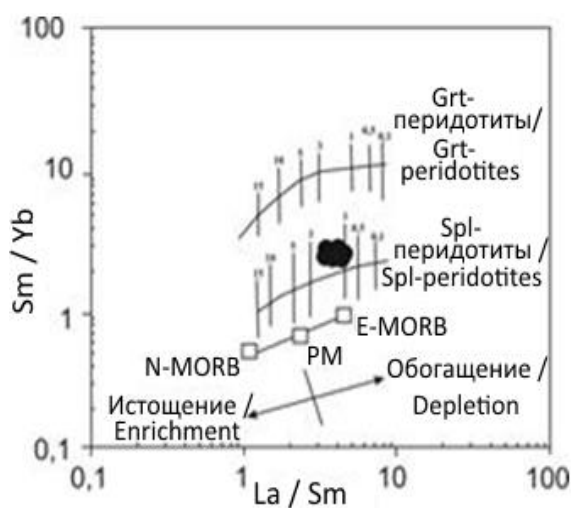
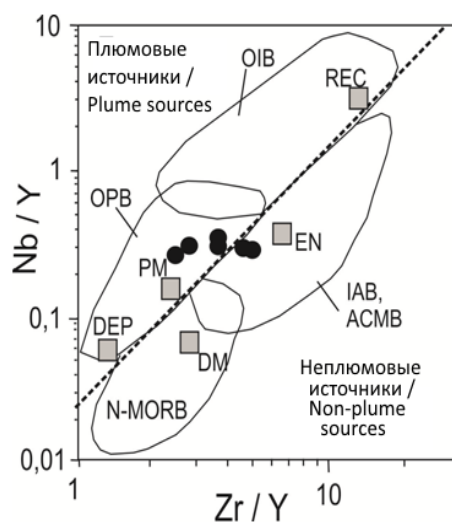
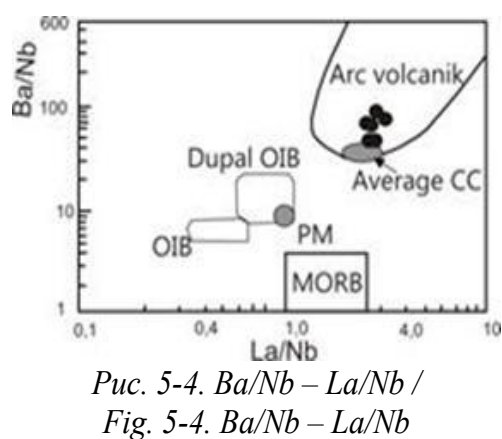
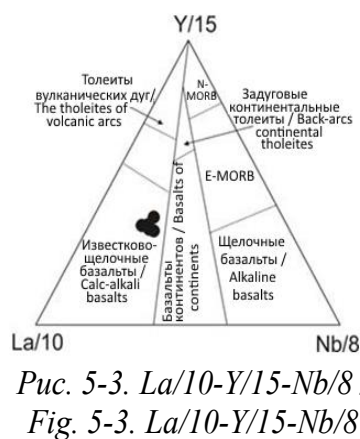
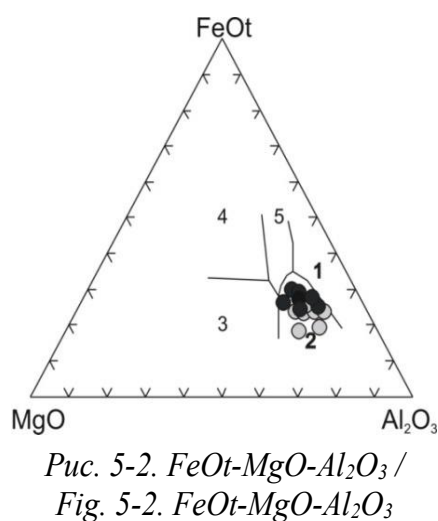
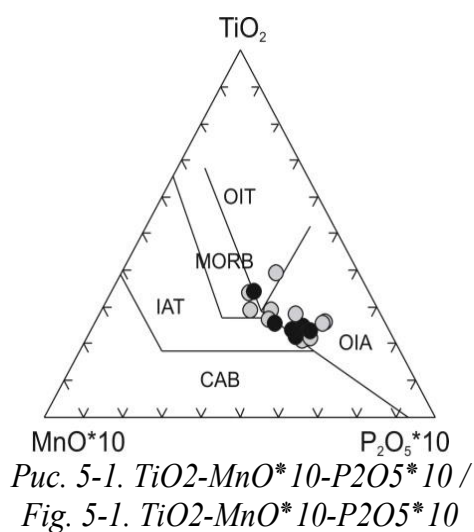


Рис. 5 Составы пород на петрогенетических диаграммах. Условные обозначения см. на рисунке 3. /
Fig. 5. Compositions of rocks on the petrogenetic diagrams. Legend: look at fig. 3.

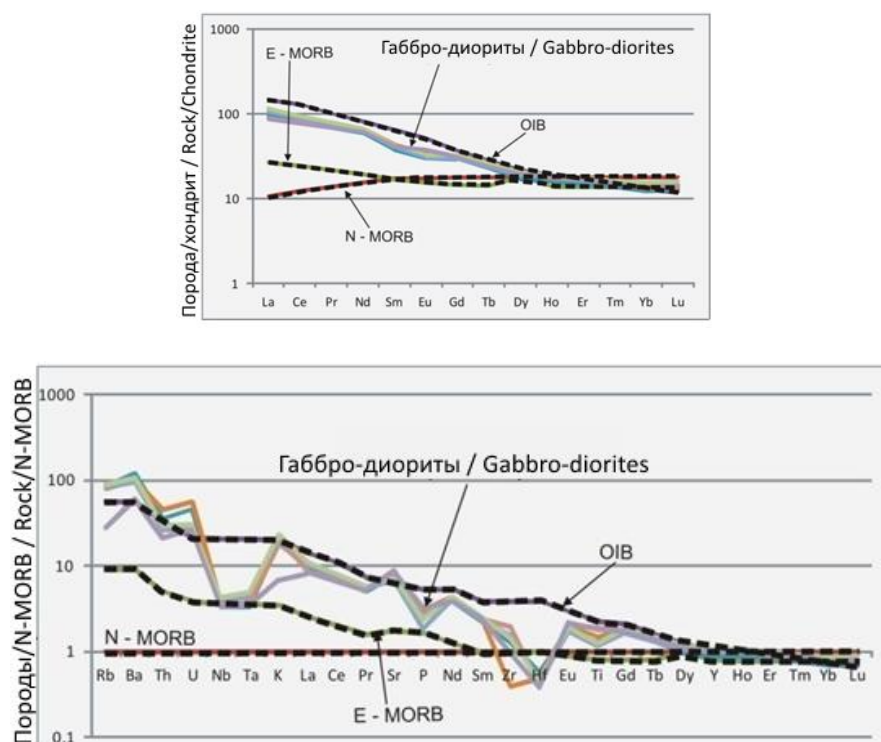


Рис. 6. Составы габбро-диоритов на спайдер диаграммах. Концентрации REE, нормированные к хондриту, концентрации несовместимых элементов, нормированные к N-MORB, по [San, McDonough, 1989]. /

Fig. 6. Compositions of gabbro-diorites on spider diagrams. Concentrat of REE are normalized to chondrite, concentrate of incompatible elements are normalized to к N-MORB according [San, McDonough, 1989].

Результаты и их обсуждение

Изученные ГД АК относятся к высокоглиноземистым, умеренно титанистым, умеренно магнезиальным породам нормальной щелочности известково-щелочной серии. Они являются производными расплава образовавшегося при плавлении шпинелевых перидотитов (рис. 5-6). Низкие значения $Mg\# = 0,42-0,54$, и содержания Ni позволяют предполагать, что, в процессе эволюции этого расплава происходило фракционирование оливина и пироксенов. Несовместимые элементы и REE, нормированные по N-MORB и хондриту [San, McDonough, 1989], образуют спектры наклонных линий, расположенных между профилями OIB и E-MORB (рис. 6). Породы характеризуются повышенными концентрациями $LILE$, $LREE$, $MREE$ и элементов индикаторов флюидного субдукционного компонента Ba , U , Sr . Имеются негативные аномалии Nb , Ta , P , Ti и отрицательная аномалия Hf – элемента индикатора участия субдукционного осадка в магмагенезисе [Мартынов, 2010]. Анализ петрогенетических диаграмм (рис. 5) показал, что фигуративные точки ГД АК чаще всего группируются в полях пород вулканических дуг, либо вулканических дуг и активных континентальных окраин и андезитов океанических островов.

Известно, что островодужные расплавы образуются при плавлении пород мантийного клина с участием флюида и расплавов субдуцирующей океанической коры. Для пород сформировавшихся в этой обстановке характерно относительное обеднение Nb , Ta , Zr , Hf относительно $LILE$, $LREE$, $MREE$. Этот феномен объясняют

обогащением перидотитов мантийного клина флюид мобильными элементами, а содержания HFSE (*Nb, Ta, Zr, Hf*) остаются такими же какими были до флюидного обогащения [McCulloch, Camble, 1991]. Факторы, контролирующие поведение *Ti* могут быть ранжированы следующим образом. На первом месте стоит обводненность среды, что снижает содержание этого металла в расплаве. Именно поэтому, особенно низкое содержание *Ti* характерно для магматических пород субдукционных зон. Затем следует давление, повышение которого способствует переходу *Ti* в расплав. По этой причине наблюдается возрастание его концентрации в более глубоких магмах. Еще отмечают зависимость содержания *Ti* от фемичности плавящегося субстрата. Эти факторы тесно связаны между собой [Абрамович и др., 1999]. Также известно, что существует корреляция между содержанием калия в вулканитах и глубиной сейсмофокальной зоны. Для базальтов и андезибазальтов $c_{SiO_2} = 52-56\%$. $H = 84K_2O + 73$, где *H* – глубина до зоны Бенъофа [Зубин, Щеймович, 1979]. Или $H = 40,7K_2O - 3,09SiO_2 + 279,93$ [Пискунов и др., 1979]. В нашем случае это 183 км или 167 км. В связи с тем, что изучались интрузивные породы глубина до сейсмофокальной зоны вероятно меньше, на глубину становления ГД.

Отметим, что в процессе эволюции вулканических островных дуг они проходят несколько стадий своего развития. В связи с этим выделяют [Гусев и др., 1999]: юные вулканические островные дуги (ЮВОД); развитые вулканические островные дуги (РВОД); зрелые вулканические островные дуги (ЗВОД); краевые вулкано-плутонические пояса активных континентальных окраин (ВПП АКА). Геохимическая специализация ЮВОД в целом халькофильно-сидерофильная ($Cr_{1.5} Sc_{1.5} Co_{1.3} Ni_{1.2} Cu_{1.1}$). Для РВОД характерна халькофильная геохимическая специализация с низкими Кк ($Cu_{1.2} Zn_{1.1} Pb_{0.6}$). Для ЗВОД характерна литофильно – халькофильная геохимическая специализация ($Cu_{1.6} Pb_{1.3} Ba_{1.3} Th_{1.3} Zn_{1.1}$). Породы краевых ВПП АКА не имеют ярко выраженных отличий и по уровням концентрации петрогенных и микроэлементов занимают промежуточное положение между РВОД и ЗВОД. Геохимическая специализация обстановки в целом – литофильная ($Ba_{1.2} Zn_{1.0} Cu_{1.0}$).

Сравнение ГД АК с породами близких петрохимических типов, двенадцати разных геодинамических обстановок показало, что они хорошо сопоставимы с породами ЗВОД и близки с породами РВОД и краевых ВПП АКА. Геохимическая специализация пород литофильно-халькофильная. Рудные минералы в пробах протолочках габбро-диоритов представлены [Брюшкова, Красивская, 1977] ильменитом, пиритом, молибденитом, галенитом, киноварью и апатитом.

Исходя из изложенного, мы считаем, что с позднего ордовика начиная с периода 450-400 млн. лет тому назад, в регионе Большого Кавказа существовала островодужная геодинамическая обстановка. Согласно с результатами палеотектонических реконструкций Кавказского региона [Адамия и др., 1989], в раннем палеозое, на северной границе палеотетиса существовала сложная геодинамическая система, состоящая из двух островных дуг (Большого и Малого Кавказа), и разделявшего их морского бассейна окраинного типа. В связи с этим возникает ряд вопросов. Как соотносятся: 1 – ГД АК и позднесилур-среднедевонские островодужные вулканические урупской серии [Аджигирей и др., 1976; Семенуха и др., 2009]; 2 – ГД АК и раннепалеозойские габброиды и пироксениты Архызского [Каденский, 1956; Хильтов, 1959] и Туялинского комплексов [Письменный и др., 2004; Семенуха и др., 2009.] из структурно-формационных зон Главного и Передового хребтов.

Заключение

Изучены петрохимические и геохимические особенности габбро-диоритов аминкольского комплекса. Доказано, что они являются высокоглиноземистыми, умеренно титанистыми и умеренно магнезиальными породами нормальной щелочности, что они сформировались в надсубдукционных условиях и имеют характеристики островодужных образований. На основании интерпретации результатов проведенных исследований сделано предположение о том, что в силурийское время (450-400 млн лет тому назад), в кавказском регионе существовала островодужная геодинамическая обстановка.

Литература

1. Абрамович И.И., Зелепутин С.В., Аплонов С.В. и др. Основы геодинамического анализа при геологическом картировании. // СПб.: ВСЕГЕИ, 1997. – 497 с.
2. Адамия Ш.А., Габуния Г.Л., Кутелия З.А., и др. Характерные черты тектоники Кавказа. // Сб., н. т. «Геодинамика Кавказа». – М.: Наука, 1989. – С. 3-15.
3. Ажгирей Г.Д., Баранов Г.И., Кропачев С.М. и др. Геология Большого Кавказа. – М.: «Недра», 1976. – 248 с.
4. Афанасьев Г.Д., Борсук А.М., Кондаков Л.А. и др. Конкретные магматические формации Северного Кавказа. // Изв. АН СССР, сер. Геол. – 1971. – № 7. – С. 3-27.
5. Брюшкова Л.П. Красивская И.С. Габбро-диоритовая формация верховьев реки Кубани (Бечасынская зона) и ее положение в ряду древних магматических формаций Северного Кавказа. // Магматические формации Кавказа и юга Восточно-Европейской платформы. – М.: Наука, 1977. – С. 69-87.
6. Гусев Г.С., Кудрявцев Ю.К., Гуцин А.В. и др. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. // СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. – 514 с.
7. Зубин М.И., Шеймович В.С. О содержании K_2O в вулканитах связи с геоструктурными особенностями Южной Камчатки. // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 246. № 5. – С. 1195-1198.
8. Каденский А.А. Магматическая геология Передового хребта Северо-Западного Кавказа. – Л.: Изд. АН СССР, 1956. – 278 с.
9. Мартынов И.А. Основы магматической геохимии. // Владивосток: Дальнаука, 2010. – 215 с.
10. Пискунов Б.Н., Абдурахманов А.И., Ким Чун Ун. Корреляция, состав, глубина и положение магматических очагов Курильских вулканов. // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 244. № 4. – С. 937-940.
11. Письменный А.Н., Пичужков А.Н., Зарубина М.А. и др. Государственная геологическая карта РФ. К-38-I, VII. Объяснительная записка. – 2004. – 259 с.
12. Семенуха И.Н., Черных В.И., Соколов М.Г. и др. Объяснительная записка, листы К-37-VI, К-37-XI (Карачаевск), серия кавказская, второе издание. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. – 204 с.
13. Хильтов Ю.Н. Геология и петрология Архызского интрузивного комплекса (Северный Кавказ). – М.: Изд. АН СССР, 1959. – 143 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 la discrimination des series volcaniques et la mise 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. Mullen E. D. $MnO/TiO_2/P_2O_5$: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1983. – V. 62. – Pp. 53-62.
18. McCulloch M. T., and Camble I. A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1991. – V. 102. – Pp. 358-374.
19. Pang K. N., Zhou M. F. et al. Erratum to «Flood basalt-related Fe-Ti oxide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China». – *Lithos.* – 2013. – V. 119. – Pp. 123-136.
20. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. // *Geol. Spec. Publ.* – 1989. – No. 42. – Pp. 313-345.

References

1. Abramovich I. I., Zelepugin S. V., Aplonov S. V. et al. Fundamentals of geodynamic analysis in geological mapping. St. Petersburg, VSEGEI, 1997. 497 p. (In Russ.)
2. 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.)
3. Azhgirei G. D., Baranov G. I., Kropachev S. M. et al. Geology of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra, 1976. 248 p. (In Russ.)
4. Afanas'ev G. D., Borsuk A. M., Kondakov L. A. et al. Certain igneous formations of the North Caucasus. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR, ser. Geol.* 1971. No. 7. pp. 3-27. (In Russ.)
5. Bryushkova L. P., Krasivskaya I. S. Gabbro-diorite formation of the upper reaches of the Kuban River (Bechasyn zone) and its position among ancient magmatic formations of the North Caucasus. *Magmatic formations of the Caucasus and the south of the East European platform.* Moscow. Nauka, 1977. pp. 69-87. (In Russ.)
6. 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.)
7. Zubin M. I., Sheimovich V. S. The content of K_2O in volcanic rocks in connection with geostructural features of South Kamchatka. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR.* 1979. Vol. 246. No. 5. pp. 1195-1198. (In Russ.)
8. Kadenskii A. A. Magmatic geology of the Northwest Caucasus Peredovoi ridge. Leningrad. Published by USSR Academy of Sciences, 1956. 278 p. (In Russ.)
9. Martynov I. A. Fundamentals of magmatic geochemistry. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 215 p. (In Russ.)
10. Piskunov B. N., Abdurakhmanov A. I., Kim Chun Un. Correlation, composition, depth and position of magma sources of the Kuril volcanoes. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR.* 1979. Vol. 244. No. 4. pp. 937-940. (In Russ.)
11. Pis'mennyi A. N., Pichuzhkov A. N., Zarubina M. A. et al. State geological map of the Russian Federation. K-38-I, VII. Explanatory note. 2004. 259 p. (In Russ.)
12. Semenukha I. N., Chernykh V. I., Sokolov M. G. et al. Explanatory note, sheets K-37-VI, K-37-XI (Karachaevsk), Caucasian series, second edition. Saint Petersburg. VSEGEI, 2009. 204 p. (In Russ.)
13. Khil'tov Yu. N. Geology and petrology of the Arkhyz intrusive complex (North Caucasus). Moscow. Published by USSR Academy of Sciences, 1959. 143 p. (In Russ.)
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 la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange 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. Mullen E.D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1983. Vol. 62. pp. 53-62.
18. McCulloch M. T., and Camble I.A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. Vol. 102. pp. 358-374.
19. Pang K. N., Zhou M. F. et al. Erratum to “Flood basalt-related Fe-Ti oxide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China”. *Lithos*. 2013. Vol. 119. pp. 123-136.
20. Sun S. S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. *Geol. Spec. Publ.* 1989. No. 42. pp. 313-345.

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.24

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59062](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59062)

Оригинальная статья

О современном состоянии Колкинской (Кармадонской) проблемы и его причинах

М. Г. Бергер

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,
ул. Маркова, 93а, г. Владикавказ 362002, Российская Федерация,
e-mail: berger7@rambler.ru

Статья поступила: 10.02.2020, после рецензирования: 16.03.2020, принята к публикации: 20.03.2020

Резюме: За полные 17 лет прошедшие после Кармадонской катастрофы научное сообщество не пришло к единому мнению о причинах внезапного схода ледника Колка. В условиях практического забвения режима регулярных наблюдений за состоянием ледников в главных ледниковых очагах гряды вершин Казбек-Тепли-Уалпата восточной части Центрального Кавказа особенно **актуально** концентрировать инструментальные и камеральные исследования для мониторинга воздействия основных эндогенных и экзогенных факторов на ледники региона, присутствие которых в подготовке Кармадонского события все исследователи единодушны. Среди множества гипотез внезапного схода ледника Колка основными являются три концепции: ударное воздействие обрушившихся висячих масс льда, отрыв ледника сейсмическим воздействием и газодинамический выброс, детально рассмотренные в различных ракурсах. **Цель данной статьи** обоснование газодинамической взрывоподобной природы выброса ледника Колка из своего ложа на основе анализа результатов изучения других природных, природно-техногенных и техногенных явлений, характеризующихся в той или иной мере принципиально *сходными* с этой катастрофой особенностями. Используется **метод** теоретического обоснования невозможности *механической абляции ледника* за счет гляциальных процессов, логического отрицания причин, связанных с самим ледником, его водным потенциалом или обвальными массами нависающих льдов и аномальных климатических условий. Одновременно с отрицанием гляциологических факторов используется методика аналогий, в качестве которых рассматриваются взрывные или взрывоподобные эксплозивные вулканические извержения и их сейсмическое сопровождение, вулканическое дрожание при извержениях. Теоретическое отрицание гляциально-экзогенной причины выброса ледника и теоретическая модель подготовки, протекания взрывоподобного выброса и транзита ледово-каменной массы позволяют впервые выдвинуть в качестве **основного результата** газодинамический фактор эндогенного воздействия на ледник напорными флюидами, образующимися за счет остывающего субстрата камеры стратовулкана Казбек. Газодинамическая природа катастрофической пульсации ледника Колка убедительно объясняет все аномальные природные явления, проявившиеся в 2002 г. в районе ледника Колка и смежной с ним территории на этапах подготовки, протекания и постпароксизмального завершения катастрофы, взаимосвязь между ними и их связь с катастрофой, открывает большие перспективы для дальнейшего изучения ледника Колка и в области газогляциодинамических исследований. Изложенное позволяет сделать вывод: осторожность в признании столь неординарного результата научным сообществом вызвана крайне редким проявлением взрывоподобных газодинамических выбросов ледников (неординарный результат впервые озвучен как определяющий фактор внезапного выброса ледника Колка), но это вопрос времени.

Ключевые слова: Колкинская (Кармадонская) катастрофа, ледник Колка, газодинамический выброс ледника, современное состояние исследований, причины.

Для цитирования: Бергер М. Г. О современном состоянии Колкинской (Кармадонской) проблемы и его причинах. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (1): 21-34. DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59062](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59062).

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59062](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59062)

Original paper

On the current state of the Kolka (Karmadon) problem and its causes

M. G. Berger

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: berger7@rambler.ru

Received: 10.02.2020, revised: 16.03.2020, accepted: 20.03.2020

Abstract: In the full 17 years that have passed since the Karmadon disaster, the scientific community has not come to a consensus on the reasons for the sudden collapse of the Kolka glacier. In the conditions of the practical oblivion of the regular monitoring regime of the state of glaciers in the main glacial sources in the ridge of the Kazbek-Tepli-Ulpat peaks in the eastern part of the Central Caucasus, it is especially **relevant** to concentrate instrumental and desk studies to monitor the impact of the main endogenous and exogenous factors on the glaciers of the region, the presence of which in the preparation of the Karmadon event all researchers are unanimous. Among the many hypotheses of the sudden collapse of the Kolka glacier, the main are three concepts: the impact of collapsing suspended masses of ice, separation of the glacier by seismic impact and gas-dynamic outburst, which were examined in detail from different angles. **The purpose of the paper** is to substantiate the gas-dynamic explosive nature of the Kolka glacier outburst from its bed based on the analysis of the studies results of other natural, natural-technogenic and technogenic phenomena, characterized in one way or another by fundamentally *similar* features to this catastrophe. The **method** of theoretical justification of the impossibility of mechanical ablation of the glacier due to glacial processes, the logical denial of the reasons associated with the glacier itself, its water potential or collapsing masses of overhanging ice and abnormal climatic conditions is used. Along with the negation of glaciological factors, a methodology of analogies is used, which are considered explosive or explosion-like volcanic eruptions and their seismic accompaniment, volcanic tremor during eruptions. The theoretical denial of the glacial-exogenous cause of the glacier outburst and the theoretical model of the preparation, the course of the explosive outburst and the transit of the ice-stone mass make it possible to put forward as a **main result** for the first time the gas-dynamic factor of the endogenous impact on the glacier with pressure fluids generated by the cooling substrate of the Kazbek stratovolcano chamber. The gas-dynamic nature of the catastrophic pulsation of the Kolka glacier convincingly explains all the anomalous natural phenomena that appeared in 2002 in the region of the Kolka glacier and its adjacent territory at the stages of preparation, course and post-paroxysmal completion of the catastrophe, the relationship between them and their relationship with the catastrophe opens up great prospects for further study of the Kolka glacier and in the field of gas-dynamic research. The foregoing allows us to conclude that caution in recognition of such an extraordinary result by the scientific community is caused by an extremely rare manifestation of explosive gas-dynamic emissions of glaciers (an extraordinary result was first voiced as a determining factor in the sudden outburst of the Kolka glacier), but this is a matter of time.

Keywords: Kolka (Karmadon) disaster, Kolka glacier, gas-dynamic outburst of the glacier, current state of research, causes.

For citation: Berger M. G. On the current state of the Kolka (Karmadon) problem and its causes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (1): 21-34. DOI:10.23671/VNC.2020.1.59062.

В конце концов, существует только одна истина и
бесчисленное множество ошибочных путей.

А. Эйнштейн

Кто когда видел переубежденного в острой
полемике ученого?

С. В. Мейен

Введение

В условиях практического забвения режима регулярных наблюдений за состоянием ледников в главных ледниковых очагах гряды вершин Казбек-Тепли-Уалпата восточной части Центрального Кавказа особенно **актуально** концентрировать инструментальные и камеральные исследования для мониторинга воздействия основных эндогенных и экзогенных факторов на ледники региона, в присутствии которых в подготовке Кармадонского события все исследователи единодушны. К сожалению такого единодушия до сих пор нет.

Отмечая необычность, экстраординарность особенностей Колкинской катастрофы, гляциологи и некоторые другие исследователи [Ананичева и др., 2008; и др.; Benn, 1998; Evans, 2003] акцентируют внимание, прежде всего, на ее гигантских масштабах и неожиданности проявления. Главным, однако, является глубокое, принципиальное отличие *характера* этих особенностей от всех известных признаков событий гляциальной природы, в том числе от детально охарактеризованных [Инструкция..., 1982; Гляциологический..., 1984 и др., Hart, 1999] признаков гляциодинамических подвижек, их *антиподальность* этим признакам. С этим заключением вполне согласуются и гигантские масштабы Колкинской катастрофы, и ее полная неожиданность для гляциологов (и, соответственно, всех других специалистов).

Принимая во внимание известные уникальные особенности Колкинской катастрофы, статья акцентирует внимания на отсутствие гляциологических признаков подвижки ледника, одновременно приводя аналоги динамических особенностей других природных, природно-техногенных и техногенных явлений, характеризующихся в той или иной мере принципиально *сходными* с этой катастрофой особенностями.

Основная цель показать газодинамический, импульсный характер воздействия на ледник Колка, для решения которой используется **метод** теоретического обоснования невозможности *механической абляции* ледника за счет гляциальных процессов, логического отрицания причин, связанных с самим ледником, его водным потенциалом или обвальными массами нависающих льдов и аномальных климатических условий. Одновременно используется метод аналогий и сопоставления динамических характеристик природных и техногенных взрывоподобных явлений с особенностями протекания Кармадонского события.

В качестве подобных явлений могут рассматриваться, например, взрывные или взрывоподобные эксплозивные вулканические извержения и их сейсмическое сопровождение, в частности, принципиально подобное проявившемуся при Колкинской катастрофе газовому поствулканическому дрожанию вулканическое дрожание, характеризуя которое, Е. И. Гордеев с соавторами [1989, с. 105-106] пишут: «По всей видимости, процесс формирования волнового поля вулканического дрожания во всех случаях имеет один и тот же механизм, и механизм этот есть формирование поверхностных волн в сложнопостроенной слоистой среде... за счет поверхностных возмущений, связанных с выделением газовой фазы на свободной поверхности».

Необходимо подчеркнуть, что сущность происшедшей катастрофы 20 сентября 2002 г. на леднике Колка носит не географический, в частности, не гляциологический, а, прежде всего, *геологический* характер.

В результате этой катастрофы произошел мгновенный выброс. Пожалуй, наиболее адекватно (хотя и весьма неопределенно) выражающий то, что произошло 20 сентября 2002 г. на леднике Колка, гляциологический термин (никем из гляциологов в данном случае не используемый) – *механическая абляция ледника*. Вопрос, однако, состоит в том, как, в результате чего произошла эта абляция, каковы ее механизм и причины, но здесь уже гляциология бессильна, решение этих вопросов – вне компетенции гляциологии (и, в целом, классической географии).

Пытаться понять и объяснить причины уничтожения ледника Колка с гляциологических позиций – примерно то же самое, что пытаться с гляциологических позиций, понять и объяснить причины уничтожения ледников (также, разумеется, лишь временного) на склонах вулканов Безымянный 30 марта 1956 г., Шивелуч 12 ноября 1964 г. или Сент-Хеленс 18 мая 1980 г. во время их извержений. Ибо во всех этих случаях причина уничтожения ледников – не в ледниках, не в величине набранной ими массы к моменту катастрофы, не в обвалах и в обвальных ударах по ним, не в глобальном потеплении или региональных климатических и локальных погодных условиях или количестве воды, скопившейся в бассейнах ледников, в самих ледниках или под ними (на их ложе). Все это и многое другое, изучением чего в течение длительного времени интенсивно занимаются многие исследователи Колкинской проблемы, к ее решению не ведет и вообще не имеет к ней никакого отношения. И вполне естественно, что все попытки получить гляциологическое решение Колкинской проблемы ни к чему не привели и не могли привести.

В действительности же, причины уничтожения выше приведенных ледников хорошо известны и вполне очевидны, кроме ледника Колка. Никакие географические (гляциологические, геоморфологические, климатические, гидрологические и пр.) факторы ни по отдельности, ни в комплексе (друг с другом или с другими факторами) даже не рассматриваются. И вообще, во всех этих случаях (опять же, в отличие от Колкинской проблемы) никакой проблемы установления причин практически мгновенного уничтожения ледников на склонах вулканов не существует в силу общеизвестности ее эндогенного решения, *эндогенного геологического* характера факторов, вызвавших уничтожение ледников, а также проявление многих других экстраординарных пароксизмальных событий, происходивших в указанных районах в это время. Принципиально таким же является решение и Колкинской проблемы, при всей ее специфичности.

Основной специфической, отличительной особенностью Колкинской (Кармадонской, Геналдонской) катастрофы является то, что, в отличие от ледников, расположенных на склонах активных (действующих) вулканов Безымянный, Шивелуч и Сент-Хеленс и уничтоженных вместе со значительной частью построек этих вулканов, главным действующим фактором, вызвавшим уничтожение ледника Колка (а также обусловившим многие другие аномальные явления, происшедшие в Колкинском и Геналдонском ущельях в ходе подготовки, протекания и завершения Колкинской катастрофы), были не вулканические, а поствулканические газы (также высоконапорные, но значительно менее нагретые и, главное, выделявшиеся в свободную фазу в течение весьма длительного времени, на значительном удалении от ледника и лишь постепенно накапливавшиеся под ледником в результате процессов

их восходящей миграции). Воздействие этих газов на ледник было продолжительным, прямым и непосредственным и, естественно, не сопровождалось никакими проявлениями магматизма.

Действие таких (поствулканических) газов, как известно, не приводит к разрушению вулканических построек (скажем, г. Казбек или г. Арарат) и другим, собственно вулканическим, последствиям, но, как теперь очевидно, может приводить и иногда, хотя и очень редко (что вполне естественно для природных катастроф столь гигантского масштаба), приводит к катастрофическим пароксизмальным взрывоподобным направленным газодинамическим выбросам (и, соответственно, уничтожению) некоторых горных ледников (или их частей), расположенных на склонах вулканов или вблизи от них, а возможно, и в других горных районах, где, в соответствии с глубинными и поверхностными геологическими условиями (прежде всего, историко-геологическими, флюидодинамическими, петрологическими и структурно-тектоническими), могут происходить мощные прорывы концентрированных (гидродинамически сосредоточенных) потоков высоконапорных глубинных поствулканических или постмагматических газов непосредственно под ледники, являющиеся локальными непроницаемыми (газоупорными) барьерами со свободной поверхностью.

При этом подстилающий выбрасываемый ледник литосферный субстрат, даже его верхняя часть, представленная донной мореной ледника, в отличие от взрывных (эксплозивных) вулканических извержений, в основном, сохраняется. Для катастрофического выброса ледника Колка 20 сентября 2002 г. это было показано М. Ю. Никитиным и др. [2007, с. 7; Evans etc, 2009] и с газодинамических позиций, с привлечением проявления установленного автором [Бергер, 2007, с. 54-55 и др.] эффекта газового домкрата на подготовительной стадии Колкинской катастрофы.

Результаты работ

Как неоднократно было показано автором, начиная с 2003 г. [Бергер, 2004, 2006 и др.] и подтверждено результатами последующих исследований [Бергер, 2007, и др.], все особенности (признаки) Колкинской (Кармадонской) катастрофы, исключительно мощно проявившиеся в ее эпицентральной зоне, совершенно однозначно указывают на ее взрывной или взрывоподобный характер.

Известно несколько типов таких явлений. Это, прежде всего, техногенные (химические и ядерные) взрывы на выброс гигантской силы, метеоритные взрывы, взрывные (эксплозивные) вулканические извержения и взрывоподобные внезапные газодинамические выбросы.

Никаких оснований предполагать наличие на леднике Колка 20 сентября 2002 г. явлений первых трех типов не существует (хотя предположения о возможности проявления некоторых из них были высказаны в научных публикациях и средствах массовой информации).

Зато имеются все основания считать Колкинскую (Кармадонскую) катастрофу 2002 года *пароксизмальным взрывоподобным направленным поствулканическим внезапным газодинамическим выбросом ледника Колка*. Таково полное определение характера (геодинамического типа) этой катастрофы.

Такая идентификация геодинамического типа Колкинской катастрофы в эпицентральной зоне ее проявления подтверждается всеми весьма многочисленными

ее особенностями, является полностью доказанной, исчерпывающей, однозначной и вообще единственно возможной.

В соответствии с таким определением, Колкинская катастрофа 2002 г. и подобные ей в генетическом плане и по особенностям проявления ледниковые катастрофы (Колка, июль 1902 г. и 1752 г., Девдорак, 1832 и 1776 гг., Уаскаран, 1962 и 1970 гг., Арарат, июнь 1840 г. и др.) представляют собой новый, ранее неизвестный геодинамический тип чрезвычайно опасных пароксизмальных эндогенных природных катастроф поствулканического или постмагматического газодинамического генезиса [Huggel, 2009].

Важнейшей характерной (так сказать, генотипической) особенностью Колкинской катастрофы (и других катастрофических событий, принципиально подобных Колкинской катастрофе по генезису (причинам) и механизму протекания) является наличие следующего последовательного ряда зон ее проявления: 1) гигантской воронки (полости) выброса, возникшей на месте выброшенного ледника, – эпицентральной зоны газодинамического выброса; 2) зоны в значительной мере субэпирального (по воздуху) инерционного движения выброшенного ледово-каменного материала продуктов разрушения ледника (эта зона обычно именуется зоной транзита) и 3) гигантского по объему ледово-каменного навала (завала) выброшенного и вовлеченного в движение материала (зоны его аккумуляции). (Гигантский высоконапорный аномально высокоскоростной гляциальный сель, проявившийся за Кармадонскими воротами, – вторичное явление, возникшее вследствие взрывоподобного направленного газодинамического выброса ледника Колка и смещения части выброшенного и вовлеченного в движение материала с текущими водами рек Геналдон и Гизельдон.)

Само наличие перечисленных зон, их последовательность и присущие каждой из них очень показательные весьма специфические признаки совершенно однозначно характеризуют Колкинскую катастрофу как взрывоподобный направленный газодинамический выброс ледника.

Практически полностью идентичными этой катастрофе по особенностям развития и зональности являются глубоко изученные многочисленные техногенные направленные взрывы на выброс [Покровский, 1980; Черниговский, 1976; Ромашов, 1976, 1980; и мн. др.], основным результатом которых является практически мгновенное образование гигантских навалов горнопородных масс на том или ином удалении от мест их первоначального залегания.

Все это, в совокупности с многочисленными другими фактами, характеризующими Колкинскую катастрофу, настолько очевидно, что было бы странным, если бы мысль о взрывном характере Колкинской катастрофы никому ранее не приходила в голову. И она приходила, о чем, в частности, еще в первые дни после катастрофы сообщали некоторые средства массовой информации. Но люди просто не знали, как можно объяснить такой характер этой катастрофы. А о взрывоподобных внезапных газодинамических выбросах они, вероятно, просто не слышали (в чем автор убежден, в частности, в беседах с некоторыми гляциологами, активно отстаивавшими гляциологическую версию о подвижке ледника Колка 2002 г.).

Исключительная специфика многочисленных особенностей Колкинской катастрофы, их глубокое, принципиальное отличие от особенностей всех типов природных и природно-техногенных явлений, кроме газодинамических, их сходство, практическая идентичность с особенностями подготовки, протекания и заверше-

ния взрывоподобных внезапных газодинамических выбросов позволили с исключительно высокой доказательностью, редкой для генетических построений в геологии, палеогеографии, гляциологии и других науках о Земле, совершенно однозначно установить газодинамическую природу катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье, определить ее характер (геодинамический тип) и причины.

В соответствии с имеющимися многочисленными результатами исследований и предложенными формулировками [Петухов, Линьков, 1983; Петросян и др., 1983; Красюк и др., 2004; Внезапный выброс, 1984; Бирюков, 2011; и мн. др.], *внезапный газодинамический (газопородный, в частности, газоледокаменный) выброс может быть определен как природное или же природно-техногенное (вызванное техногенным воздействием на горный массив) быстропотекающее взрывоподобное явление, состоящее в разрушении обладающей свободной (обнаженной, открытой) поверхностью части горного массива и разлете (выбросе, выносе, отбросе, сбросе, метании) продуктов разрушения под действием расширяющихся природных газов, находившихся в сжатом состоянии, и кинетической энергии, запасенной в кусках выброшенного материала.* (Вопросы, касающиеся отличия взрывоподобных газодинамических выбросов от взрывов, в том числе взрывов на выброс или на сброс, рассмотрены в работе [Бергер, 2007, с. 100-103].)

В связи с установлением газодинамической природы Колкинской катастрофы необходимо заметить, что исследование газодинамических явлений – особая, весьма специфическая область науки. Интенсивные теоретические, методические и практические работы в этой области ведутся во многих странах еще с первой половины XIX в., а их результаты отражены во многих тысячах публикаций. По характеру объектов исследования, кругу решаемых вопросов и методам их решения, а также используемому понятийно-терминологическому аппарату это очень далекая от гляциологии область, в которой соприкасаются геомеханика, газогеодинамика и ряд других областей знаний.

Обсуждение результатов

Одна из причин непростой ситуации с признанием представлений о газодинамической природе катастрофической пульсации ледника Колка в 2002 г. состоит в том, что само явление внезапных газодинамических (газопородных) выбросов неизвестно гляциологам и большинству других исследователей этой катастрофы. Действительно, газодинамический выброс – явление, естественно, эндогенное, а не гляциологическое, и до сих пор гляциологами не отмечалось (хотя и происходило, например, на леднике Колка 3 и 6 июля 1902 г.). Каждое явление когда-то устанавливается впервые, а газодинамический выброс ледника – явление, безусловно, редчайшее, хотя и не единичное. Но, хотя газодинамические выбросы ледников до 2002 г. не были установлены, сами газодинамические (газопородные) выбросы – явление достаточно распространенное, известное уже около двухсот лет, зафиксированное многие десятки тысяч раз во многих странах и регионах, отчасти даже каталогизированное, многократно детально описанное, глубоко изученное. Участие в подобных выбросах поствулканических или постмагматических газов и льда природных ледников, разумеется, вносит некоторую специфику в подготовку, развязывание (запуск) и проявление газодинамических выбросов, но не меняет существа дела, общего характера и механизма протекающих процессов, действующих природных факторов (вызывающих причин), причинно-следственных свя-

зей. Участие ледникового льда (как и солей, песчаников и некоторых других типов горных пород) в газодинамических выбросах (в соответствующих, необходимых для их подготовки условиях [Бергер, 2007]) является совершенно естественным и закономерным с учетом его фильтрационных, реологических, прочностных и плотностных свойств.

Пароксизмальные взрывоподобные газодинамические выбросы ледников, судя по оставленным ими следам, неоднократно происходили на Земле, в том числе на Кавказе, и ранее, но установить (идентифицировать) их, определить их газодинамическую природу, выявить их механизм и причины удалось лишь после гигантской катастрофы 2002 г. с эпицентром на леднике Колка, следы которой проявились на огромной территории и лишь немного не дошли до пригородов Владикавказа.

Волнообразно пульсационно протекающий газодинамический выброс гигантского масштаба является сложным источником сейсмических волн [Hornes, 2013]. В случае же неодноактности (неоднородности, неоднотадийности) проявления газодинамического выброса и близости времени проявления его различных актов, промежутки между которыми не выходят за пределы нескольких минут, сейсмическая картина еще более усложняется. По-видимому, именно такова ситуация в случае газодинамического выброса ледника Колка 20 сентября 2002 г. [Процесс..., 2009; и др.]. Это, разумеется, существенно затрудняет однозначную и достоверную интерпретацию имеющихся сейсмических данных об этом событии.

Сейсмология таких взрывоподобных направленных поствулканических газодинамических выбросов (по заключению автора), которая может быть названа газогляциодинамической сейсмологией, пока делает только первые шаги. Привлечение имеющегося опыта сейсмологических исследований внезапных газодинамических выбросов, ударных явлений различного типа, направленных взрывов и эксплозивных вулканических извержений, возможно, позволит внести несколько большую ясность в данный вопрос.

Неоднократно происходили в прошлом, безусловно, и взрывоподобные направленные выбросы ледника Колка, история развития которого относительно известна лишь с 1752 г. [Рототаев и др., 1983; Панов, 1993;], а в гораздо большей части остается неизвестной. Об этом свидетельствуют, в частности, «следы ледниковой обработки высоко на скалах в ущелье Колки» [Рототаев и др., 1983, с. 17], на которые обратил внимание К.П. Рототаев во время его рекогносцировочных исследований еще в 1954-1955 гг. и которые в течение полувека не имели объяснения. (Само собой разумеется, что эти следы не являются следами водных потоков, всюду усматриваемых гляциологами).

Установление газодинамической природы катастрофической пульсации ледника Колка, как говорится, поставило все на свои места: стали понятными и получили вполне убедительное объяснение все аномальные природные явления, проявившиеся в 2002 г. в районе ледника Колка и смежной с ним территории на этапах подготовки, протекания и постпароксизмального завершения катастрофы, взаимосвязь между ними и их связь с катастрофой, а главное – совершенно экстраординарные особенности этой катастрофы, остававшиеся необъяснимыми, несмотря на привлекаемые *ad hoc* (специально для данного случая) многочисленные предположения, в том числе совершенно невероятные и ошибочные.

Установление газодинамической природы катастрофической пульсации ледника Колка 2002 г. открывает большие перспективы для дальнейших работ, как в из-

учении ледника Колка, так и в целом в области газогляциодинамических исследований – принципиально новой области исследований ледников и связанных с ними опасных, в том числе катастрофических, эндогенных природных процессов. Оно устанавливает новый тип катастрофических природных явлений – пароксизмальные направленные взрывоподобные внезапные газодинамические выбросы ледников, открывает новую область исследований в науках о Земле – газогляциодинамику, указывает на существование и необходимость углубленных комплексных исследований весьма специфических сложных неравновесных природных геодинамических систем (мегасистем) нового типа – лито-газо-гидро-гляциодинамических, в составе которых ледник вместе с областью его питания («ледосбора») образует лишь сравнительно небольшую верхнюю часть, тесно связанную с подстилающим литосферным субстратом и реагирующую на происходящие в нем процессы (прежде всего, процессы массоэнергопереноса). Одной из таких природных систем является геодинамическая система ледника Колка.

Вместе с тем, несмотря на доказательность, однозначность и неопровержимость заключения о взрывоподобном характере и газодинамической природе катастрофической пульсации ледника Колка (и принципиально подобных ей предшествующих пароксизмальных пульсаций этого ледника), ситуация в этой области науки все еще остается сложной, чему есть различные объективные и субъективные причины, отчасти показанные в этой и предшествующих работах автора. Их преодоление требует времени и усилий. Остается только надеяться, что это произойдет еще до следующей катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье и что эта катастрофа не окажется столь же неожиданной и трагичной, как предыдущие (из которых достоверно известны только три – в 2002, 1902 и 1752 гг.).

Изучение природных катастроф, выявление причин и механизма их проявления – непростое дело: они редко наблюдаются специалистами в момент их запуска в эпицентре или в непосредственной близости от него, а процессы, происходящие в их глубинном очаге (существование которого, впрочем, иногда, в том числе в большинстве исследований Колкинской катастрофы, даже не предполагается) и вблизи от него, вообще ненаблюдаемы. К числу таких катастроф относится и гигантская катастрофа на леднике Колка и в Геналдонском ущелье 2002 года.

Все это существенно затрудняет получение достоверных заключений о Колкинской катастрофе и во многом определяет современное состояние ее исследований.

Тем не менее, высказываемые иногда представления о принципиальной непознаваемости, невозможности доказательного определения природы (причин и механизма проявления) катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье лишены оснований.

Хотя протекающие в глубинных недрах Земли геологические процессы не могут быть установлены путем проведения непосредственных прямых наблюдений, это, однако, не означает, что их характеристика всегда является лишь предположительной, гипотетической и недостоверной. Во многих случаях они устанавливаются вполне доказательно, достоверно и однозначно по их проявлениям, прежде всего, наблюдающимся на земной поверхности. Одним из таких грандиозных поверхностных проявлений глубинных эндогенных геологических процессов являются неоднократные пароксизмальные катастрофические пульсации ледника Колка, в частности, его пульсация 20 сентября 2002 года.

Одной из особенностей современного состояния исследований катастрофической пульсации ледника Колка являются весьма распространенные попытки ее определения и объяснения с географических позиций, на основе традиционных представлений динамической гляциологии о ледниковых подвижках, оползнях, селях, обвалах и пр.

Одним из основных результатов такого подхода является бездоказательное и ошибочное определение Колкинской катастрофы в эпицентральной области ее проявления как подвижки ледника и гляциального селя.

Такое заключение было определено (можно сказать, изначально предопределено), прежде всего, обращением за разъяснениями по поводу Колкинской катастрофы 2002 г. к гляциологам и имевшимися заключениями гляциологов [Рототаев и др., 1983; и др.] о предыдущих пульсациях ледника Колка, в том числе о его катастрофической пульсации 1902 г., которая до последнего времени не имела обоснованной и правильной генетической гляциологической интерпретации.

Однако, особенности катастрофической пульсации ледника Колка 2002 г. [Бергер, 2007, с. 66 и далее, с. 208 и далее; не аналогичны известным [Инструкция..., 1982; Гляциологический..., 1984; и др.] особенностям подвижек ледников, а во многом *антиподальны* им. По всем особенностям это был *взрывоподобный направленный газодинамический выброс ледника* [Бергер, 2004, 2006, 2007 и др.]. А определять и объяснять механизм и причины катастрофы взялись гляциологи, специалисты по гляциодинамическим подвижкам, не имеющие никакого представления о газодинамических выбросах. В этом и состоит парадоксальность (здесь уместны и другие определения) существующей в данной области ситуации, источник и основная причина многочисленных ошибок и разногласий по данной проблеме.

Фактически, происшедшая в течение немногих минут 20 сентября 2002 г. пароксизмальная взрывоподобная газодинамическая аннигиляция ледника Колка и последующие процессы его восстановления *диаметрально противоположны* тому, что происходит с ледником в ходе его подвижки.

При проявлении гляциодинамической подвижки ледник, как известно, не исчезает, как в данном случае, наоборот, в той или иной мере увеличивает, наращивает свою площадь путем продвижения за пределы своего исходного (планового) контура. В последующем же происходит не регенерация ледника путем зарождения нового ледника на месте исчезнувшего и увеличения его площади, как в данном случае, а наоборот, уменьшение площади ледника в результате стаивания его продвинувшейся части, сохраняющей связь с его основным телом.

Выводы

Вышеизложенное (и многочисленные другие факты) исключает возможность идентификации геодинамического типа катастрофической пульсации ледника Колка 2002 г. в качестве подвижки ледника, имеющей гляциодинамическую природу.

Все весьма многочисленные попытки гляциологов, а также геоморфологов, климатологов и других специалистов-географов решить Колкинскую (Кармадонскую) проблему, объяснить Колкинскую катастрофу, определить ее характер (геодинамический тип, механизм подготовки и протекания), установить ее причины (действующие факторы) безуспешны и бесперспективны, ибо *объяснить газоди-*

намические процессы и явления, раскрыть их сущность, определить причины с географических позиций, на основе традиционных гляциодинамических представлений невозможно.

Доказательная детальная реконструкция катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье, особенно в ее эпицентре и очаге поражения, и установление ее причин (вызвавших эту катастрофу природных факторов) – непростое дело.

Более того, даже для техногенных взрывов на выброс и на сброс, при заблаговременной известности времени и места их проведения, многократности повторения в различных условиях и хорошей изученности этих условий, детальная реконструкция процессов их протекания в эпицентральных зонах – непростое дело.

Это объясняется, прежде всего, очень высокими скоростями их протекания, огромной концентрацией энергии, гигантскими давлениями [Покровский, 1980].

Тем более затруднительным является изучение катастрофических внезапных взрывоподобных газодинамических явлений гигантской силы (величины выделившейся энергии), установление характера (механизма протекания) и причин.

С учетом крайней редкости проявления взрывоподобных внезапных газодинамических выбросов ледников, их проявления на ледниках, но, в то же время, их неледникового (не гляциального) и вообще не поверхностного, не экзогенного, а глубинного, эндогенного генезиса и лишь недавнего установления их причин и физического (геомеханического) характера, не приходится удивляться тому, что признание газодинамической природы этих выбросов происходит далеко не просто.

В ходе пока еще непродолжительной истории изучения Колкинской катастрофы было высказано немало необоснованных и ошибочных представлений по данной проблеме. В развитии человеческого познания избежать этого невозможно. Но в данной истории дело, в конце концов, даже не столько в необоснованности и ошибочности представлений, содержащихся в некоторых (весьма многочисленных) работах, сколько в самом подходе к их обоснованию и отстаиванию, характеризующемся нередко игнорированием и искажением фактов, их произвольной субъективной интерпретацией, нарушениями логики и научной этики. В науке подобное – также не редкость. Но успехов на этом пути не бывает.

Таковы некоторые субъективные причины современного состояния исследований катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье.

Литература

1. Ананичева М. Д., Глазовский А. Ф., Котляков В. М., Михаленко В. Н., Носенко Г. А., Осипова Г. Б., Рототаева О. В., Соломина О. Н., Цветков Д. Г. Неустойчивость современного оледенения, ледниковые катастрофы. // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. В 8 томах. Том III. Опасные природные явления на поверхности суши: механизм и катастрофические следствия. – М.: ИГ РАН, ИФЗ РАН, 2008. – С. 11-29.
2. Бергер М. Г. Газодинамический выброс ледника Колка 20 сентября 2002 г. – новое катастрофическое природное явление. // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Тезисы докладов Международной конференции, г. Владикавказ, 23-26 июня 2004 г. – Владикавказ: РЕМАРКО, 2004. – С. 4-5.
3. Бергер М. Г. Природная катастрофа на леднике Колка 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника. // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Доклады Международной конференции. Владикавказ-Москва, 23-26 июня 2004 г. – Владикавказ: Олимп, 2006. – С. 41-49.

4. Бергер М. Г. Ледник Колка: Катастрофа 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 248 с.
5. Бирюков Ю. М. Техногенная газодинамика. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2011. – 159 с.
6. Внезапный выброс. // Горная энциклопедия. Т. 1. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1984. – С. 392-393.
7. Гляциологический словарь. / Под ред. В. М. Котлякова. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 528 с.
8. Гордеев Е. И., Салтыков В. А., Сеницын В. И., Чебров В. Н. Временные и пространственные характеристики волновых полей вулканического дрожания. // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 4. – С. 98-112.
9. Инструкция по составлению каталога пульсирующих ледников СССР. // Материалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждения. – 1982. – Вып. 44. – С. 208-225.
10. Красюк Н. Н., Золотых С. С., Максименко Ю. М., Осыка Я. С., Абрамкин Н. И. Механизм формирования выбросоопасной ситуации и способы предотвращения выбросоопасности угленосного массива: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 107 с.
11. Никитин М. Ю., Гончаренко О. А., Галушкин И. В. Динамика и стадийность развития Геналдонского ледово-каменного потока на основе дистанционного анализа. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2007. – Т. 7. № 3. – С. 2-15.
12. Панов В. Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 432 с.
13. Петросян А. Э., Иванов Б. М., Крупеня В. Г. Теория внезапных выбросов. – М.: Наука, 1983. – 152 с.
14. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
15. Покровский Г. И. Взрыв. 4-е изд. – М.: Недра, 1980. – 190 с.
16. Процесс схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. / Отв. ред. В. Б. Заалишвили. – Владикавказ: ВНИЦ РАН и РСО-А, 2009. – 165 с.
17. Ромашов А. Н. Особенности развития выброса породы при взрывах на склоне. // Разрушение и деформирование твердой среды взрывом. Взрывное дело. Сборник № 76/33. – М.: Недра, 1976. – С. 85-97.
18. Ромашов А. Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. – М.: Недра, 1980. – 244 с.
19. Рототаев К. П., Ходаков В. Г., Кренке А. Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. – М.: Наука, 1983. – 169 с.
20. Черниговский А. А. Применение направленного взрыва в горном деле и строительстве. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 319 с.
21. Benn D. I., Evans D. J. A. *Glaciers and Glaciation*. London: Arnold, 1998. 734 p.
22. Evans D. J. A., Rea B. R. Surging glacier landsystem // *Glacial Landsystems*. L.: Arnold, 2003. P. 259-288.
23. Hart J. K. Identifying fast ice flow from landform assemblages in the geological record: a discussion // *Annals of Glaciology*. 1999. Vol. 28. P. 59-66.
24. Evans S. G., Bishop N. F., Smoll L. F., Murillo P. V., Delaney K. B., Oliver-Smith A. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970 // *Engineering Geology*. 2009. V. 108. № 1-2. P. 96-118. – DOI:10.1016/j. enggeo. 2009.06.020.
25. Huggel C. Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 1119-1130.
26. Hornes A., Gjermundsen E. F., Rasmussen T. L. // From mountain top the deep sea Delectation in 4D of the northwestern Barents Sea ice sheet. *Quaternary Science Reviews* 2013, vol. 75, p. 78-99.

References

1. Ananicheva M.D., Glazovskii A.F., Kotlyakov V.M., Mikhaleiko V.N., Nosenko G.A., Osipova G.B., Rototaeva O.V., Solomina O.N., Tsvetkov D.G. Instability of modern glaciation, glacial disasters. Changes in the environment and climate. Natural and related technological disasters. In 8 volumes. Volume III Natural hazards on land: mechanism and catastrophic consequences. Moscow. IG RAS, IPE RAS, 2008. pp. 11-29. (In Russ.)
2. Berger M. G. The gas-dynamic outburst of the Kolka glacier on September 20, 2002 is a new catastrophic natural phenomenon. In: Prevention of dangerous situations in high mountain regions (abstract). Vladikavkaz, June 23-26, 2004, Vladikavkaz: REMARKO, 2004. pp. 4-5. (In Russ.)
3. Berger M. G. The natural disaster on the Kolka glacier on September 20, 2002 is a sudden gas-dynamic outburst of the glacier. In: Prevention of dangerous situations in high mountain regions (report). Vladikavkaz-Moscow, June 23-26, 2004, Vladikavkaz, Olimp, 2006. pp. 41-49. (In Russ.)
4. Berger M. G. Kolka Glacier: The catastrophe of September 20, 2002 is a sudden gas-dynamic outburst of a glacier. Moscow. Publishing House of LKI, 2007. 248 p. (In Russ.)
5. Biryukov Yu. M. Technogenic gas dynamics. Kaliningrad, Publishing House of FSBEI HPE "KSTU", 2011. 159 p. (In Russ.)
6. A sudden outburst. Mining Encyclopedia. Vol. 1. Moscow. Publishing house "Soviet Encyclopedia", 1984. pp. 392-393. (In Russ.)
7. Glaciological dictionary. Leningrad. Gidrometeoizdat, 1984. 528 p. (In Russ.)
8. Gordeev E. I., Saltykov V. A., Sinitsyn V. I., Chebrov V. N. Temporal and spatial characteristics of wave fields of volcanic tremor. Volcanology and seismology. 1989. No. 4. pp. 98-112. (In Russ.)
9. Instructions for compiling a catalog of surging glaciers of the USSR. Materials of glaciological studies. Chronicle, discussions. 1982. Issue. 44. pp. 208-225. (In Russ.)
10. Krasnyuk N. N., Zolotikh S. S., Maksimenko Yu. M., Osyka Ya. S., Abramkin N. I. The formation mechanism of an outburst-hazardous situation and ways to prevent the outburst hazard of a carbonaceous massif. Textbook. Moscow. Publishing House of MSU, 2004. 107 p. (In Russ.)
11. Nikitin M. Yu., Goncharenko O. A., Galushkin I. V. Dynamics and staged development of the Genaldon ice-stone stream based on remote analysis. Bulletin of the VSC RAS and RNO-A, 2007. Vol. 7. No³. pp. 2-15. (In Russ.)
12. Panov V. D. The evolution of modern glaciation of the Caucasus. Saint Petersburg. Gidrometeoizdat, 1993. 432 p. (In Russ.)
13. Petrosyan A. E., Ivanov B. M., Krupenya V. G. Theory of sudden outbursts. Moscow. Nauka, 1983. 152 p. (In Russ.)
14. Petukhov I. M., Lin'kov A. M. Mechanics of rock bumps and outbursts. Moscow. Nedra. 1983. 280 p. (In Russ.)
15. Pokrovskii G. I. Explosion. 4th ed. Moscow. Nedra, 1980. 190 p. (In Russ.)
16. The process of the Kolka glacier collapse on September 20, 2002. Vladikavkaz, VSC RAS and North Ossetia-Alania, 2009. 165 p. (In Russ.)
17. Romashov A. N. Development features of the rock outburst during explosions on the slope. Destruction and deformation of a solid medium by explosion. Blasting. Collection No. 76/33. Moscow. Nedra, 1976. pp. 85-97. (In Russ.)
18. Romashov A. N. Features of the large underground explosions. Moscow. Nedra, 1980. 244 p. (In Russ.)
19. Rototaev K. P., Khodakov V. G., Krenke A. N. Exploration of the surging Kolka glacier. – Moscow. Nauka, 1983. 169 p. (In Russ.)
20. Chernigovskii A. A. The use of a directed explosion in mining and construction. 2nd edition. Moscow. Nedra, 1976. 319 p. (In Russ.)
21. Benn D. I., Evans D. J. A. Glaciers and Glaciation. London, Arnold, 1998. 734 p.

22. Evans D.J. A., Rea B.R. Surging glacier landsystem. *Glacial Landsystems*. London, Arnold, 2003. pp. 259-288.
23. Evans S.G., Bishop N.F., Smoll L.F., Murillo P.V., Delaney K.B., Oliver-Smith A. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*. 2009. Vol. 108. No. 1-2. pp. 96-118. DOI:10.1016/j. enggeo. 2009.06.020.
24. Hart J. K. Identifying fast ice flow from landform assemblages in the geological record: a discussion. *Annals of Glaciology*. 1999. Vol. 28. pp. 59-66.
25. Hornes A., Gjermundsen E. F., Rasmussen T. L. From mountain top the deep sea Delectation in 4D of the northwestern Barents Sea ice sheet. *Quaternary Science Reviews*. 2013. Vol. 75. pp. 78-99.
26. Huggel C. Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation. *Quaternary Science Reviews*. 2009. Vol. 28. pp. 1119-1130.

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.243

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59063](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59063)

Оригинальная статья

Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа

Т. В. Гиоргобиани^{1,2}

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

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

Статья поступила: 10.01.2020, после рецензирования: 06.02.2020, принята к публикации: 07.02.2020

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрены основные важные особенности складчатой системы Большого Кавказа. Важнейшей особенностью Большого Кавказа является асимметричная латеральная структурная зональность его главной линейной складчатой системы. Она выражена в смене в поперечном сечении региона с юго-запада на северо-восток сильно сжатой складчатости умеренной, а затем слабой, переходящей в пологую моноклинали. Кроме основной линейной складчатости северо-западного простирания на Большом Кавказе развиты наложенные на нее поперечные структуры. **Цель работы** – изучение этапов и механизмов формирования складчатости Большого Кавказа. Установлено, что в складчатой структуре выделяются два главных этапа альпийской дислокации региона, которые происходили в различных геодинамических условиях. Первый этап деформации отвечает ранне-среднеальпийской и раннеорогенной стадиям развития и проходил в обстановке северо-восточного тангенциального сжатия Большого Кавказа. Второй этап дислокации, представляющий позднеорогенную стадию развития региона, проходил в условиях субмеридионального горизонтального сжатия и привел к образованию интерференционной складчатости и тектонических покровов. **Методы:** полевые геолого-структурные исследования складчатой системы Большого Кавказа, которые позволили установить его сложное и неоднородное строение. **Результаты.** По-новому рассмотрены динамика и механизмы формирования складчатости Большого Кавказа и на основании анализа ее структуры установлены условия складкообразования. Высказано мнение, что деформации внешнего сжатия были вызваны проявлением в регионе локальных, региональных и глобальных геодинамических процессов, обусловленных сближением Африкано-Аравийского континента с Евразийской. Выяснено, что в структурообразовании Большого Кавказа решающую роль играл прилегающий к нему с юга Черноморско-Закавказский микроконтинент и его кинематика на разных этапах деформации региона. Он перемещался на север и придвигался к Большому Кавказу вдоль плоскости Южного краевого глубинного разлома и обуславливал его альпийскую дислокацию. **Общим** региональным механизмом формирования складчатой системы Большого Кавказа был не общепринятый в настоящее время поддвиговый механизм образования деформации, а более обоснованный фактическим материалом придвиговый механизм тектогенеза.

Ключевые слова: Большой Кавказ, складчатая структура, этапы деформации, механизм формирования, геодинамика, тангенциальное сжатие, зональность, фаза складчатости.

Для цитирования: Гиоргобиани Т.В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (1): 35-42. DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59063](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59063).

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59063](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59063)

Original paper

Stages, Mechanism and Geodynamics of Formation of the Folded System of the Greater Caucasus

T. V. Giorgobiani^{1,2}¹Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 1 Chavchavadze Ave., Tbilisi 0179, Georgia;²Al. Djanelidze Geological Institute, 31 A. Politkovskaia Str., Tbilisi 1086, Georgia,

e-mail: ciala_gugava@mail.ru

Received: 10.01.2020, revised: 06.02.2020, accepted: 07.02.2020

Abstract: The relevance of the work. The article considers the main important features of the folding system of the Greater Caucasus. The most important feature of the Greater Caucasus is the asymmetric lateral structural zonality of its main linear folded system. It is expressed in the change in the cross section of the region from southwest to northeast of highly compressed folding of moderate and then weak folding into a gentle monocline. In addition to the main linear folding of the northwestern strike in the Greater Caucasus, superimposed transverse structures are developed. **The purpose of the work** is to study the stages and mechanisms of the folding of the Greater Caucasus. It is established that in the folded structure there are two main stages of the alpine dislocation of the region, which took place under different geodynamic conditions. The first stage of the deformation corresponds to the early-mid-Alpine and early-orogenic stages of development and took place in an atmosphere of northeast tangential compression of the Greater Caucasus. The second stage of dislocation, which represents the late orogenic stage of the region development, took place under conditions of submeridional horizontal compression and led to the formation of interference folding and tectonic covers. **Methods:** field geological and structural studies of the folded system of the Greater Caucasus, which made it possible to establish its complex and heterogeneous structure. **Results.** The dynamics and mechanisms of the folding of the Greater Caucasus are examined in a new way and the conditions of folding are established on the basis of an analysis of its structure. The opinion was expressed that the external compression deformations were caused by the manifestation of local, regional and global geodynamic processes in the region, due to the rapprochement of the African-Arabian continent with the Eurasian. It was found that the Black Sea-Transcaucasian microcontinent adjacent to it from the south and its kinematics at different stages of the region's deformation played a decisive role in the structural formation of the Greater Caucasus. It moved north and moved towards the Greater Caucasus along the plane of the Southern marginal deep fault and caused its alpine dislocation. The general regional formation mechanism of the fold system of the Greater Caucasus was not the currently widely accepted sub-thrust deformation mechanism, but the pre-thrust mechanism of tectogenesis that is more substantiated by the actual material.

Keywords: Greater Caucasus, folded structure, stages of deformation, formation mechanism, geodynamics, tangential compression, zonality, folding stage.

For citation: Giorgobiani T. V. Stages, Mechanism and Geodynamics of Formation of the Folded System of the Greater Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (1): 35-42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063.

Введение

Детальными геолого-структурными исследованиями альпийской складчатой структуры Большого Кавказа (БК) было установлено значительно более сложное и неоднородное ее строение, чем это предполагалось ранее. Складчатость БК выражена разнотипными пликативными образованиями. Важнейшая особенность БК

закладывается в асимметричной латеральной структурной зональности его главной линейной складчатой структуры, установление механизма возникновения которой представляется **актуальной** для изучения складчатости Большого Кавказа. Наиболее четко это проявлено в малым-эоценовом этаже Северо-Западного Кавказа, менее четко – на Юго-Восточном Кавказе. Зональность выражена в последовательной смене в поперечном сечении БК с юго-запада на северо-восток интенсивной линейной сильно сжатой складчатости умеренной, а затем слабой, переходящей в полого наклоненную на северо-восток моноклиналь [Гиоргобиани, Закарая, 1980; Gamkrelidze et al., 1998; Giorgobiani, 1995].

Кроме основной продольной складчатости северо-западного простираения на БК развиты поперечные более молодые изометричные или эллиптические в плане интерференционные складчатые структуры. Это характерно для зоны Южного склона БК, где, кроме того, значительное развитие имеют и тектонические покровы.

Этапы развития деформаций на Большом Кавказе

Развитие на БК разноориентированных и разновозрастных пликативных структур характеризует два этапа альпийской дислокации региона. Каждый этап деформации на БК проходил в определенной геодинамической обстановке и в различных кинематических условиях [Gamkrelidze, Giorgobiani, 1990]. Этапы в свою очередь, состоят из нескольких фаз деформации со сходными геодинамическими и кинематическими процессами, дифференциация которых является **целью** настоящей работы [Григорьянц, 1968].

Первый этап деформации БК отвечает ранне-среднеальпийской и раннеорогенной стадиям (юра-средний миоцен), характеризующимся региональным северо-восточным сжатием при проявлении в регионе батской (предкелловейской) пиренейской, штирийской фаз складчатости. Наложенные друг на друга одинаково направленные суммарные деформации привели к формированию главной региональной линейно-зональной складчатости БК [Giorgobiani, 2003]. Второй этап дислокации, представляющий позднеорогенную стадию (поздний миоцен-антропоген) развития БК, характеризуется сменой деформации северо-восточного сжатия субмеридиональным [Островский, Бурлакин, 1974]. Он включает проявления аттической, роданской, валахской и четвертичной фаз сжатия, приведших к образованию целого класса разнообразных коллизионных структур, в том числе интерференционной складчатости и тектонических покровов.

Основные альпийские деформации происходили в условиях различно ориентированного горизонтального давления [Мирчинк, Шурыгин, 1972]. Ранний этап деформации характеризовался северо-восточным тангенциальным сжатием и горизонтальным сокращением мощных слоистых мезозойско-кайнозойских толщ осадочного прогиба БК, вызывая их складчатость. Поздний этап проходил после формирования основной складчатости и консолидации региона в обстановке континентальной коллизии. Это сопровождалось формированием новых пликативных и разрывных тектонических образований, а также резким усилением орогенических движений на БК. Первый этап деформации условно можно назвать этапом «мягкой» коллизии, второй – этапом «жесткой» коллизии [Короновский, Демина, 1999]. На проявление складкообразовательных процессов в регионе в позднем сармате-антропогене уже давно указывал Е. Е. Милановский, который считал, что в новейшее время, главным образом в краевых зонах БК, продолжалось формирование складчатых структур [Милановский, 1968].

Методы геотектонического картирования и установления индикаторов геодинамических обстановок позволили установить причины проявления этапов деформации на БК, определить механизмы последовательного образования тектонических структур в регионе. Результаты детального анализа морфологии современной складчатой структуры БК, включающие изучение особенностей ее очертания в плане, показали, что в течение альпийского цикла развития БК испытывал односторонние, направленные с юга, горизонтальные деформации. Было установлено, что дислокации тангенциального внешнего сжатия, были вызваны проявлением на БК региональных и глобальных геодинамических процессов.

Зоны интенсивно сжатой ранней складчатости и новейших коллизионных складчатых структур на южном склоне БК, указывают на то, что в деформации этого региона решающую роль играл прилегающий к нему с юга Черноморско-Закавказский микроконтинент (ЧЗМ), его геодинамика и кинематика на разных этапах деформации БК.

Возникновение различных геодинамических обстановок в это время в регионе было обусловлено глобальными геодинамическими событиями [Гиоргобиани, 2015]. В течение альпийских этапов дислокации в Ирано-Кавказском регионе таким процессом было сближение Африкано-Аравийского континента с Евразией. Этот глобальный тектонический процесс является основным источником возникновения направленных с юга на север тангенциальных усилий, действовавших на всем протяжении альпийской эпохи.

К началу раннего этапа деформации (средняя юра) в связи с раскрытием Северной Атлантики, Африкано-Аравийский континент испытывал дрейф в северо-восточном направлении и воздействовал на Ирано-Кавказский регион [Giorgobiani et al., 1998].

Возникающее при этом ориентированное на северо-восток тангенциальное сжатие передавалась ЧЗМ, который в свою очередь, оказывал давление на БК. В процессе дислокации изученного региона решающую роль играл ЧЗМ, который прижимался к плоскости крутопадающего на север Южного краевого глубинного разлома (ЮКР) БК (в разных сегментах БК ЮКР носит разные названия), обуславливал его деформацию. Главной причиной регионального тангенциального сжатия было придвигание единого относительно жесткого ЧЗМ к заполненному мощными отложениями более пластичному осадочному прогибу БК [Рогожин, Шолпо, 1988].

Результаты работ дают возможность установить кинематику ЧЗМ при формировании складчатости на первом этапе деформации БК в виде придвига (термин Е. И. Паталахи) [Паталаха, 1976]. При этом ЮКР, характеризующийся многократным проявлением разнотипных смещений, приобретает новую складкообразующую функцию – он явился поверхностью приложения регионального северо-восточного давления, передающего его большекавказскому морскому бассейну.

Это одностороннее давление вызывало сжатие многокилометрового мезозойско-кайнозойского осадочного комплекса БК. В результате такой деформации происходило продольное изгибание разновеликих слоистых толщ и образование на БК главной региональной складчатости северо-западного простирания. В процессе складкообразования, очевидно, принимал участие и палеозойский фундамент, испытывающий, вероятнее всего, слабые складчатые изгибы [Сомин, 1982]. Придвиговая кинетика ЧЗМ и вызванное ею горизонтальное, направленное с юго-запада, сжатие определило асимметричную латеральную зональность складчатой структуры БК. В результате этого деформационного процесса в прилегающей к ЮКР

зоне возникала наиболее напряженная сильно сжатая складчатая структура. Интенсивность складчатости постепенно уменьшается в северо-восточном направлении. Сначала развита зона среднесжатой складчатости, а затем зона слабосжатых складчатых структур, которая в конце сменяется зоной моноклинали [Giorgobiani, 1995]. Очевидно, что происхождение поперечной односторонней зональности складчатой структуры БК обязано фактору спада складкообразующих усилий при удалении от ЮКР. Развитие асимметричной структурной зональности в пределах БК указывает на то, что отделенная от него Северным краевым разломом Скифская платформа в этом складкообразовательном процессе играла пассивную роль, оставалась относительно неподвижной и выполняла функцию жесткого упора.

Следовательно, общим региональным механизмом деформации БК на раннем этапе являлись придвиговые движения ЧЗМ и связанное с ними северо-восточное тангенциальное сжатие. Последнее, в свою очередь, вызывало совместное действие разных частых способов (механизмов) складкообразования (изгиб путем межпластового скольжения, ламинарное течение или их комбинация), обусловивших формирование самых разнообразных типов складчатости региона.

Главной фазой, обусловившей формирование основной линейной складчатой структуры БК, очевидно, являлась проявившаяся в конце эоцена пиренейская фаза активного сжатия, роль предкеловейской фазы значительно меньше. Деформации в условиях северо-восточного сжатия в регионе продолжались и в штирийскую фазу тектогенеза. Об этом свидетельствует наличие в периклинальных частях БК совместных деформаций, несогласно залегающих между собой эоцен-нижнемиоценовых и среднемиоценовых отложений, которые конформно смяты в единые складки северо-западного простирания (аз. 290-310°).

К началу позднего этапа деформации БК (с позднего сармата) произошел раскол Африкано-Аравийского континента и отделение от него Аравийской плиты.

Обособленная Аравийская плита начала дрейф на север в субмеридиональном направлении и внедрилась в Анатолийско-Кавказско-Иранскую складчатую область Средиземногорского пояса, что вызвало резкую смену плана тангенциальных деформаций от северо-восточного на долготное [Гиоргобиани, 2007]. В результате на новейшем этапе деформации БК и прилегающие к нему с юга регионы оказались в обстановке континентальной коллизии, характеризующейся интенсивным субмеридиональным стрессом.

На позднем этапе деформации в условиях долготного сжатия и субширотного растяжения БК и ЧЗМ совместно были рассечены крупными субмеридиальными разломами на отдельные части. БК был разделен на Северо-Западный, Центральный, Восточный и Юго-Восточный сегменты, а ЧЗМ – на одноименные наноплиты. Последние, в свою очередь, крутопадающими разломами были расчленены на отдельные поперечные блоки-шоли. В результате этого процесса в северной части ЧЗМ возник целый ансамбль блоков различных размеров, подвергающихся автономным дислокациям. Следовательно, на втором коллизионном этапе деформаций на южный край БК воздействовал не единый и целостный ЧЗМ, как на предыдущем этапе, а составляющие его разновеликие блоки-шоли и наноплиты, возникшие при его деструкции. Эти структуры совместно с соответствующими им отрезками ЮКР и складчатой системы БК образовали пары блоков ЧЗМ и БК. Они в обстановке субмеридионального давления испытывали разнообразные совместные деформации. Одни шоли и наноплиты, придвигались к разломной границе и внедрялись в складчатую структуру БК, а другие пододвигались под нее. Придвиг мог развиваться как

в альпийском чехле, так и в полеозойском фундаменте региона, обеспечивая при этом их совместное сжатие в процессе складчатости.

Однонаправленному северному движению шолей и наноплит, очевидно, способствовала тектоническая расслоенность земной коры ЧЗМ, допускающая возможность горизонтального перемещения ее различных слоев. Зависимости от кинематики долготного движения малых и мелких блоков ЧЗМ в пределах БК возникали разнотипные структуры. Придвиговые деформации вызывали вдавливание (вдвигание) отдельных шолей ЧЗМ в сформированную на раннем этапе главную линейную складчатость северо-западного простирания БК. Возникающее при этом субмеридиональное сжатие, наложенное на складчатые структуры северо-западного простирания, обусловило переориентировку и преобразование существующих линейных складок и формирования новых структур в виде нелинейной интерференционной складчатости. При поддвиговом перемещении шолей и наноплит ЧЗМ под БК формировались тектонические покровы. Новейшими деформациями были охвачены все сегменты БК, кроме Восточного. Субмеридиональное расчленение складчатой системы БК, а также ЧЗМ и образование наложенных структур здесь не происходило.

Заключение

Общим механизмом деформации БК на позднем этапе является субмеридиональное локальное сжатие за счет придвиговых и поддвиговых смещений под воздействием шолей и наноплит ЧЗМ на БК. Данный процесс на коллизионном этапе является главным источником давления на БК, а механизмы структурообразования определяются характером движения плит. При придвиговой кинематике блоков действует интерференционный механизм формирования складчатых структур, вызывающий возникновение, как отмечалось выше, пересекающейся – интерференционной складчатости [Гиоргобиани, 2012; Adamia et al., 1977; Giorgobiani, Zakaraia, 2010]. В условиях поддвиговой кинематики малых и мелких блоков ЧЗМ, формируются тектонические покровы. Главные коллизионные деформации на БК происходили в процессе плиоцен-плейстоценовых фаз складчатости и продолжаются ныне [Шолпо и др., 1993; Giorgobiani, Zakaraia, 2013].

Проведенный структурно-кинематический анализ складчатой структуры БК показал несостоятельность существующего и общепризнанного в настоящее время поддвигового механизма образования складчатости. Он достоверно не объясняет особенности происхождения структур, а также условия проявления альпийского тектогенеза и должен быть заменен более реальным и обоснованным фактическим материалом придвиговым механизмом деформации.

Литература

1. Гиоргобиани Т.В. Позднеальпийская пересекающаяся складчатость в структуре южного склона Большого Кавказа. // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Т. 1. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – С. 344-348.
2. Гиоргобиани Т.В. Этапы альпийского складкообразования Большого Кавказа и их связь с геодинамикой Африкано-Аравийского континента. // Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы. Материалы XLV11 тектонического совещания. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2015. – С. 93-97.
3. Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. О зональности складчатой структуры Северо-Западного Кавказа. // Сообщения АН ГССР. – 1980. – №2. Т. 100. – С. 357-360.

4. Григорьянц Б. В. Условия образования прерывистой складчатости в геосинклинальных областях на примере востока Большого Кавказа. // Геотектоника. – 1968. – №4. – С. 128-136
5. Короновский Н. В., Демина Л. И. Коллизионный этап развития Кавказского сектора альпийского складчатого пояса. // Геотектоника. – 1999. – №2. – С. 17-35.
6. Милановский Е. Е. Новейшая тектоника Кавказа. – М.: Недра, 1968. – С. 350-373.
7. Мирчинк М. Ф., Шурыгин А. М. Формирование структуры третичных и меловых отложений юго-восточного погружения Кавказа. – М.: Наука, 1972. – 60 с.
8. Островский А. Б., Бурлакин В. Е. Об интерференционных тектонических структурах (на примере южного склона Западного Кавказа. // Тез. Докл. IV Конф. по геологии и полез. ископ. Северного Кавказа. – Ессентуки. – 1974. – С. 96-97.
9. Паталаха Е. И. Явление придвига в разломной тектонике. // ДАН СССР. – 1976. – Т. 228. №5. – С. 1175-1178.
10. Рогожин Е. А. Шолпо В. Н. Неоднородность зоны полной складчатости Большого Кавказа // Геотектоника. – 1988. – №5. – С. 79-93.
11. Сомин М. Л. О движениях формировавших структуру Большого Кавказа. // Проблемы геодинамики Кавказа. – М.: Наука, 1982. – С. 122-129.
12. Шолпо В. Н., Рогожин Е. А., Гончаров М. А. Складчатость Большого Кавказа. – М.: Наука, 1993. – 192 с.
13. 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.
14. 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.
15. Gamkrelidze I., Giorgobiani T., Kuloshvili S., Lobjanidze G., Shengelaia G. Active Deep Faults Map and Catalogue for the Territory of Georgia. // Bulletin of the Georgian Academy of Sciences. – 1998. – Vol. 157. No. 1. – Pp. 80-85.
16. Giorgobiani T. Condition of formation of the Alpine structure of the North-Western Caucasus. // Geologica Balcanica. – 1995. – No. 25. – Pp. 27-34.
17. Giorgobiani T. V. Origin of horst-anticlinorium of the main range, the Eastern Caucasus. // Reports Earth Sciences. – 2003. – V. 388. №1. – Pp. 16-20.
18. Giorgobiani T., Basheleishvili L., Zakaraia D. The Northwest Drift of the Gondwanian Lithospheric Plates and Geodynamics of the Formation of the Caucasian Orogen. // Journal of African Earth Sciences. – 1998. – No. 27. 1A. – Pp. 88-89.
19. Giorgobiani T., Zakaraia D. Intersecting Folding of Some Tectonic Zones of the Greater Caucasus. The problems of Geology of the Caucasus. // International Science Conference. Proceedings. 25-27 November 2010. V. 1. – Tbilisi. – 2010. – Pp. 39-41.
20. Giorgobiani T., Zakaraia D. The Newest and Modern Tectonics of the Greater Caucasus and of the Adjacent Transcaucasus. // 1st International Conference and Workshop. Caucasus Active Tectonics and Magmatism. Hazards and Resources. 29 August-3 September. – Tbilisi. – 2013. – Pp. 17-18.

References

1. Giorgobiani T. V. Late Alpine intersecting folding in the structure of the southern slope of the Greater Caucasus. Tectonophysics and current issues of Earth sciences. Vol. 1. Moscow. IPE RAS, 2012. pp. 344-348. (In Russ.)
2. Giorgobiani T. V. Stages of alpine folding of the Greater Caucasus and their relationship with the geodynamics of the African-Arabian continent. Tectonics and geodynamics of the

continental and oceanic lithosphere. Proceedings of the XLV11 Tectonic Meeting. Vol. 1. Moscow. GEOS, 2015. pp. 93-97. (In Russ.)

3. Giorgobiani T.V., Zakaraya D.P. About the zonality of the folded structure of the Northwest Caucasus. Reports of GSSR Academy of Sciences. 1980. No. 2. Vol. 100. pp. 357-360. (In Russ.)

4. Grigor'yanc B.V. Conditions for the formation of intermittent folding in geosynclinal areas on the example of the east of the Greater Caucasus. *Geotektonika*. 1968. No. 4. pp. 128-136. (in Russ.)

5. Koronovskii N.V., Demina L.I. The collisional stage in the development of the Caucasian sector of the alpine folding belt. *Geotectonics*. 1999. No. 2. pp. 17-35. (In Russ.)

6. Milanovskii E.E. The latest tectonics of Caucasus. Moscow. Nedra, 1968. pp. 350-373. (In Russ.)

7. Mirchink M.F., SHurygin A.M. Formation of the structure of tertiary and Cretaceous sediments of the south-eastern depression of the Caucasus. Moscow. Nauka, 1972. 160 p. (in Russ.)

8. Ostrovskii A.B., Burlakin V.E. On interference tectonic structures (on example of the southern slope of the Western Caucasus). Proceedings of reports, IV Conference on geology and mineral deposits of North Caucasus. Essentuki. 1974. pp. 96-97. (in Russ.)

9. Patalakha E.I. The phenomenon of a shift in fault tectonics. Reports of USSR Academy of Sciences. 1976. Vol. 228. No. 5. pp. 1175-1178. (In Russ.)

10. Rogozhin E.A., Sholpo V.N. Heterogeneity of the complete folding zone of the Greater Caucasus. *Geotektonika*. 1988. No. 5. pp. 79-93. (in Russ.)

11. Somin M.L. About the movements that formed the structure of the Greater Caucasus. Problems of geodynamics of the Caucasus. Moscow. Nauka, 1982. pp. 122-129. (In Russ.)

12. Sholpo V.N., Rogozhin E.A., Goncharov M.A. The folding of the Greater Caucasus. Moscow. Nauka, 1993. 192 p. (in Russ.)

13. 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.

14. 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.

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

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

17. Giorgobiani T.V. Origin of horst-anticlinorium of the main range, the Eastern Caucasus. *Reports Earth Sciences*. 2003. Vol. 388. No. 1. pp. 16-20.

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

19. Giorgobiani T., Zakaraia D. Intersecting Folding of Some Tectonic Zones of the Greater Caucasus. The problems of Geology of the Caucasus. International Science Conference. Proceedings. 25-27 November 2010. Vol. 1. Tbilisi. 2010. pp. 39-41.

20. Giorgobiani T., Zakaraia D. The Newest and Modern Tectonics of the Grater Caucasus and of the Adjacent Transcaucasus. 1st International Conference and Workshop. Caucasus Active Tectonics and Magmatism. Hazards and Resources. 29 August-3 September. Tbilisi. 2013. pp. 17-18.

УДК 550.344.385

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59064](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59064)

Оригинальная статья

Отклик локального геомагнитного поля на геодинамические процессы при подготовке Спитакского землетрясения 1988 г.

А. Г. Григорян, Д. А. Лиходеев

Институт Физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Большая
Грузинская ул. 10, Москва 123995, Российская Федерация, e-mail: ag-grig@ifz.ru

Статья поступила: 11.12.2019, после рецензирования: 21.02.2020, принята к публикации: 28.02.2020

Резюме: Актуальность работы. Изучение изменений локального геомагнитного поля с целью выявления предвестников сильных землетрясений, особенно в сейсмоактивных регионах, где расположены большие города и объекты особо важного значения (АЭС, водохранилище и т.п.) остается одной из главных задач современной науки. В разных странах мира, используя магнитометрические методы, проводятся исследования по поиску предвестников сильных землетрясений. **Цель.** Однако, за первую половину XX века, несмотря на отдельные попытки ученых Японии и других стран, серьезных результатов достичь не удалось. Установлено, что с развитием геодинамических процессов в земной коре, особенно при подготовке сильных землетрясений, происходят изменения в магнитных свойствах горных пород (электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости). Геомагнитные вариации, создаваемые внешним источником, несут в себе важную информацию об изменениях в физических свойствах в земной коре и верхней мантии, а так же позволяют оценить эти изменения. **Методы.** Представлена методика, которая позволяет с помощью изучения вариаций локального геомагнитного поля, создаваемых внешним источником, выявить изменения в электропроводности на разных глубинах земной коры и верхней мантии, связанные с развитием геодинамических процессов. С этой целью использован расчетный параметр $N(A)$, который является отношением амплитуд вариаций геомагнитного поля внешнего происхождения, измеренных синхронно на разных парах станций. Изучены вариации с периодами 10–25, 30–60 минут и S_q -вариации. Метод применяется в низкоширотных областях Земли, где вариации переменного геомагнитного поля хорошо выделяются. **Результаты.** Используя предлагаемую методику, на территории Армении были выявлены аномальные изменения локального отклика геомагнитного поля перед Парванийским 1986 г. ($M=5,4$) и Спитакским 1988 г. ($M=7,0$) землетрясениями. Предполагается, что причинами изменений в физических свойств геологической среды в частности электропроводности, являются дегазация Земли и вертикальная фильтрация флюидов в верхние слои земной коры.

Ключевые слова: геомагнитное поле, геодинамические процессы, бухтообразные вариации, синхронная разность, антиклинорий.

Для цитирования: Григорян А.Г., Лиходеев Д.А. Отклик локального геомагнитного поля на геодинамические процессы при подготовке Спитакского землетрясения 1988 г. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10(1): 43–54. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59064.

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59064](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59064)

Original paper

The response of the local geomagnetic field to geodynamic processes during the preparation of the 1988 Spitak earthquake

A. G. Grigoryan, D. A. Likhodeev

Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya Str.,
Moscow 123995, Russian Federation, e-mail: ag-grig@ifz.ru

Received: 11.12.2019, revised: 21.02.2020, accepted: 28.02.2020

Abstract: Relevance. The study of local geomagnetic field changes in order to identify harbingers of strong earthquakes, especially in seismically active regions where large cities and especially important objects (nuclear power plants, a storage reservoir, etc.) are located remains one of the main tasks of modern science. In different countries studies are being conducted to search for precursors of strong earthquakes, using magnetometric methods. **Aim.** However, for the first half of the 20th century, despite some attempts by scientists from Japan and other countries, no serious results were obtained. It has been established that with the progress of geodynamic processes in the earth's crust, especially during the preparation of strong earthquakes, changes in the magnetic properties of rocks (electrical conductivity, dielectric and magnetic permeability) occur. However, geomagnetic variations created by an external source carry important information about changes in physical properties, in particular, electrical conductivity in the earth's crust to the upper mantle, and make it possible to evaluate these changes. **Methods.** A technique that allows to identify changes in electrical conductivity at different depths of the earth's crust and upper mantle associated with the development of the geodynamic process, using the study of local geomagnetic field variations created by an external source, is presented. For this purpose, parameter $N(A)$, which is the ratio of the amplitudes of variations of the geomagnetic field of external origin, measured synchronously at different pairs of stations, was used. Variations with periods of 10-25, 30-60 minutes and Sq-variations were studied. The method is used in low latitude areas of the Earth, where variations of the variable geomagnetic field stand out well. **Results.** Anomalous changes in the local geomagnetic field were revealed in Armenia before the Parvania 1986 ($M = 5.4$) and Spitak 1988 ($M = 7.0$) earthquakes, using the proposed methodology. It is assumed that the causes of changes in the physical properties of the geological environment, in particular, electrical conductivity, are most likely to be the degassing of the Earth and the vertical filtration of fluids into the upper layers of the earth's crust.

Keywords: geomagnetic field, geodynamic processes, magnetic bays, synchronous difference, anticlinorium.

For citation: Grigoryan A.G., Likhodeev D.A. The response of the local geomagnetic field to geodynamic processes during the preparation of the 1988 Spitak earthquake. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10(1): 43-54. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59064.

Введение

Предпосылки для применения методики в Армении является тот факт, что изучаемая территория относится к весьма активным с геологической точки зрения регионам Закавказья. Геомагнитные вариации, создаваемые внешним источником, позволяют выявить пространственно-временные изменения электромагнитной индукции в земной коре [Ваньян, Хайдман, 1996; Сковородкин, 1985].

Для изучения изменений геомагнитного поля часто применяется методика синхронной разности ΔT между различными парами станций, при высокоточных модульных измерениях [Кузнецова, Мельничук, 1973; Кузнецова, Максимчук, 1979; Сковородкин и др., 1985]. Но аномальные вариации ΔT являются суммарными. Выделить изменения электропроводности из суммарных вариаций геомагнитного поля только с помощью ΔT почти не возможно. Решение этой задачи рассмотрено в работах Ю.П. Сковородкина [Сковородкин, Тоноян, 1986].

Метод исследования

В 1986 г. Ю.П. Сковородкиным был предложен расчетный параметр $N(A)$, с помощью которого можно было оценить изменения электропроводности земной коры до верхней мантии и выделить, зоны, где могут сформироваться очаги будущих крупных землетрясений [Григорян, Сковородкин, 1998]. Расчетный параметр $N(A)$ является отношением амплитуд вариаций геомагнитного поля внешнего происхождения, измеренных синхронно на разных парах станций.

$$N(A) = A_i/A_j \quad (1)$$

где A_i и A_j являются амплитудами синхронно измеренных вариации в фиксированных пунктах (i, j).

Изучены S_q и бухтообразных вариаций компонент (δZ , δH , δD) геомагнитного поля. [Григорян, Сковородкин, 1998, 1999; Григорян, 2007].

Для решения многих научных и прикладных задач, связанных с изучением геомагнитного поля, необходимо разделять его на части, обусловленные различными источниками. Установлено, что в слое E ионосферы на высотах между 90 и 130 км текут электрические токи, которые вызывают вариации магнитного поля спокойных типов (солнечно- и лунно-суточные). Их эффекты заметны на поверхности Земли в средних и низких широтах. Эти токовые системы являются **внешними – δH^e** . Переменное магнитное поле внешнего происхождения во всем спектре геомагнитных вариаций индуцирует внутри проводящей Земли электрические токи, которые, в свою очередь сами становятся источниками изменения магнитного поля. Вариации полей этих источников принято называть **внутренними – δH^i** . Показано, что в среднем 2/3 амплитуды вариаций геомагнитного поля на поверхности Земли обусловлены внешними, а 1/3 внутренними источниками.

Вариации переменного геомагнитного поля, зарегистрированные на поверхности земли δH_n , являются суммой внешней индуцирующей δH^e и внутренней индуцированной δH^i составляющих:

$$\delta H_n = \delta H^e + \delta H^i \quad (2)$$

Так как внешний источник геомагнитных вариаций (токовые системы) находится в ионосфере на широте примерно $20^\circ N$, а пункты наблюдения в Армении на широтах от 38° до $40^\circ N$, то можно предполагать, что суточный ход S_q и бухтообразных вариаций на расстояниях, указанных на рисунке 1 между пунктами наблюдений, существенно не должны различаться.

С помощью сферических и гармонических функций были рассчитаны отличия в прохождении этих вариаций для δX , δY и δZ компонент полного вектора δT геомагнитного поля [Безуглая и др., 1986]. Расчеты были выполнены для широт, охватывающих всю территорию Таджикской ССР ($\Delta \Theta = \Theta - \Theta_0 = 2,5^\circ$). С помощью расчетов авторы вышеуказанных работ показали, что пространственно-временную

Таблица 1. / Table 1.

**Расчетные значения параметра N(A) для бухтообразных вариаций. /
The calculated values of the parameter N (A) for bay variations.**

N(A) для бухтообразных вариаций между ст. / N(A) for bay variations between station	Джрадроп–Товуз / Dzhrad-zor–Tovuz	Джрадроп–Гарни / Dzhrad-zor–Garni	Гарни–Товуз / Garni–Tovuz
Расч. N(A) _H / Calc. N(A) _H	0,997	1,05	0,95
Расч. N(A) _Z / Calc. N(A) _Z	0,999	1,0257	0,9739

структуру поля Sq-вариаций (поля внешнего происхождения) можно считать однородной.

Это показывает, что для уровня магнитной активности $K_p \leq 4$ внешнее поле для территории, где расположены магнитовариационные станции Армении, однородно, а изменения δH^H главным образом вызваны индуцированной δH^i составляющей [Григорян, Сковородкин, 1999].

В таблице 1 представлены результаты расчетов, которые показывают, что пространственно-временная структура поля бухтообразных вариаций также можно считать однородной [Григорян, Сковородкин, 1999].

Период вариаций (T) определяет глубину проникновения поля вариации [Kissin, Ruzajkin, 1997; Parkinson, 1959; Yamazaki, Rikitake, 1970; Mazzella, Morrison, 1974]. Для определения глубины проникновения поля вариаций, авторы работ [Безуглая и др., 1986] использовали известную в электроразведке зависимость

$$\partial = 159 \cdot \sqrt{10 \rho T} \quad \text{в системе SI,} \quad (3)$$

где ρ – сопротивление, T – период геомагнитной вариации. В результате получилось, что глубина проникновения поля Sq-вариаций достигает до 280 км. Использование Sq-вариаций позволило авторам работы [Безуглая и др., 1986] изучить изменение электропроводности всей земной коры и верхней мантии. Выбор периодов использованных гармоник бухтообразных вариаций таков, что временной ход параметра N(A) позволяет отражать изменения электропроводности на глубинах: для Sq-вариаций до 280 км, вар. 10-25 мин. 5-10 км, вар. 30-60 мин. 10-30 км.

Применение методики или магнитовариационный мониторинг на территории Армении

Для применения данной методики в Армении, была создана сеть геомагнитных исследований. В 1986 г. в трех наблюдательных пунктах «Джрадроп», «Гарни» и «Товуз» были установлены трехкомпонентные магнитовариационные станции, которые круглосуточно регистрировали компоненты геомагнитного поля.

Сеть станций была создана в 1986 г. Станция «Джрадроп» (рис. 1) находится в зоне высокой контрастности новейших тектонических движений с дифференцированными блоковыми поднятиями и относительными опусканиями, выраженными в рельефе преимущественно обращенными формами, и является одной из крупных и сложных зон разрывных нарушений мегантиклинория Малого Кавказа [Габриелян и др., 1981]. Станция «Гарни» расположена в Веди-Айюцзорской подзоне дифференцированных, унаследованных с олигоцена и миоцена и отраженных в рельефе в прямой форме антиклинальных (горст – антиклинали) и (грабен – синклинали) поднятий.

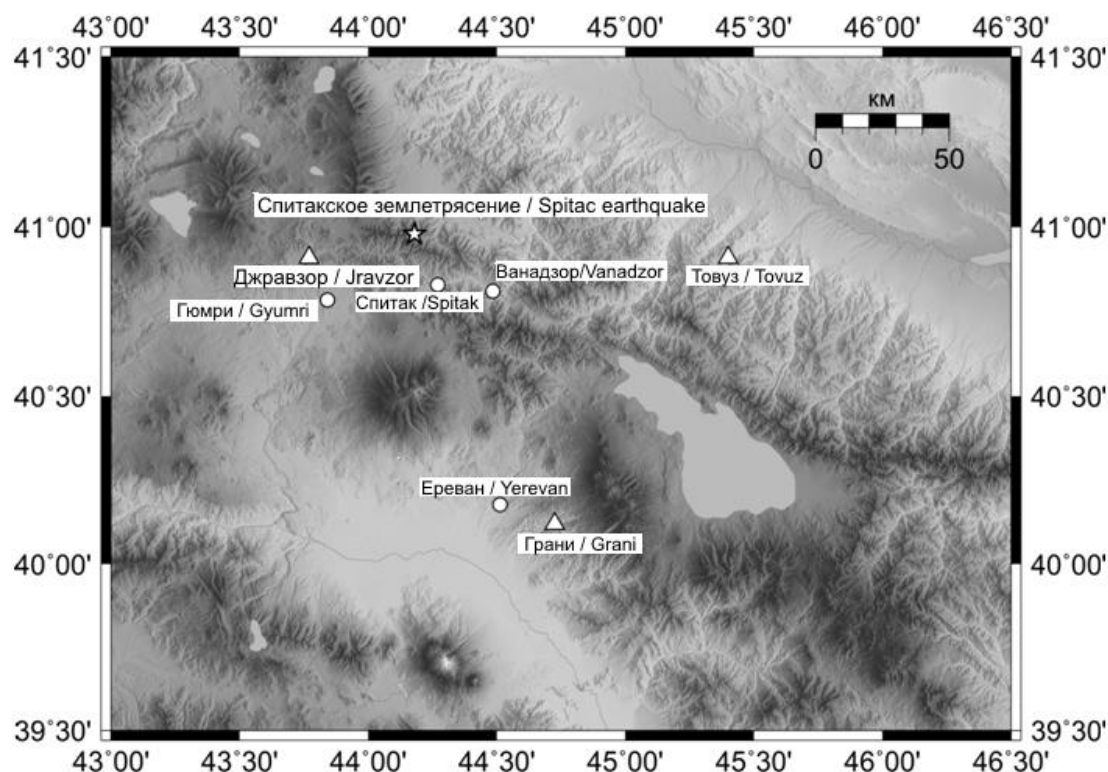


Рис. 1. Расположение магнитовариационных станций на территории Армении.

Δ – Магнитовариационные станции. /

Fig. 1 Location of magnetovariational stations in Armenia. Δ – Magnetovariational stations.

Станция «Товуз» находится на блоке Шамшадинского антиклинория, который относится с сейсмической точки зрения к спокойной зоне, что и позволяет использовать её как базисную станцию.

После Спитакского землетрясения станции работали с существенными перерывами, тем не менее, нами были обработаны все доступные записи за 1986-1993 гг.

Полученные результаты представлены в таблицах и на графиках. Максимальные изменения параметра N (A) достигают 35% (рис. 2, 4). Самые значительные изменения зафиксированы для N_1 (A) z – между парами станций Джравзор – Товуз. Изменения между парами станций Джравзор – Гарни (N_2 (A) z) за данный период составляет не более 0,1, а между парами станций Товуз – Гарни (N_3 (A) z) они были в пределах ошибок. Это позволило считать, что источники аномальных изменений параметра N (A) находится в области расположения станции Джравзор, то есть непосредственно в эпицентральной зоне Парванийского (13.05.1986 г) и Спитакского (07.12.1988 г.) землетрясений. Аналогичные результаты получены для вариаций с периодами 30-60 минут рис. (3). N_1 (A) z – между парами станций Джравзор – Товуз. Изменения между парами станций Джравзор – Гарни (N_2 (A) z) за данный период составляет не более 0,1 (рис. 2) между парами станций Товуз – Гарни (N_3 (A) z). В течение 2-3-х лет после Спитакского землетрясения значение отношений амплитуд (параметра N (A)) достигли почти исходного уровня (рис. 4), т.е. наблюдаемый эффект является в значительной мере обратимым.

Рассчитаны среднемесячные значения синхронной разности $\Delta\delta T$ между станциями Джравзор и Товуз, для вариаций с периодами а) 5-25, б) 30-60 минут за период 1986-1988 гг., что позволило судить о направлении (снизу вверх) (рис. 4) развития

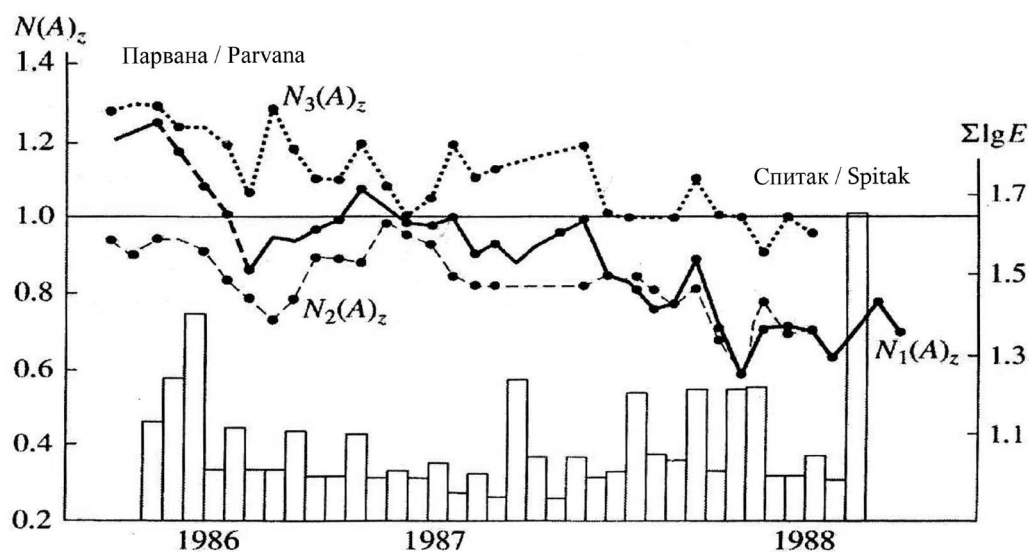


Рис. 2. Изменение параметра $N(A)$ для Sq -вариаций поля δH между станциями $N_1(A)$ z – между Джерадзор – Товуз, $N_2(A)$ z – между Джерадзор – Гарни, $N_3(A)$ z – между Товуз – Гарни. /
 Fig. 2. Change of the parameter $N(A)$ for Sq -variations of the field δH between stations $N_1(A)$ z – between Dzhradzor – Tovuz, $N_2(A)$ z – between Dzhradzor – Garni, $N_3(A)$ z – between Tovuz – Garni.

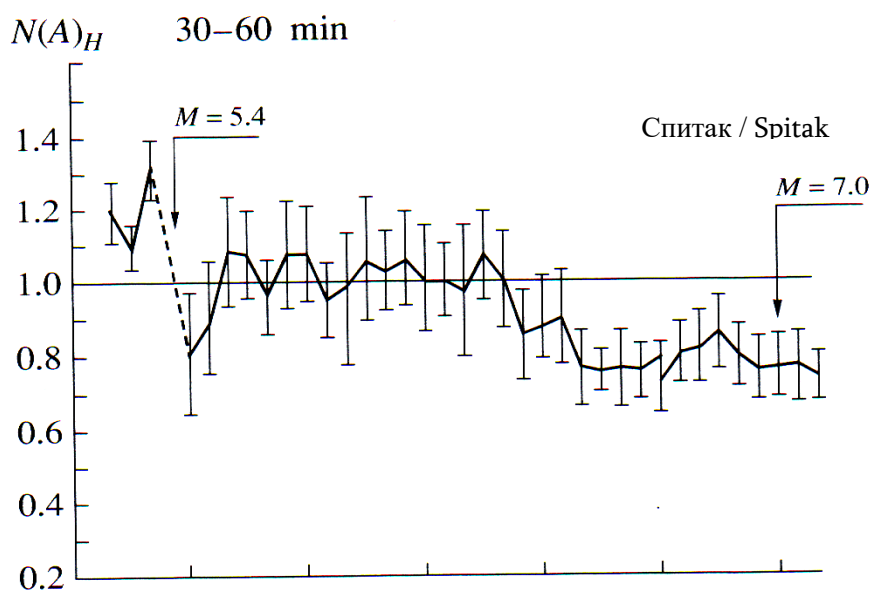


Рис. 3. Изменение параметра $N(A)$ для вариаций 30-60 мин. поля δH между станциями Джерадзор и Товуз. /

Fig. 3 Change in the parameter $N(A)$ for variations of 30-60 min. field δH between the stations Dzhradzor and Tovuz.

процесса в земной коре [Григорян, Сковородкин, 1998], и на фоне региональных изменений выделить локальные изменения в отклике магнитного поля, которые совпадают по времени с местными сильными землетрясениями: Параванское ($M=5,4$) и Спитакское ($M=7,0$) [Габриелян и др., 1981; Mazzella, Morrison, 1974]. По рисунку 3 можно судить об обратимости процесса, который происходил на изучаемой территории до Спитакского землетрясения.

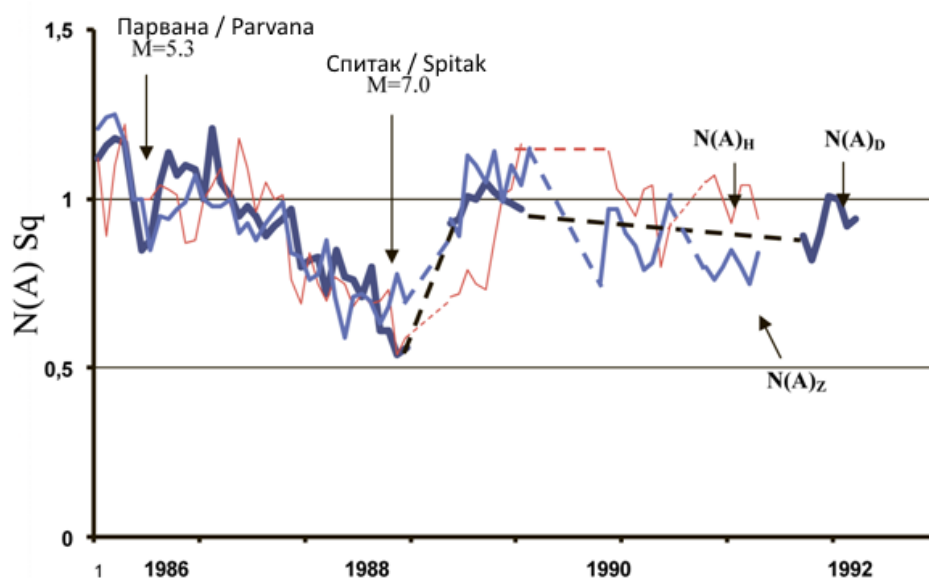


Рис. 4. Изменение среднемесячных значений параметра $N(A)$ для Sq -вариаций компонентов δD , δH и δZ геомагнитного поля между станциями Джэрадзор – Товуз за период 1986-1993 гг. /
 Fig. 4 Change in the monthly average values of the parameter $N(A)$ for the Sq variations of the components δD , δH and δZ of the geomagnetic field between the Dzhradzor – Tovuz stations for the period 1986-1993.

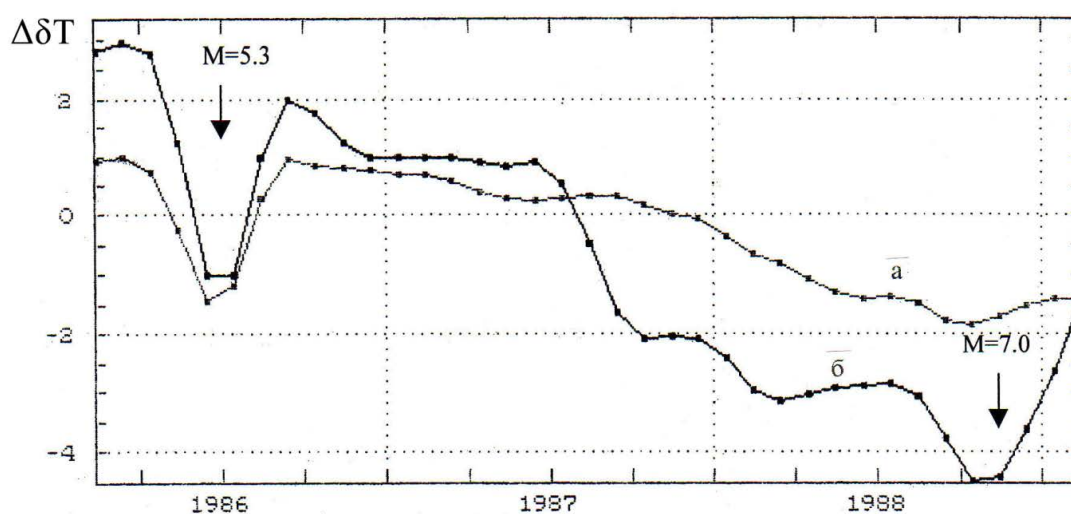


Рис. 5. Сглаженные временные ряды среднемесячных значений синхронной разности $\Delta\delta T$ между станциями Джэрадзор и Товуз, для вариаций периодами а) 5-25, б) 30-60 минут за период 1986-1988 гг. /
 Fig. 5 Smoothed time series of monthly average values of the synchronous difference $\Delta\delta T$ between Dzhradzor and Tovuz stations, for variations a) 5-25, b) 30-60 minutes for the period 1986-1988.

Для обсуждения использованы результаты гравиметрических [Оганесян и др., 1989], геохимических и сейсмических наблюдений [Игумнов, 1998; Игумнов, Степанян, 1989].

Сопоставление полученных сейсмических, магнитометрических, гравиметрических и геохимических данных показало, что наиболее контрастные изменения параметра $N(A)$, силы тяжести и концентраций гелия коррелируются во времени

[Григорян, Сковородкин, 1998; Григорян и др., 1999]. Исходя из результатов исследований, можно предполагать, что локальные изменения изученных параметров обусловлены главным образом геодинамическим процессом, происходящим в земной коре в зонах активных глубинных разломов.

Обсуждение результатов

Возникает естественный вопрос, какие же процессы в земле могли бы вызвать, достаточные по величине изменения локального геомагнитного поля за периоды от месяцев до нескольких лет?

1. Возникновение локальных дополнительных электрических полей, которые могут быть вызваны изменением гидрорежима и, как следствие, возникновением электрокинетических эффектов. Однако, как следует из результатов полевых наблюдений [Сковородкин, 1985; Сковородкин, Безуглая, 1980, 1981; Сковородкин и др., 1985], натурного моделирования и теоретических построений, даже в предельном случае, вклад возникающих токов течения на глубинах от метров до километров, в амплитуды использованных нами вариаций, не будет зарегистрирован [Авагимова и др., 1986].

2. Изменение магнитной проницаемости за счет изменения напряженного состояния горных масс (пьезомагнитный эффект). Здесь также в предельном случае не будут наблюдаться значимые изменения в амплитудах вариаций [Сковородкин, Безуглая, 1981].

3. Изменение электрической проводимости мог бы вызвать, достаточные по величине изменения локального геомагнитного поля [Григорян и др., 1999].

Предполагается, что причинами изменений в электропроводности геологической среды являются дегазация Земли и вертикальная фильтрация флюидов в верхние слои земной коры [Гуфельд, 2012; Киссин, 2011; Игумнов, Степанян, 1989]. Участие флюидов в сейсмических процессах в настоящее время получает определенное признание, как одного из главных факторов развития сейсмических процессов. Сейсмические деформации вызывают интенсивные изменения фильтрационного поля и, соответственно, путей миграции флюидов, влияют на РТ-условия (давление и температура) флюидных систем, усиливают взаимодействие флюидов с вмещающими породами.

Основным источником флюидов в консолидированной коре является восходящая миграция флюидов из глубоких частей коры и из верхней мантии, причем масштабы мантийной миграции неоднозначно оцениваются разными исследователями [Киссин, 2013].

Из мантии в кору могут также поступать восстановленные газы, которые при окислении пополняют флюидные системы. На окраинах континентов, в зонах субдукции, существует еще один источник флюидов – погружающиеся слои, которые уплотняются по мере опускания на глубину и выделяют избыточные флюиды. Потоки таких флюидов устремляются вверх, в сторону меньшего давления. Они являются главным фактором поступления флюидов в сейсмоактивные зоны субдукции и определяют широкое распространение сильных землетрясений в этих зонах [Киссин, 2013, 2015].

Прохождение разломов вблизи очага, определяет поступление в его зону высоконапорного флюида. Связь этих сетей с очагом усиливается при образовании магистрального разрыва и сопутствующего развития трещин.

Приток флюидов извне в зону очага относится к основным источникам повышения флюидного давления в этой зоне. Соответственно возрастает роль такого притока как триггерного фактора сейсмических деформаций. Возможность притока и влияния флюидов на напряжения в зоне очага подтверждается фактами увеличения фильтрационной сети при подготовке землетрясений [Киссин, 2013; Назаретян и др., 2015].

Состав и свойства флюидов в глубоких сейсмогенных зонах еще во многом неясны. Петрологи свидетельствуют о наличии мантийных флюидов и проводят исследования взаимодействия в системе порода – флюид. Под термином «флюид» понимают надкритическую, главным образом гидротермальную фазу, содержащую CO_2 , Cl , F , SO и ряд других компонентов [Grigorian et al., 1999].

В работе рассматривается реакция дегидратации, приводящая к увеличению общего объема продуктов. Этот процесс сопровождается увеличением порового пространства и объема флюидов. Повышение порового давления приводит к гидроразрывам и впрыскиванию флюида в разломную зону. Полагали, что такой процесс является спусковым для проявления КР.

Выводы

1. Полученные результаты показывают, что используя расчетный параметр N (A), можно выявить аномальные изменения электромагнитной индукции геологической среды, которые связаны с развитием геодинамических процессов в земной коре.
2. Изучение локальных изменений параметра N (A), позволяет оценить изменение электромагнитной индукции в наиболее сейсмоактивных районах Армении и выявить предвестники двух крупных землетрясений: Парванийское ($M=5,4$, 1986 г.) и Спитакское ($M=7,1$, 1988 г.) [Григорян, Сковородкин, 1998]
3. Предложить параметр N (A) для выявления предвестников сильных землетрясений.
4. Показано, что параметр N (A) можно использовать для определения района будущего сильного землетрясения.

Литература

1. Авагимов А. А., Атаев А. К., Жуков В. С., Лагутинская Л. П., Сантурян В. А. Локальные вариации геомагнитного поля токовой природы. // В кн.: Прогноз землетрясений, №7. Предвестники землетрясений магнитной, электрической и электромагнитной природы. – Душанбе – Москва: Дониш, 1986. – С. 181-185.
2. Безуглая Л. С., Прохоров А. А., Сковородкин Ю. П., Тоноян Е. П. Использование S_q -вариаций для изучения сейсмотектонического процесса. // Докл. АН Арм. ССР. – 1986. – Т. LXXXII. №1. – С. 33-37.
3. Ваньян Л. Л., Хайдман Р. Д. О природе электропроводности. // Физика Земли. – 1996. – №4. – С. 5-11.
4. Габриелян А. А., Саркисян О. А., Симонян Г. П. Сейсмотектоника Армянской ССР. – Ереван: Ереванский университет, 1981. – 284 с.
5. Григорян А. Г. Изменения локального геомагнитного поля внешнего происхождения на примере Армении. // Физика Земли. – 2007. – №6. – С. 88-95.
6. Григорян А. Г., Сковородкин Ю. П. Магнитовариационный мониторинг на территории Армении за 1986-1988 гг. // Научно-практическая конференция. Опыт Комплексного Изучения Геофизических полей для целей сейсмопрогноза 13-15 мая 1998 г. Геоинформ-марк. – Москва. – 1998. – С. 39-40.

7. Григорян А. Г., Сковородкин Ю. П., Ахвердян Л. А. Изучение геомагнитных предвестников сильных землетрясений. // Изв. Науки о Земле НАН РА. 27-28 октября 1998 г. Спец. выпуск. – Ереван. – 1999. – №4. – С. 35-37.
8. Григорян А. Г., Сковородкин Ю. П. Пространственно-временные изменения переменного магнитного поля приизучения геодинамических процессов в земной коре на территории Армении. // Труды науч. конф. посвящ. памяти Бабаджаняна А. Г. – Гюмри. – 1999.
9. Гуфельд И. Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней Мантии, вызванные водородной дегазацией. // Геодинамика и тектонофизика. – 2012. – Т. 3. №4. – С. 417-435.
10. Игумнов В. А. Сейсмогеохимические исследования в Армении. // Изд. НАН РА, Сборник научных трудов конференции, посвященной 90-летию со дня рождения основателя ИГИС НАН РА, академика А. Г. Назарова 1-4 июня 1998 г. – Гюмри. – 1998. – С. 262-266.
11. Игумнов В. А., Степанян З. Г. Некоторые гидрогеохимические аспекты Спитакского землетрясения. // Изв. АН Арм. ССР, Науки о Земле. – 1989. – Т. XL. №3. – С. 24-33.
12. Киссин И. Г. О влиянии флюидных систем консолидированной коры на дегазацию Земли и образовании нефти. // Доклады РАН. – 2011. – Т. 440. №1. – С. 72-76.
13. Киссин И. Г. О взаимосвязи сейсмичности и фильтрационного поля земной коры. // Доклады РАН. – 2013. – Т. 448. №5. – С. 583-587.
14. Киссин И. Г. Флюиды в земной коре. – М.: Наука, 2015. – 330 с.
15. Кузнецова В. Г., Мельничук М. Н. Магнитометрические наблюдения на Карпатском геодинамическом полигоне. // Материалы IX конференции по постоянному геомагнитному полю и палеомагнетизма. Ч. I. – Баку. – 1973. – С. 84-85.
16. Кузнецова Г. В., Максимчук М. Н. Возможность выделения аномалий электропроводности по повторным высокоточным наблюдениям геомагнитного поля. // Геофиз. сб. АН УССР. Вып. 98. – 1979. – С. 53-58.
17. Назаретян С. Н., Дургарян Р. Р., Мирзоян Л. Б., Григорян А. Г., Шахбекян Т. А. Региональные разломы территории Армении по геофизическим данным и их сейсмичность. – Ереван: Издательство «Гитутюн» НАН РА, 2015. – 183 с.
18. Оганесян А. О., Оганесян С. М., Бабаджанян А. Г. О результатах проведенных исследований по неприливым изменениям силы тяжести на Ширакском геодинамическом полигоне. Международный симпозиум, Ереван, 2-6.10.1989 Тезисы докладов. – М. – 1989. – С. 135-136.
19. Сковородкин Ю. П. Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. – М.: ИФЗ АН СССР, 1985. – 197 с.
20. Сковородкин Ю. П., Безуглая Л. С. Связь геомагнитных вариаций с гидрорежимом на Гармском полигоне. // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1980. – №4. – С. 104-109.
21. Сковородкин Ю. П., Безуглая Л. С. Пьезомагнитные свойства горных пород (сводные данные). // В. кн.: Тез. докл. II Всесоюзного съезда по геомагнетизму. Ч. I. – Тбилиси: ТГУ, 1981. – С. 121.
22. Сковородкин Ю. П., Тоноян Е. П. Временные изменения электромагнитной индукции на прогностических полигонах. // В кн.: Сейсмический мониторинг земной коры. – М.: ИФЗ АН СССР, 1986. – С. 199-203.
23. Сковородкин Ю. П., Гусева Т. В., Безуглая Л. С., Тоноян Е. П. Исследование геомагнитных вариаций с целью изучения геодинамики и глубинного геологического строения в сейсмоопасных зонах Таджикской ССР. // Фонды ЮГФЭ УГ Тадж. ССР. – М. 1985. – 60 с.
24. Grigorian A. G., Skovopodkin Yu. P., Nazaretian S. N. Local geomagnetic fields changes and seismicity of Armenian for 1981-1993. Proceedings Third International Conference on seismology and earthquake engineering see-3 May 17-19, 1999. – Tehran: IIEES, 1999. – P. 229.
25. Kissin I. G., Ruzajkin A. I. The relation between seismically active and electrically conductive zones. // Annali di geofisica. – 1997. – Vol. XL. №2. – Pp. 261-268.
26. Mazzella A., Morrison H. F. Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San-Andreas fault. // Science. – 1974. – V. 185. – Pp. 855-857.

27. Parkinson W.D. Directions of rapid geomagnetic fluctuations. // *Geophys. J.* – 1959. – No. 2. – Pp. 1-14.
28. Yamazaki Y., Rikitake T. Local anomalous changes in the geomagnetic field at Matsushiro. // *Bull. Earthq. Res. Inst.* – 1970. – V. 48. Part 4. – Pp. 637-643.

References

1. Avagimov A.A., Ataev A.K., Jukov V.S., Lagutinskaya L.P., Santuryan V.A. Local variations of the geomagnetic field of a current nature. In *Earthquake forecast. No. 7. Earthquake precursors magnetic, electrical and electromagnetic nature. Dushanbe– Moscow. Donish. 1986. Pp. 181-185.*
2. Bezuglaya L.S., Prohorov A.A., Skovorodkin YU.P., Tonoyan E.P. The use of Sq-variations to study the seismotectonic process. *Reports Dokl. AN Arm. SSR. 1986. T. LXXXII. No. 1. pp. 33-37. (In Russ.)*
3. Vanyan L.L., Haydman R.D. The nature of electrical conductivity. *Earth Physics. 1996. No. 4. pp. 5-11. (In Russ.)*
4. Gabrielyan A.A., Sarkisyan O.A., Simonyan G.P. *Seismotectonics of the Armenian SSR. Yerevan. Yerevan University. 1981. 284 p. (In Russ.)*
5. Grigoryan A. G. Changes in the local geomagnetic field of external origin on the example of Armenia. *Earth Physics. 2007. No. 6. pp. 88-95. (In Russ.)*
6. Grigoryan A.G., Skovorodkin YU.P. Magnetovariational monitoring in the territory of Armenia for 1986-1988. Scientific and practical conference. Experience in the Comprehensive Study of Geophysical Fields for the Purpose of Seismic Forecast May 13-15, 1998. *Geoinform-mark. Moscow. 1998. pp. 39-40. (In Russ.)*
7. Grigoryan A.G., Skovorodkin YU. P., Ahverdyan L.A. The study of geomagnetic harbingers of strong earthquakes. *News of Earth Science NAS RA. October 27-28, 1998 Special. release. Erevan. 1999. No. 4. pp. 35-37. (In Russ.)*
8. Grigoryan A.G., Skovorodkin YU.P. Spatio-temporal changes in the alternating magnetic field of the study of geodynamic processes in the earth's crust on the territory of Armenia. *Proceedings of the scientific conference. initiation in memory of A. Babadzhanyan Gyumri. 1999. (In Russ.)*
9. Gufeld I.L., Geological consequences of amorphization of the lithosphere and upper Mantle structure caused by hydrogen degassing. *Geodynamics and tectonophysics. 2012. T. 3. No. 4. pp. 417-435. (In Russ.)*
10. Igumnov V.A. *Seismogeochemical studies in Armenia. Edition of the NAS RA, Collection of scientific papers of the conference dedicated to the 90th birthday of the founder of ISIS NAS RA, academician A. G. Nazarova June 1-4, 1998. Gyumri. 1998. pp. 262-266. (In Russ.)*
11. Igumnov V.A., Stepanyan Z.G. Some hydrogeochemical aspects of the Spitak earthquake. *News of Earth Science NAS RA. 1989. T. XL. No. 3. pp. 24-33. (In Russ.)*
12. Kissin I. G. On the effect of fluid systems of the consolidated crust on the degassing of the Earth and the formation of oil. *RAS reports. – 2011. T. 440. No. 1. pp. 72-76. (In Russ.)*
13. Kissin I. G. On the relationship of seismicity and the filtration field of the earth's crust. *RAS reports. 2013. T. 448. No. 5. pp. 583-587. (In Russ.)*
14. Kissin I. G. *Fluids in the earth's crust. Moscow. Nauka, 2015. 330 pp. (In Russ.)*
15. Kuznetsova V.G., Melnichuk M.N. Magnetometric observations at the Carpathian geodynamic test site. *Materials of the IX conference on the constant geomagnetic field and paleomagnetism. Part I. Baku. 1973. pp. 84-85. (In Russ.)*
16. Kuznetsova G.V., Maksimchuk M.N. The possibility of detecting electrical conductivity anomalies from repeated high-precision observations of the geomagnetic field. *Geophysics. collection of Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Vol. 98. 1979. pp. 53-58. (In Russ.)*
17. Nazaretyan S.N., Durgaryan R.R., Mirzoyan L.B., Grigoryan A.G., Hahbekyan T.A. *Regional faults of the territory of Armenia according to geophysical data and their seismicity. Yerevan. «Gitutyun». 2015. 183 p. (In Russ.)*

18. Oganessian A. O., Oganessian S. M., Babadjanyan A. G. On the results of studies on non-tidal changes in gravity at the Shirak geodynamic test site. International Symposium, Yerevan, 2-6.10.1989 Abstracts. Moscow. 1989. pp. 135-136. (In Russ.)
19. Skovorodkin Yu. P. The study of tectonic processes by magnetometry. Moscow. IPZ RAS USSR. 1985. 197 p. (In Russ.)
20. Skovorodkin Yu. P., Bezuglaya L. S. The relationship of geomagnetic variations with the hydraulic mode at the Garm landfill. *Izvestiya AN SSSR, Physics of the Earth*. 1980. No. 4. pp. 104-109. (In Russ.)
21. Skovorodkin Yu. P. Bezuglaya L. S. Piezomagnetic properties of rocks (summary data). In book Abstracts of the II All-Union Congress on Geomagnetism. Part I. Tbilisi. TGU. 1981. 121 pp. (In Russ.)
22. Skovorodkin YU.P., Tonoyan E. P. Temporary changes in electromagnetic induction at prognostic test sites. In book Seismic monitoring of the earth's crust. Moscow. IPZ RAS USSR. 1986. pp. 199-203. (In Russ.)
23. Skovorodkin Yu. P., Guseva T. V., Bezuglaya L. S., Tonoyan E. P. The study of geomagnetic variations in order to study the geodynamics and deep geological structure in seismic zones of the Tajik SSR. Funds of the Southern State Pharmaceutical University of the Tajik SSR Moscow. 1985. 60 p. (In Russ.)
24. Grigorian A. G., Skovopodkin Yu. P., Nazaretian S. N. Local geomagnetic fields changes and seismicity of Armenian for 1981-1993. Proceedings Third International Conference on seismology and earthquake engineering see-3 May 17-19, 1999. Tehran. IIEES. 1999. P. 229.
25. Kissin I. G., Ruzajkin A. I. The relation between seismically active and electrically conductive zones. *Annali di geofisica*. 1997. Vol. XL. No. 2. Pp. 261-268.
26. Mazzella A., Morrison H. F. Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San-Andreas fault. *Science*. 1974. V. 185. Pp. 855-857.
27. Parkinson W. D. Directions of rapid geomagnetic fluctuations. *Geophys. J*. 1959. No. 2. Pp. 1-14.
28. Yamazaki Y., Rikitake T. Local anomalous changes in the geomagnetic field at Matsushiro. *Bull. Earthq. Res. Inst.* 1970. V. 48. Part 4. Pp. 637-643.

УДК 550.831.017

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59065](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59065)

Оригинальная статья

Методы гравитационной томографии на основе F-аппроксимации

И. А. Керимов

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Б. Грузинская, 10,
г. Москва 123242, Российская Федерация, e-mail: kerimov@ifz.ru

Статья поступила: 12.02.2020, после рецензирования: 06.03.2020, принята к публикации: 20.03.2020

Резюме: Актуальность работы. В настоящее время одним из актуальных направлений теории и практики интерпретации потенциальных полей является разработка методов, направленных на изучение пространственного распределения плотностей по результатам обработки и интерпретации данных гравиразведки в заданном объеме геологической среды при минимуме априорной информации об источниках поля в заданном объеме при минимуме априорной информации об источниках поля. **Цель работы** – разработка методов гравитационной томографии на основе аппроксимационного подхода к спектральному анализу в гравиметрии, получившего название метода F-аппроксимации. **Методы исследования.** Разработка алгоритмов и компьютерных технологий спектрального анализа на основе аппроксимационного подхода в рамках метода линейных интегральных представлений В.Н. Страхова, способов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности с использованием теории решения некорректных задач. **Результаты работы.** Рассмотрены вопросы разработки методов гравитационной томографии на основе F-аппроксимации аномального поля силы тяжести, который характеризуется полной адекватностью реальной геофизической практике и позволяющий избавиться от различных идеализаций (идеализация плоского поля; идеализация границы раздела земля-воздух как бесконечной горизонтальной плоскости; идеализация непрерывного задания того или иного элемента поля на бесконечной горизонтальной плоскости или куске этой плоскости; идеализация задания того или иного элемента поля в узлах правильной геометрической сети и др.). Предложены три модификации гравитационной томографии на основе F-аппроксимации. Первая модификация основана на изучении пространственного распределения элементов гравитационного поля. В рамках данной модификации на основе F-аппроксимации выполняется изучение распределения различных производных аномального гравитационного поля в нижнем и верхнем полупространствах. Вторая модификация заключается в разделении аномального гравитационного поля на составляющие, обусловленные источниками, залегающими в пределах существенно различающихся по глубине m структурных этажей. В статье рассмотрен вариант разделения аномального поля для случая двух структурных этажей. Для данного варианта разработаны алгоритм и компьютерные технологии, метод апробирован на модельных и реальных геолого-гравиметрических материалах. Третья модификация заключается в нахождении пространственного распределения функции Страхова, являющейся обобщением функции Березкина. Разработан алгоритм и компьютерные технологии расчетов пространственного распределения данного показателя и получения пространственного куба данных.

Ключевые слова: гравитационная томография; F-аппроксимация; источники поля; разделение полей; геологическая среда.

Для цитирования: Керимов И. А. Методы гравитационной томографии на основе F-аппроксимации. *Геология и геофизика Юга России*, 2020. 10 (1): 55–67. № DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59065](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59065)

GEOPHYSICS

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59065](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59065)

Original paper

Methods of gravitational tomography based on F-approximation

I. A. Kerimov

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

Received: 12.02.2020, revised: 06.03.2020, accepted: 20.03.2020

Abstract: Relevance. Currently, one of the significant directions of the theory and practice for interpreting potential fields is the development of methods aimed at studying the spatial distribution of densities from the results of processing and interpretation of gravitation prospecting data in a given volume of a geological environment with a minimum of a priori information about field sources of a given volume with a minimum a priori information about the sources of the field. **The aim of the work** is to develop methods of gravitational tomography based on the approximation approach to spectral analysis in gravimetry, which is called the F-approximation method. **Methods.** Development of spectral analysis algorithms and computer technologies, based on the approximation approach in the framework of the method of linear integral representations that was offered by B. N. Strakhov. Methods for solving systems of linear algebraic equations (SLAE) of large dimension using the solution theory of ill-posed problems. **Results.** Issues of the development of gravity tomography methods based on the F-approximation of the anomalous gravity field, which is characterized by complete adequacy of real geophysical practice and allowing to get rid of various idealizations (idealization of a flat field; idealization of the earth-air interface as an infinite horizontal plane; idealization of a continuous setting of a particular field element on an infinite horizontal plane or a piece of this plane; idealization of the setting another field element at the nodes of a regular geometric network, etc.) Three modifications of gravitational tomography based on the F-approximation are proposed. The first modification is based on the study of the spatial distribution of the elements of the gravitational field. In the framework of this modification, based on the F-approximation, we study the distribution of various derivatives of the anomalous gravitational field in the lower and upper half-spaces. The second modification consists in dividing the anomalous gravitational field into components due to sources lying within structural floors that differ significantly in m depth. The article considers the option of separating the anomalous field for the case of two structural floors. For this option, an algorithm and computer technologies have been developed, the method has been tested on model and real geological and gravimetric materials. The third modification is to find the spatial distribution of the Strakhov function, which is a generalization of the Berezkin function. An algorithm and computer technology for calculating the spatial distribution of this indicator and obtaining a spatial cube of data have been developed.

Keywords: gravitational tomography; F-approximation; field sources; field separation; geological environment.

For citation: Kerimov I. A. Methods of gravitational tomography based on F-approximation. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2020.10 (10): 55-67. DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59065](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59065)

В последние годы активно развивается новое направление в теории и практике интерпретации потенциальных полей, связанное с попытками изучения в некоторых частных случаях вертикального распределения плотности по данным гравиразведки [Бабаянц и др., 2004, 2006а, 2006б; Блох, 2004; Булах, Левашов, 1987; Бычков, 2005; Ващилов, 1995; Вдовина, 2010; Долгаль и др., 2006; Мартышко и др., 2002; Новоселицкий, 1965; Новоселицкий, Простолупов, 1999; Новоселицкий и

др., 2001, 2008; Петрищевский, 2009; Страхов, Керимов, 2001; Страхов и др., 2009; Тараканов, 1997; Shirzaii, Ardalani, 2005; Basuyau, Tiberi, 2011; Berkel, Michel, 2010; Hsieh, Yen, 2016; Jacob et al., 2018; Liu et al., 2014; Sampietro, Carponi, 2019; Singh, 2020]. Это направление получило название «гравитационной томографии». Методы гравитационной томографии подразделяются на два типа: фильтрационный и аппроксимационный. В первом случае тем или иным способом выделяются «разноглубинные» составляющие из аномального гравитационного поля, во втором – строятся пространственные распределения плотностей $\sigma = \sigma(x, y, z)$, в определенном приближении отражающие основные элементы структурно-тектонического строения геологической среды [Долгаль, Шахримуллин, 2009].

Томография (от греческих слов *tomos* – часть, слой и *grapho* – пишу, черчу, рисую) представляет собой способ исследования геологических структур, позволяющий получать их послойное отображение. В разведочной геофизике широко используется метод сейсмической томографии, позволяющий получать дополнительную геологическую информацию. Обзор существующих методов гравитационной томографии приведен в статье А. С. Долгала и А. Ф. Шархимуллина [Долгаль, Шахримуллин, 2009].

Одним из первых использованием методов гравитационной томографии было в работе Ю. Я. Ващилова [Ващилов, 1995], который представил результаты послойного изучения плотностной структуры земной коры и верхней мантии на глубинах 20, 30, 40 и 60 км. По мнению Ю. Я. Ващилова, «массовая интерпретация аномалий силы тяжести в классе трехмерных блоковых моделей источников возмущения позволяет получить величины относительных изменений плотности в горизонтальном направлении» [Ващилов, 1995]. Однако сама идея послойного изучения пространственного распределения геоплотностных неоднородностей при интерпретации гравитационного поля была выдвинута значительно раньше в работе В. М. Новоселицкого об определении плотности горизонтального слоя, в которой задача сводится к интегральному уравнению Фредгольма первого рода [Новоселицкий, 1965]. Впоследствии Е. Г. Булахом для этого предложено использование аппроксимационного подхода [Блох, 2004]. В гравиразведке с середины прошлого века широко известны глубинные характеристики трансформаций по И. Г. Клушину, рассчитанные для точечной массы и предназначенные для приближенной оценки интервалов глубин размещения источников. В 80-х гг. XX века Е. Г. Булах с соавторами разработан метод последовательного накопления и разрастания масс, позволяющий осуществлять построение геоплотностных разрезов и срезов изучаемого объема среды при минимуме априорной информации о возмущающих объектах, являющийся по сути «томографическим» методом [Булах, Левашов, 1987].

К методам фильтрационной томографии относится метод векторного сканирования, разработанный под руководством В. М. Новоселицкого и реализованный в компьютерной технологии VECTOR. Система VECTOR базируется на устойчивом вычислении векторов горизонтальных градиентов, их обработке, трансформациях и последующем интегрировании трансформант. Эффективность технологии VECTOR подтверждена многочисленными результатами ее практического использования при решении широкого круга геологических задач, в том числе при поисках и разведке месторождений углеводородов [Долгаль и др., 2009; Новоселицкий, Простолупов, 1999; Новоселицкий и др., 2001; Новоселицкий и др., 2008]. Примером аппроксимационной томографии является технология разделения источников

гравитационного поля по глубине, разработанная под руководством П. С. Мартышко [Мартышко и др., 2002]. В последние годы появляется все больше примеров успешного решения разнообразных геологических задач на основе гравитационной томографии. Особо стоит упомянуть о результатах, полученных ГНПП «Аэрогеофизика» при использовании пакета программ СИГМА-3D. В частности, говорится о том, что «применение интерпретационной томографии показало ее достаточно высокую эффективность в самых разнообразных геологических условиях: Московская синеклиза, Прикаспий, Полярный Урал, Западная Сибирь и т.д.» [Бабаянц, 2006а; Бабаянц и др., 2004].

Различные вопросы теории и практики гравитационной томографии опубликованы в работах П. С. Бабаянца, Ю. И. Блоха, Е. П. Вдовиной, А. С. Долгала, Ю. А. Тараканова и др. [Бабаянц и др., 2004, 2006а, 2006б; Блох, 2004; Булах, Левашов, 1987; Бычков, 2005; Ващилов, 1995; Вдовина, 2010; Долгаль и др., 2006; 1-10, 16-25 Мартышко и др., 2002; Новоселицкий, 1965; Новоселицкий, Простолупов, 1999; Новоселицкий и др., 2001, 2008; Петрищевский, 2009; Страхов, Керимов, 2001; Страхов и др., 2009; Тараканов, 1997; Shirzaii, Ardalan, 2005]].

Как было упомянуто выше в гравитационной томографии выделяются два подхода – фильтрационный и аппроксимационный. Гравитационная томография на основе аппроксимационного подхода имеет следующие преимущества:

- использование минимума априорной информации об источниках гравитационного поля;
- отсутствие трудоемких процедур построения начального приближения, использующихся в классических методах интерпретации;
- разделение интерпретируемого гравитационного поля на составляющие, обусловленные влиянием разноглубинных геологических слоев;
- использование вычислительных алгоритмов, допускающих обработку больших объемов исходной информации;
- возможность построения различных вариантов пространственных распределений геоплотностных неоднородностей в исследуемом объеме среды;
- возможность визуализации результативных интерпретационных построений в виде информационного куба.

Ниже рассматривается метод гравитационной томографии на основе аппроксимационного подхода к спектральному анализу в гравиметрии (метод F-аппроксимации). Метод F-аппроксимации разработан в рамках метода линейных интегральных представлений В. Н. Страхова, полностью адекватен реальной геофизической практике и позволяет избавиться от различных идеализаций (идеализация плоского поля; идеализация границы раздела земля-воздух как бесконечной горизонтальной плоскости; идеализация непрерывного задания того или иного элемента поля на бесконечной горизонтальной плоскости или куске этой плоскости; идеализация задания того или иного элемента поля в узлах правильной геометрической сети и др.). Данный метод апробирован на большом количестве модельных и реальных геолого-гравиметрических материалах и показал эффективность при решении различных интерпретационных задач [Керимов, 2003, 2009а, 2009б; Страхов В. Н., Керимов, 2001; Страхов и др., 2009]:

- F-аппроксимация является информационным базисом гравиметрии и магнитометрии. Восстановление значений потенциальных полей в узлах регулярной сети с учетом разновысотности исходных и результативных точек (3D интерполяция).

• Исключение искажающего влияния аномального вертикального градиента при пересчете наблюдаемого поля на горизонтальную плоскость или любую заданную поверхность.

• Фильтрация помех, нарушающих гармонический характер наблюдаемого потенциального поля.

Как известно задача построения F – аппроксимационной конструкции аномального гравитационного поля вариационной постановкой сводится к решению СЛАУ:

$$Az\lambda = f_{\delta}, \quad (1)$$

в которой:

λ – N -вектор с компонентами λ_i (множители Лагранжа),

f_{δ} – N -вектор с компонентами $f_{i,\delta}$,

A – $(N \times N)$ – матрица со свойством

$$A = A^T \geq 0 \quad (2)$$

и элементами a_{pq} , $1 \leq p, q \leq N$.

Формула для вычисления элементов матрицы A выглядит в следующем виде:

$$a_{p,q} = \frac{3(2z_{p,q}^3 - 3\rho_{p,q}^2 z_{p,q})}{2\pi(z_{p,q}^2 + \rho_{p,q}^2)^{3.5}}, \quad (3)$$

где

$$z_{p,q} = x_3^{(p)} + x_3^{(q)} + 2H,$$

$$\rho_{p,q} = \sqrt{(x_1^{(p)} - x_1^{(q)})^2 + (x_2^{(p)} - x_2^{(q)})^2}.$$

На основе решения СЛАУ находятся множители Лагранжа (компонента λ_i), используя которые можно восстановить поле, как в исходных пунктах, так и в любых заданных точках. Это позволяет редуцировать поле, заданное на нерегулярной и разновысотной сети на горизонтальную плоскость, а также выполнить пересчет элементов гравитационного поля в верхнее и нижнее полупространство.

1. Изучение пространственного распределения элементов гравитационного поля

Выражение для первой, второй и третьей вертикальной производной гравитационного потенциала имеют следующий вид:

$$V_z(\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, \xi_{3,l}) = \frac{3}{2\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{(2z_{k,l}^2 - 3\rho_{k,l}^2) \cdot z}{(z_{k,l}^2 + \rho_{k,l}^2)^{\frac{7}{2}}} \quad (4)$$

$$V_{zz}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \frac{15}{\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{8z_{k,l}^4 - 24\rho_{k,l}^2 z_{k,l}^2 + 3\rho_{k,l}^4}{(z_{k,l}^2 + \rho_{k,l}^2)^{4.5}} \quad (5)$$

$$V_{zzz}(\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, h) = \frac{75}{\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{z_{k,l}(8(z_{k,l} + h)^4 - 40\rho_{k,l}^2(z_{k,l} + h)^2 + 15\rho_{k,l}^4)}{((z_{k,l} + h)^2 + \rho_{k,l}^2)^{5.5}}. \quad (6)$$

Приведенные выше формулы (4-6) могут быть использованы для пересчета поля силы тяжести и его производных на заданный уровень h как на нерегулярной, так и на регулярной сети. Метод нахождения трансформант аномального гравитацион-

ного поля на основе F -аппроксимации апробирован на широком классе модельных и фактических гравиметрических данных, показал высокую эффективность и точность решения такого класса задач [Керимов, 2003, 2009а, 2009б; Страхов В. Н., Керимов, 2001; Страхов и др., 2009]. Для изучения пространственного распределения элементов гравитационного поля в двухмерном варианте строятся серии графиков W_z , W_{zz} и W_{zzz} для различных высот h_i , а также разностные графики:

$$\Delta W_z = W_z(h_i) - W_z(h_{i-1}) \quad (7)$$

$$\Delta W_{zz} = W_{zz}(h_i) - W_{zz}(h_{i-1}) \quad (8)$$

$$\Delta W_{zzz} = W_{zzz}(h_i) - W_{zzz}(h_{i-1}) \quad (9)$$

В 3D варианте соответственно строятся кубы указанных выше элементов гравитационного поля. Полученные данные используются как для качественной и количественной геологической интерпретации. Данный метод имеет ограничение в части пересчета элементов гравитационного поля в нижнее полупространство.

2. Разделение гравитационных аномалий на основе F -аппроксимации

Метод F -аппроксимаций элементов внешнего аномального гравитационного поля может быть применен для решения проблемы разделения полей, а именно – полей источников, залегающих в пределах существенно различающихся по глубине m структурных этажей. Рассмотрим вопрос разделения гравитационных аномалий на основе F -аппроксимации для случая $m=2$, т.е. когда предполагается, что априорно известна «двухэтажность» в расположении источников аномальных полей, т.е. существование двух таких плоскостей $\xi_3 = \text{const}$:

$$\xi_3 = -H_1, \quad \xi_3 = -H_2, \quad H_1 < H_2, \quad (10)$$

что носитель источников аномального поля T может быть представлен в следующем виде:

$$T = T_1 \cup T_2, \quad (11)$$

где

$$T_1 \subset D, \quad D \subset \Pi_1 = \{\xi; -H_2 < \xi_3 < -H_1\}, \quad T_2 \subset \Pi_2 = \{\xi; \xi_3 < -H_2\}. \quad (12)$$

Иначе говоря, определенная часть источников аномального поля принадлежит горизонтальному слою, ограниченному плоскостями $\xi_3 = -H_1$ (сверху) и $\xi_3 = -H_2$ (снизу), а остальные источники располагаются в полупространстве, ограниченном сверху поверхностью $\xi_3 = -H_2$. В этой ситуации разделение полей источников в T_1 и T_2 выполняется с использованием суммы интегральных представлений:

$$V(x) = V^{(1)}(x) + V^{(2)}(x) \quad (13)$$

при этом для каждой $V^{(1)}(x)$ и $V^{(2)}(x)$ выписывается свое представление соответствующим интегралом Фурье. N -векторы с компонентами $\lambda_i^{(1)}$ и $\lambda_i^{(2)}$, $1 \leq i \leq N$, находятся из решения соответствующих 2-х СЛАУ:

$$A_1 \lambda^{(1)} = f_\delta, \quad A_2 \lambda^{(2)} = f_\delta, \quad (14)$$

где матрицы $A_1 = A_1^T \geq 0$ и $A_2 = A_2^T \geq 0$ имеют элементы, описываемые форму-

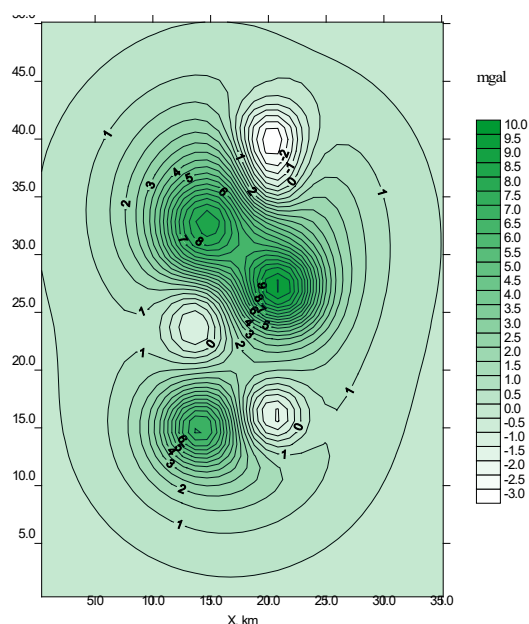


Рис.1. Модельное гравитационное поле
Fig. 1 Model gravitational field

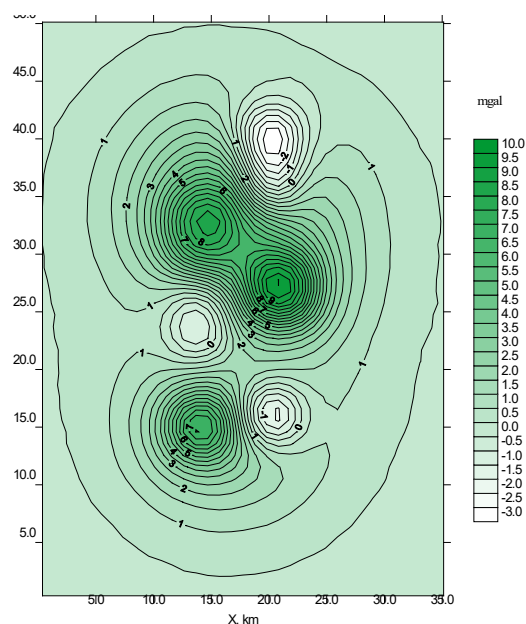


Рис.2. Гравитационное поле
по результатам F-аппроксимации
Fig. 2. Gravitational field according to the results
of F-approximation

лой (3). На заключительном этапе вычисляются компоненты поля от каждого слоя. Данная методика апробирована на модельных и реальных геолого-гравиметрических материалах.

Методика разделения аномальных полей на основе F-аппроксимации была апробирована на следующем модельном примере. Размер площади 35 км×50 км. Общее количество расчетных гравиметрических пунктов составляет 6000, сеть нерегулярная. Схема размещения сети и рельеф земной поверхности на данном участке аналогичны предыдущему модельному участку. Для данного участка было также рассчитано модельное гравитационное поле, обусловленное 8 призматическими телами. На данном участке модельные тела располагаются на двух ярусах, в интервалах глубин 1.5-2.5 км и 5.0-8.0 км. Модельное поле имеет достаточно сложный характер и представлено на рис. 1.

Для данного модельного участка ранее была выполнена F-аппроксимация с использованием представления вида (10-14) при $H_1=1.5$ км и $H_2=4.5$ км. Результаты аппроксимации были использованы для аналитического продолжения в верхнее и нижнее полупространства и нахождения горизонтальных и вертикальных производных различного порядка. С целью разделения гравитационных аномалий, обусловленных телами, расположенными в различных структурных этажах для этого модельного участка была построена F-аппроксимация. На рис. 2 приведена карта гравитационного поля по результатам F-аппроксимации.

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации составляет в данном случае 0.013 мГал. Достаточно высокая точность аппроксимации подтверждается также анализом разностного гравитационного поля для данного участка. На рис. 3-4 приведены карты расчетного гравитационного поля и аномального гравитационного поля, полученного с использованием описанной выше методики разделения полей, соответственно для первого структурного этажа (интервал глубин 1.5-4.5 км).

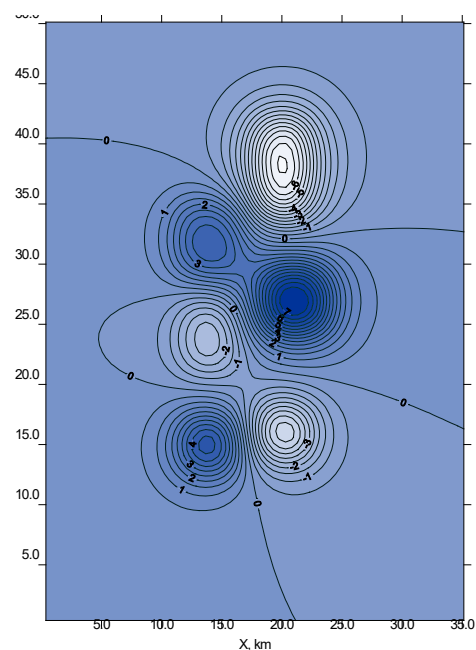


Рис. 3. Модельное гравитационное поле
(интервал глубин 1.5-4.5 км)
Fig. 3. Model gravitational field (depth interval
1.5-4.5 km)

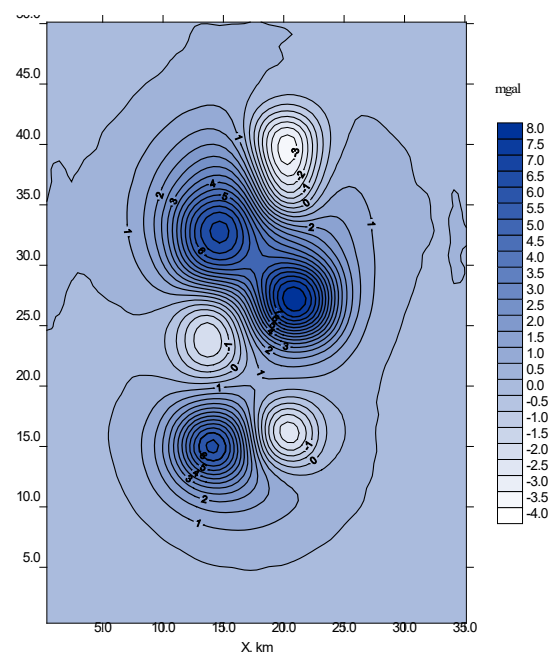


Рис. 4. Гравитационное поле
по результатам F-аппроксимации
(интервал глубин 1.5-4.5 км)
Fig. 4. The gravitational field according to the
results of the F-approximation (depth interval
1.5-4.5 km)

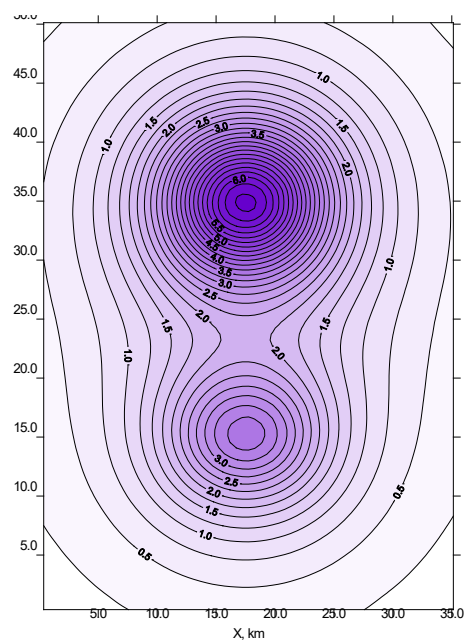


Рис. 5. Модельное гравитационное поле
(глубины > 4.5 км)
Fig. 5. Model gravitational field
(depths > 4.5 km)

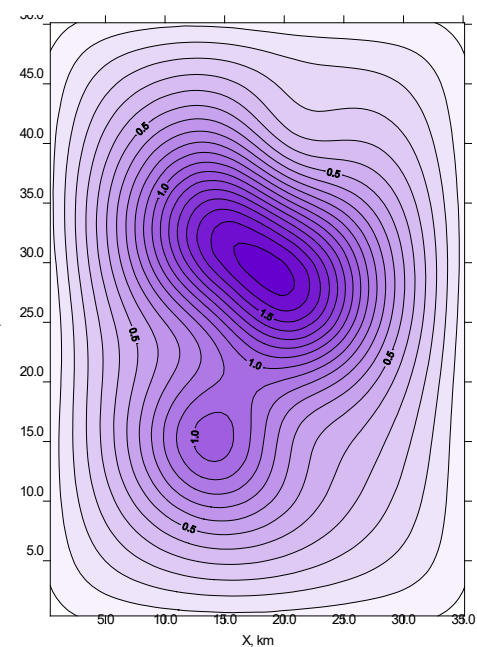


Рис. 6. Гравитационное поле
по результатам F-аппроксимации
(глубины > 4.5 км)
Fig. 6. Gravity field according to the results of the
F-approximation (depths > 4.5 km)

На рис. 5-6 приведены карты расчетного гравитационного поля и аномального гравитационного поля, полученного с использованием описанной выше методики разделения полей, соответственно для второго структурного этажа (глубины >4.5 км). Анализ этих карт показывает в целом на эффективность данного подхода при разделении полей.

3. Нахождение пространственного распределения функции Страхова

Предлагается для решения задач гравитационной вычислять следующую функцию, которая является обобщением функции Березкина. Данную функцию предлагается именовать функцией Страхова:

$$S(x, y, z) = \frac{\|M_2\|_E^2(x, y, z)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \|M_2\|_E^2(x, y, z) dx, dy} \quad (15)$$

где

$$M_2 = \begin{vmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{xy} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{xz} & V_{yz} & V_{zz} \end{vmatrix} \quad (16)$$

$$\|M_2\|_E^2 = V_{xx}^2 + V_{yy}^2 + V_{zz}^2 + 2(V_{xy}^2 + V_{xz}^2 + V_{yz}^2) \quad (17)$$

Метод вычисления функции Страхова позволяет избежать ограничений пересчета в нижнее полупространство. По данной методике разработан алгоритм и компьютерная программа. В настоящее время выполняются тестовые расчеты на модельных и реальных гравиметрических примерах.

Выводы

Результаты апробирования алгоритмов и программ аппроксимационного подхода к спектральному анализу гравитационных и магнитных аномалий на модельных и фактических гравиметрических и магнитометрических данных позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты исследований подтверждают теоретические выводы об эффективности аппроксимационного подхода к спектральному анализу (F-аппроксимация) гравитационных.

2. Метод F-аппроксимации является высокоэффективными способами аналитической аппроксимации гравимагнитных полей и рельефа земной поверхности.

3. Алгоритмы и программы F-аппроксимации являются эффективным инструментом обработки и интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных, заданных на неравномерной и разновысотной сети.

4. На основе метода F-аппроксимации разработаны три модификации гравитационной томографии: пересчет элементов гравитационного поля в верхнее и нижнее полупространства; разделение аномального гравитационного поля от разных структурных этажей; нахождение пространственного распределения функции Страхова.

5. Метод гравитационной томографии, основанный на изучении 3D распределения функции Страхова, рассчитанной на основе F-аппроксимации исходного гравитационного поля, является наиболее перспективным.

Литература

1. Бабаянц П. С., Блох Ю. И., Буш В. А., Трусов А. А. Интерпретация аэрогеофизических данных при поисках месторождений нефти и газа // Разведка и охрана недр, 2006а. № 5. С. 13-18.
2. Бабаянц П. С., Блох Ю. И., Трусов А. А. Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 31 сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 88-89.
3. Блох Ю. И. Проблема адекватности интерпретационных моделей в гравиразведке и магниторазведке // Геофизический вестник, 2004. №6. С.10-15.
4. Булах Е. Г., Левашов С. П. Построение геоплотностных моделей методом последовательного накопления и разрастания аномальных масс // Изучение литосферы геофизическими методами (электромагнитные методы, геотермия, комплексная интерпретация). Киев: Наукова думка, 1987. С.37-47.
5. Бычков С. Г. Современные технологии интерпретации гравиметрических данных при исследованиях на нефть и газ // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. http://www.ogbus.ru/authors/Bychkov/Bychkov_1.pdf. – 22 с.
6. Вашилов Ю. А. Гравиметрическая томография – новое направление изучения твердой оболочки Земли // Доклады РАН, 1995. Т. 343. № 4. С. 532-536.
7. Вдовина Е. П. Томографический алгоритм решения прямой и обратной задачи гравиметрии с учетом плотностной неоднородности среды // Геоинформатика, 2010. №2. С.46-53.
8. Долгаль А. С., Калинин Д. Ф., Олешкевич О. И, Симонов О. Н. Применение компьютерных технологий интерпретации геопотенциальных полей при прогнозировании платино-медно-никелевого оруденения // Разведка и охрана недр, 2006. № 8. С. 57-65.
9. Долгаль А. С., Шархимуллин А. Ф. О гравитационной томографии и путях ее дальнейшего развития // Вестник Пермского университета. Геология, 2009. Вып. 11 (37). С.
10. П. С. Бабаянц, Ю. И. Блох, Е. И. Зубов и др. Интерпретация аэрогеофизических данных при поисках месторождений твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр, 2006б. № 5. С. 18-27.
11. Керимов И. А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. I. Методика и результаты опробования на модельных примерах // Физика Земли, 2003. №1. С.57-76.
12. Керимов И. А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. II. Результаты опробования на материалах гравиметрических и магнитометрических съемок // Физика Земли, 2009. №.5. С. 77-93.
13. Керимов И. А. F-аппроксимации рельефа земной поверхности // Физика Земли, 2009. №.8. С. 101-112.
14. Мартышко П. С., Новоселицкий В. М., Пруткин И. Л. О разделении источников гравитационного поля по глубине // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН», 2002. № 1 (20). www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/scrub-7.htm#begin.
15. Новоселицкий В. М. К теории определения изменения плотности в горизонтальном пласте по аномалиям силы тяжести // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1965. № 5. С. 25-32.
16. Новоселицкий В. М., Долгаль А. С., Бычков С. Г. Новый алгоритмический базис технологии векторного сканирования геопотенциальных полей // Геофизические исследо-

вания Урала и сопредельных регионов. Материалы Международной конференции, посвященной 50-летию Института геофизики УрО РАН. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2008. С. 183-186.

17. Новоселицкий В. М., Простолупов Г. В. Векторная обработка гравиметрических наблюдений с целью обнаружения и локализации источников аномалий // Геофизика и математика. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 104-107.

18. Новоселицкий В. М., Бычков С. Г., Чадаев М. С. и др. Основные технологии векторной обработки и интерпретации гравитационных и магнитных полей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 28-сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 71-72.

19. Петрищевский А. М. Первые приближения к гравитационной томографии: принципиальные подходы, методика и геологические результаты // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 30-сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. Казань, КГУ, 2009. С. 255-258.

20. Страхов В. Н., Керимов И. А. Аппроксимационные конструкции спектрального анализа (F-аппроксимация) гравиметрических данных // Физика Земли, 2001. №12. С. 3-20.

21. Страхов В. Н., Керимов И. А., Степанова И. Э. Разработка теории и компьютерной технологии построения линейных аналитических аппроксимаций гравитационных и магнитных полей. М.: ИФЗ РАН, 2009. 254 с.

22. Тараканов Ю. А. Гравитационная томография // Проблемы геотомографии. М., 1997. С. 236-254.

23. Basuyau, C., & Tiberi, C. Imaging lithospheric interfaces and 3D structures using receiver functions, gravity, and tomography in a common inversion scheme. *Computers & Geosciences*, 2011, 37 (9): 1381-1390. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.11.017>

24. Berkel, P., & Michel, V. On Mathematical Aspects of a Combined Inversion of Gravity and Normal Mode Variations by a Spline Method [Article]. *Mathematical Geosciences*, 2010. 42 (7): 795-816. <https://doi.org/10.1007/s11004-010-9297-2>

25. Hsieh, H. H., & Yen, H. Y. (2016, Jul). Three-dimensional density structures of Taiwan and tectonic implications based on the analysis of gravity data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016. 124: 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.009>

26. Jacob, T., Samyn, K., Bitri, A., Quesnel, F., Dewez, T., Pannet, P., & Meire, B. Mapping sand and clay-filled depressions on a coastal chalk cliff top using gravity and seismic tomography refraction for landslide hazard assessment, in Normandy, France. *Engineering Geology*, 2018. 246: 262-276. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.007>

27. Liu, G. F., Yan, H. F., Meng, X. H., & Chen, Z. X. An extension of gravity probability tomography imaging [Article]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014. 102: 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.12.012>

28. Sampietro, D., & Capponi, M. (2019, Aug). Practical Tips for 3D Regional Gravity Inversion. *Geosciences*, 2019. 9(8), 13, Article Unsp351. <https://doi.org/10.3390/geosciences9080351>

29. Shirzaii M., Ardalan A. Gravity tomography for determination of the location and extent of interior structures of the Earth via wavelet transforms; case study: gravity tomographic map of the oil reservoirs // *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 7, 2005. 00678

30. Singh, A. Triangular Grid-Based Fuzzy Cross-Update Inversion of Gravity Data: Case Studies from Mineral Exploration [Article]. *Natural Resources Research*, 2020. 29 (1), 459-471. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09480-x>

References:

1. Babayants P. S., Blokh Yu. I., Bush V. A., Trusov A. A. Interpretation of airborne geophysical data when exploring oil and gas deposits. *Exploration and protection of mineral resources*, 2006a. No. 5. pp. 13-18. (In Russ.)

2. Babayants P. S., Blokh Yu. I., Trusov A. A. Interpretation tomography according to gravity and magnetic exploration data in the «SIGMA-ZD» software package. Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields. In: Proceedings of the 31st session of the International seminar named after D. G. Uspensky. Moscow. JIPE RAS, 2004. pp. 88-89. (In Russ.)
3. Blokh Yu. I. The problem of the adequacy of interpretation models in gravity and magnetic exploration. Geophysical Bulletin, 2004. No. 6. pp.10-15. (In Russ.)
4. Bulakh E. G., Levashov S. P. The construction of density models using the method of successive accumulation and growth of anomalous masses. Study of the lithosphere by geophysical methods (electromagnetic methods, geothermy, complex interpretation). Kiev, Naukova Dumka, 1987. pp.37-47. (In Russ.)
5. Bychkov S. G. Modern technologies for interpreting gravimetric data in oil and gas research. Electronic scientific journal «Petroleum Engineering». 2005. http://www.ogbus.ru/authors/Bychkov/Bychkov_1.pdf. 22 p. (In Russ.)
6. Vashchilov Yu. A. Gravimetric tomography – a new area of study of the Earth's hard shell. Doklady RAS, 1995. Vol. 343. No.4. pp. 532-536. (In Russ.)
7. Vdovina E. P. The tomographic algorithm for solving the direct and inverse problems of gravimetry taking into account the density inhomogeneity of the medium. Geoinformatics, 2010. No.2. pp.46-53. (In Russ.)
8. Dolgal' A. S., Kalinin D. F., Oleshkevich O. I., Simonov O. N. The use of computer technology for the interpretation of geopotential fields in the prediction of platinum-copper-nickel mineralization. Exploration and mineral protection, 2006. No.8. pp. 57-65. (In Russ.)
9. Dolgal' A. S., Sharkhimullin A. F. About gravitational tomography and the ways of its further development. Bulletin of Perm University. Geologiya, 2009. Issue 11 (37). (In Russ.)
10. P. S. Babayants, Yu. I. Blokh, E. I. Zubov et al. Interpretation of airborne geophysical data when searching for solid mineral deposits. Exploration and Protection of Subsurface Resources, 2006b. No. 5. pp. 18-27. (In Russ.)
11. Kerimov I. A. The use of F-approximation in the interpretation of gravimetric data. I. Methods and results of testing on model examples. Physics of the Solid Earth, 2003. No.1. pp.57-76. (In Russ.)
12. Kerimov I. A. Using F-approximation in the interpretation of gravimetric data. II. The results of testing on the materials of gravimetric and magnetometric surveys. Physics of the Solid Earth, 2009. No.5. pp. 77-93. (In Russ.)
13. Kerimov I. A. F-approximation of the relief of the earth's surface. Physics of the Solid Earth, 2009. No.8. pp. 101-112. (In Russ.)
14. Martyshko P. S., Novoselitskii V. M., Prutkin I. L. On the separation of gravity field sources by depth. Scientific Information Journal «Bulletin of the Earth Sciences Division of the Russian Academy of Sciences», 2002. No. 1 (20). www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/scpub-7.htm#begin. (In Russ.)
15. Novoselitskii V. M. On the theory of determining changes in density in a horizontal layer by anomalies of gravity. Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Physics of the Earth. 1965. No.5. pp. 25-32. (In Russ.)
16. Novoselitskii V. M., Dolgal' A. S., Bychkov S. G. A new algorithmic basis for vector scanning technology of geopotential fields. Geophysical research of the Urals and adjacent regions. In: Proceedings of the International Conference dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Geophysics, UB RAS. Ekaterinburg, IGF UB RAS, 2008. pp.183-186. (In Russ.)
17. Novoselitskii V. M., Prostolupov G. V. Vector processing of gravimetric observations in order to detect and localize sources of anomalies. Geophysics and Mathematics. Moscow. JIPE RAS, 1999. pp.104-107. (In Russ.)
18. Novoselitskii V. M., Bychkov S. G., Chadaev M. S. et al. Basic technologies of vector processing and interpretation of gravitational and magnetic fields. Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields. In: Proceedings of the 28th

session of the International seminar named after D. G. Uspensky. Moscow. JIPE RAS, 2001. pp. 71-72. (In Russ.)

19. Petrishchevskii A. M. The first approximations to gravitational tomography: fundamental approaches, methods and geological results. Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields. In: Proceedings of the 30th session of the International seminar named after D. G. Uspensky. Kazan, KSU, 2009. pp. 255-258. (In Russ.)

20. Strakhov V. N., Kerimov I. A. Approximate constructions of spectral analysis (F-approximation) of gravimetric data. Physics of the Solid Earth, 2001. No.12. pp.3-20. (In Russ.)

21. Strakhov V. N., Kerimov I. A., Stepanova I. E. Development of the theory and computer technology for constructing linear analytical approximations of gravitational and magnetic fields. Moscow. IPE RAS, 2009. 254 p. (In Russ.)

22. Tarakanov Yu. A. Gravitational tomography. Problems of geotomography. Moscow, 1997. pp. 236-254. (In Russ.)

23. Basuyau, C., & Tiberi, C. Imaging lithospheric interfaces and 3D structures using receiver functions, gravity, and tomography in a common inversion scheme. Computers & Geosciences, 2011, 37 (9): 1381-1390. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.11.017>

24. Berkel, P., & Michel, V. On Mathematical Aspects of a Combined Inversion of Gravity and Normal Mode Variations by a Spline Method [Article]. Mathematical Geosciences, 2010. 42 (7): 795-816. <https://doi.org/10.1007/s11004-010-9297-2>

25. Hsieh, H. H., & Yen, H. Y. (2016, Jul). Three-dimensional density structures of Taiwan and tectonic implications based on the analysis of gravity data. Journal of Asian Earth Sciences, 2016. 124: 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.05.009>

26. Jacob, T., Samyn, K., Bitri, A., Quesnel, F., Dewez, T., Pannet, P., & Meire, B. Mapping sand and clay-filled depressions on a coastal chalk cliff top using gravity and seismic tomography refraction for landslide hazard assessment, in Normandy, France. Engineering Geology, 2018. 246: 262-276. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.007>

27. Liu, G. F., Yan, H. F., Meng, X. H., & Chen, Z. X. An extension of gravity probability tomography imaging [Article]. Journal of Applied Geophysics, 2014. 102: 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.12.012>

28. Sampietro, D., & Capponi, M. (2019, Aug). Practical Tips for 3D Regional Gravity Inversion. Geosciences, 2019. 9 (8), 13, Article Unsp 351. <https://doi.org/10.3390/geosciences9080351>

29. Shirzaii M., Ardalan A. Gravity tomography for determination of the location and extent of interior structures of the Earth via wavelet transforms; case study: gravity tomographic map of the oil reservoirs // Geophysical Research Abstracts. Vol. 7, 2005. 00678

30. Singh, A. Triangular Grid-Based Fuzzy Cross-Update Inversion of Gravity Data: Case Studies from Mineral Exploration [Article]. Natural Resources Research, 2020. 29 (1), 459-471. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09480-x>

GEOPHYSICS

УДК 550.37

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59066](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59066)

Original paper

Combined geoelectrical and geoelectromagnetic survey for contributing to local hydrogeological regime – The case study of Delfini basin (Chios isl. – Greece)

T. D. Papadopoulos , J. D. Alexopoulos , S. Dilalos

Division of Geophysics and Geothermy, Department of Geology & Geoenvironment,
National and Kapodistrian University of Athens, Panepistimiopolis 15784 Zografos,
Athens, Greece, e-mail: tpapadop@geol.uoa.gr

Received: 05.03.2020, revised: 25.03.2020, accepted: 27.03.2020

Abstract: Relevance. In this paper the feeding mechanism of springs distributed around the broader area of Delfini at NE side of Chios Island is explored, in an effort to locate possible fresh water paths inland before they are discharged to the sea. The drilling of hydro wells for more production is of vital importance to cover the drinking and irrigation needs of the broader area. **Aim.** Although Chios has been extensively drilled in the past years the demand for further investigations comes from an increased water consumption during summer time in one hand and the inefficiency of alternative water resources (e.g. construction of dams, desalination units, etc) on the other hand. **Methods.** Geophysical methods were used (VLF and resistivity) to explore in detail water potential areas, like the broader area of Delfini, where during winter time huge quantities of fresh water discharge through springs to sea level. **Results and its discussion.** The presence of a confined aquifer composed mainly of limestones, which are overlain by clastic impermeable deposits, together with the existence of water potential bearing fracture zones determine the hydrogeological regime of the nearby area. It is also explained the presence of brackish waters at positive elevations found during summer time at nearby springs. It seems that the lateral extent of impermeable clastic deposits plays a crucial role in allowing the inland flow of seawater during summer time and combined with the presence of the confined aquifer of fresh water produce an upward mixing flow of fresh and seawater at springs of positive elevations. During winter time the huge amount of fresh water discharges do not allow the inland flow of seawater.

Keywords: Resistivity, VLF, Spring Mechanism, Seawater Intrusion, Geoelectrical basement.

Acknowledgments: *The authors would like to thank Mr. Pippidis Michael, for his valuable hydrogeological conversations and guidelines, Mr. Mourounas Ioannis, director of Water Management Organization and Tomara V., Goumas G., Drossopoulou E., Staurou A. & Nikolis V. for their contribution during the fieldwork campaigns.*

For citation: Papadopoulos T. D., Alexopoulos J. D., Dilalos S. Combined geoelectrical and geoelectromagnetic survey for contributing to local hydrogeological regime – The case study of Delfini basin (Chios isl. – Greece). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. 10 (1): 68-80. DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59066](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59066).

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59066](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59066)

Оригинальная статья

Комбинированные геоэлектрические и геоэлектромагнитные исследования вклада в местный гидрогеологический режим – на примере бассейна Дельфины (остров Хиос – Греция)

Т.Д. Пападопулос, Дж.Д. Алексопулос, С. Дилалос

Национальный Афинский университет им. Каподистрии, факультет геологии
и геоэкологии, отдел геофизики и геотермии, Панепистимиополис,
г. Афины 15784, Греция, e-mail: tpapadop@geol.uoa.gr

Статья поступила: 05.03.2020, после рецензирования: 25.03.2020, принята к публикации: 27.03.2020

Резюме: Актуальность. В данной статье исследуется механизм питания источников, распределенных вокруг широкой области Дельфины на северо-восточной стороне острова Хиос, в попытке найти возможные пути фильтрации пресных вод внутри острова, до того как они будут сброшены в море. **Цель.** Бурение гидрогеологических скважин для увеличения добычи имеет жизненно важное значение для удовлетворения потребностей в питьевой воде и ирригации широкой территории. Несмотря на то, что в последние годы на острове Хиос интенсивно бурятся скважины, потребность в дальнейших исследованиях связана с увеличением потребления воды в летнее время, с одной стороны, и неэффективностью альтернативных водных ресурсов (например, строительство плотин, опреснительных установок и т.д.), с другой стороны. **Методы.** Геофизические методы (низкочастотная электроразведка и удельное сопротивление) использовались для детального изучения областей водного потенциала, таких как наиболее широкая область Дельфины, где в зимнее время огромное количество пресной воды сбрасывается через источники до уровня моря. **Результаты и их обсуждение.** Наличие ограниченного водоносного горизонта, состоящего в основном из известняков, которые перекрыты обломочными непроницаемыми отложениями, а также наличие разрывных зон, несущих водный потенциал, определяют гидрогеологический режим близлежащего района. Это также объясняется наличием солоноватых вод на положительных высотах, обнаруженных в летнее время в близлежащих источниках. По-видимому, боковая протяженность непроницаемых обломочных отложений играет решающую роль, позволяя внутреннему стоку морской воды в летнее время и в сочетании с наличием ограниченного водоносного горизонта пресной воды создавать восходящий смешивающийся поток пресной и морской воды в источниках возвышенностей. В зимнее время огромное количество оттока пресной воды не позволяет внутреннему притоку морской воды.

Ключевые слова: удельное сопротивление, низкочастотная электроразведка, пружинный механизм, вторжение морской воды, геоэлектрический фундамент.

Благодарности: Авторы хотели бы поблагодарить г-на Пиппидиса Майкла за его ценные гидрогеологические беседы и руководства, г-на Мурунаса Иоанниса, директора Организации по управлению водными ресурсами и Томару В., Гумас Г., Дроссопулу Э., Стару А. и Николис В. за их вклад во время полевых исследований.

Для цитирования: Пападопулос Т.Д., Алексопулос Дж.Д., Дилалос С. Комбинированные геоэлектрические и геоэлектромагнитные исследования вклада в местный гидрогеологический режим – на примере бассейна Дельфины (остров Хиос – Греция). *Геология и геофизика Юга России*. 2020.10 (1): 68-80. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59066.

1. Introduction

The island of Chios has been extensively drilled for water exploitation the last two decades, in an effort to cover the needs of water supply in urban and rural areas. The demand for greater quantities of water consumptions increases particularly during summer. The hydrogeological basin of «Korakari» is considered as the most water productive area in Chios Isl., providing >80% of the water supply and >70% covering of the irrigation needs of the island [Banos et al., 1995]. Although it seems that the water supply problem is not intense, however some production wells appear an abnormal increase in mercury (Hg) content, around the area of «Korakari» during summer. This problem requires the investigation of other potentially productive areas. Of course, local authorities and governmental agencies have also proposed other more permanent solutions like the construction of dams (e.g. Katraris, Fyrolakas, Koris Gefyri, Sarapio, etc.) and the establishment of desalination units. The construction of dams started long time ago but still are out of operation, mainly because of financial problems. Desalination units were also put forward in the area of Lagada in NE Chios but their maintenance cost is high so they were not used in other places. Besides these intermediate and long-term solutions, other approaches were proposed to cover immediate needs and solve the water supply problem in Chios Island.

A geophysical survey was proposed to search for new potentially promising areas for further drilling [Dilalos, 2009]. These areas must fulfill the following prerequisites: a) To be in regions that are not extensively drilled by previous works, b) to be in accessible places in order to be reached easily by a drilling machine, c) to be in areas that are promising from a hydrogeological point of view based on the detailed consideration of the geological structure and the potentiality of the geophysical methods used and d) to be close to the existing water pipe network for direct connection of the new productive wells. As it is obvious, the constraints mentioned above, make the problem more complicated and impose specific geophysical methods to be used. These methods have been successfully applied in the past in similar geoenvironments [Alexopoulos et al., 2007; 2008; 2011; 2013; Banks et al., 1994; Bernard et al., 1991; Benson et al., 1977; Monteiro Santos, 2006; Papadopoulos, Alexopoulos, 1999; Paraskevopoulos, Papadopoulos, 2002; Sharma, Baranwal, 2005; Sree Devi et al., 2001; Stournaras et al., 1993] and in other cases for the investigation of seawater intrusion [Alexopoulos et al., 2019; Albouy et al., 2001; Yang et al., 1999], which is also under investigation here.

In order to detect vertical or sub-vertical conductive zones the VLF method was applied. From the areas that were explored the region of Delfini was extensively surveyed. Great surface water discharges appear close to sea level (SP1 at +4.2 m elevation, SP2 +2.6 to +0.9 and SP3 ± 0 ; fig. 1) in the broader area of Delfini. The idea was to study possible water paths through karstic structures or fault zones before the water discharges to sea level. The detailed geological mapping of the area under investigation helped us to draw the appropriate geophysical profiles. Besides VLF measurements, resistivity soundings were also conducted to investigate seawater intrusion and the depth of carbonate rocks under the alluvial deposits in Delfini plain.

2. Geological setting

Chios Island can be subdivided into two tectonostratigraphic units [Besenecker et al., 1968]:

First, an autochthonous unit (Fig. 1) which consists from the base of mainly clastic rocks of late Palaeozoic age, that are overlain by a succession of early Triassic conglomerates.

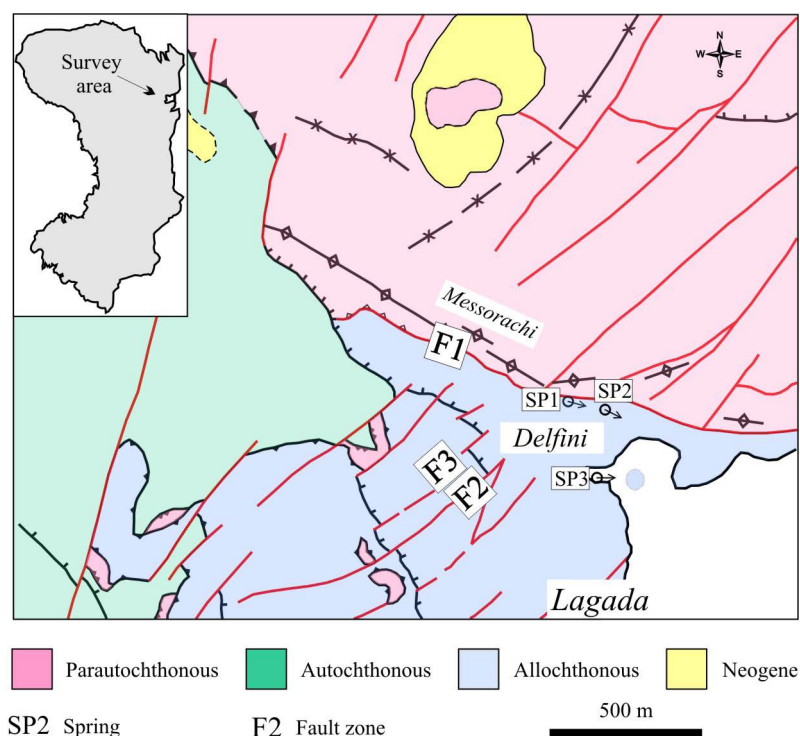


Fig. 1. Major tectonostratigraphic units of the survey area [Kauffmann, 1969]. /
Рис. 1. Основные тектоно-стратиграфические единицы района съемки [Kauffmann, 1969].

erates, sandstones followed from well bedded limestones of late early Triassic age and massive limestones interbedded with reddish Hallstatt type limestones. This sequence is overlain by an Anisian volcano-sedimentary succession, followed by the well-bedded marly limestones of late Anisian and a more than 1000 meters thick Ladinian to Rhaetian – Liassic age limestones, with few clastic intercalations (*emersion horizons*).

Second, an allochthonous unit (Fig.1) which overlies parts of the autochthonous/parautochthonous basement and consists of a lower horizon of quartzose graywakes, sandstones and minor siltstones of late Carboniferous age, followed by limestones and a clastic carbonaceous succession of early Permian age. The middle Permian is represented by carbonate sequences, which are overlain by transgressive sediments (conglomerates, sandstones, siltstones followed by thick bedded Dachstein-type limestones and minor dolomites) of early Jurassic age. Tectonically between these two units are caught parts of the autochthonous succession as parautochthonous unit. The formations of the Aepos – Pytious karstified plateau, which comprise the hydrogeological basin of the study area, belong to the autochthonous unit, with the exception of the Delfini depression where the allochthonous unit lies over the autochthonous and in places the parautochthonous basement. The parautochthonous formations are well developed further north on the Kardamyla – Skoukla peninsula. The detailed geological setting of the study area is shown in figure 2.

The Chios Isl. is located in the middle of an area dominated by crustal extension since Miocene period, with generally NNE to SSW direction, which results in E to W trending normal faults. The extensional regime is conjugated with NE to SW and NW to SE strike-slip deformations and E to W compression. The Anavatos – Koila fault divides the ground water basin into two almost equal east and west parts and outlines the western boundary of the Delfini depression (Fig. 3). Subparallel to it and eastward lies the Tria Pigadia –

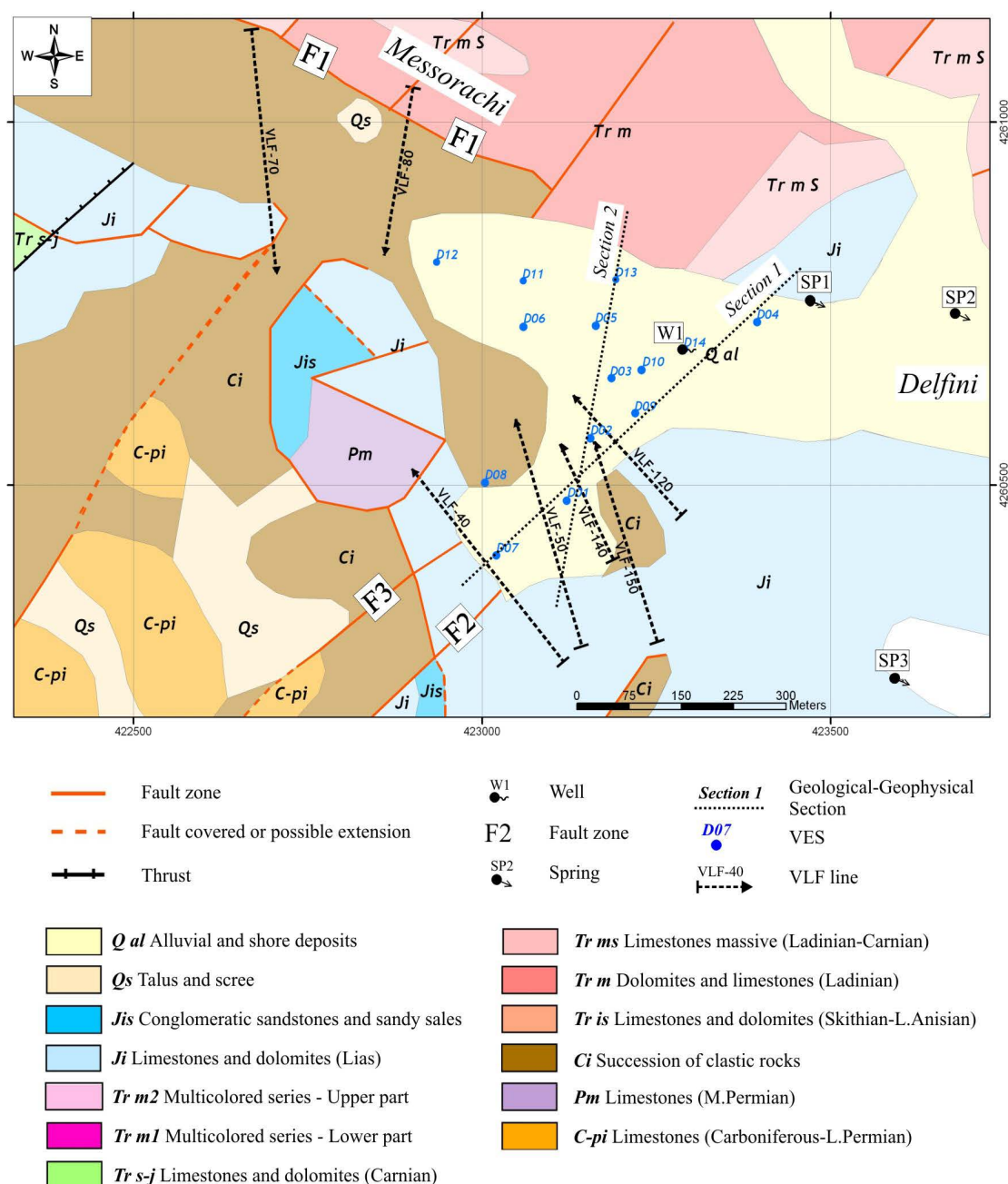


Fig. 2. Detailed geological map of the survey area along with the VLF traverses and geoelectrical soundings (Chios Sheet, Kauffmann G., Institute for Geology & Subsurface Research, 1971). /

Рис. 2. Подробная геологическая карта района исследования, а также траверсы низкочастотной электроразведки и геоэлектрическое зондирование (лист Хиос, Кауфман Г., Институт геологии и подземных исследований, 1971).

Pantoukios fault, which is continued below sea level in the Pantoukios gulf. In NE to SW direction lies the Krikelis fault, which intersects the Anavatos-Koila fault and continues, through the Delfini depression, further north. Parallel to it, shorter faults intersect the allochthonous formations of the Delfini depression and the Skoukla peninsula. In NW to SE, direction lies the Anavatos – Nea Moni fault zone.

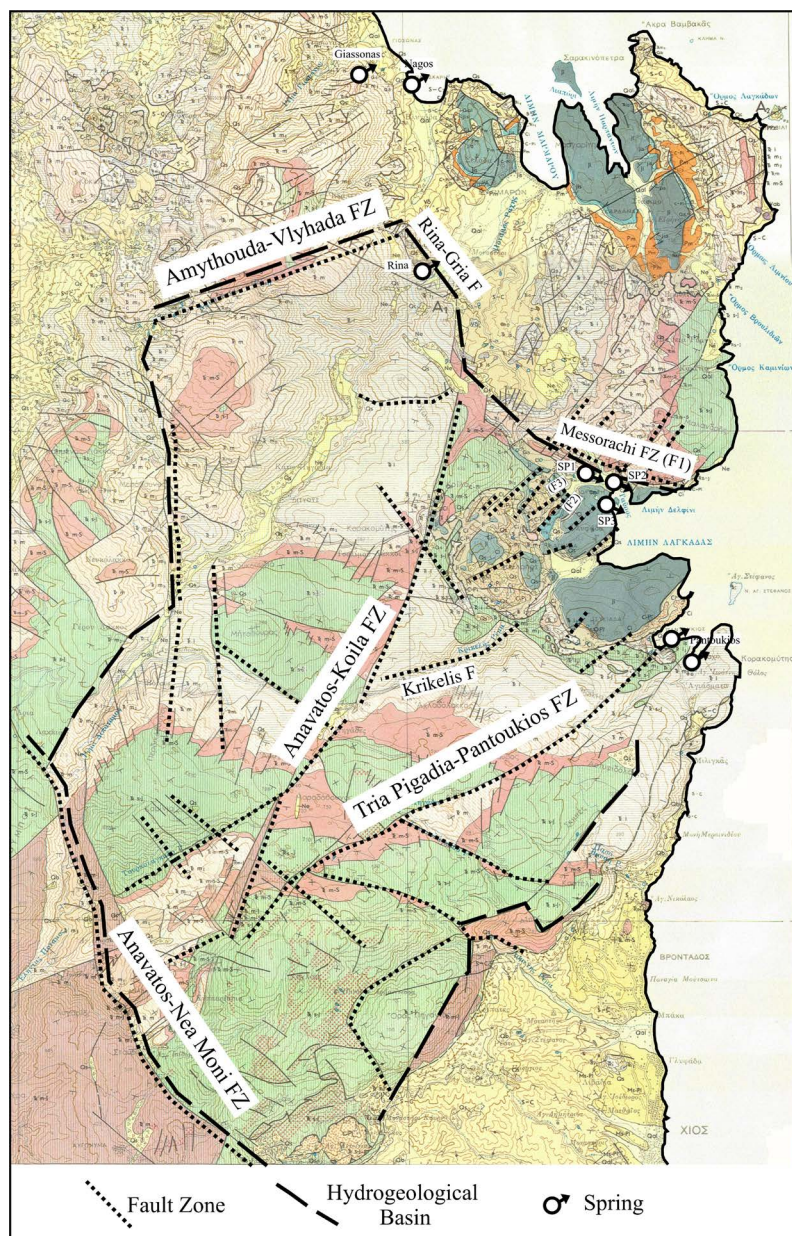


Fig. 3. The broader ground water basin of the area under study along with the main fault zones (modified from geological map «Chios», Institute for Geology & Subsurface Research, 1971). /
 Рис. 3. Широкий бассейн подземных вод исследуемой территории вместе с основными зонами разломов (модифицировано по геологической карте «Хиос», Институт геологии и глубинных исследований, 1971 г.).

2.1 Hydrology and watershed of the Delfini karstic coastal system.

The central part up to NE of Chios Isl. is covered by a large limestone plateau of Jurassic–Triassic age, with a complicated tectonic structure. The limestone plateau, stays from about >800 m WSW to 400 m ENE above sea level and its north eastern termination (*the Delfini – Kardamyla depression*) from >200m to below sea level (*the depth of the sea bottom, which forms an underwater plain in front of the depression is constantly 70 to 80 m*). The major part of the plateau is intensely karstified and the annual rainfalls exceed 700 mm/y (>90% of the total rain) during the winter months, from October to April. The majority of the plateau surface is a denudated karst covered of scarce scrub of low vegeta-

tion which presents high infiltration rates that are estimated more than 30% and locally >45%. Between the gulfs of Pantoukios and Delfini, the watershed dips below sea level, to a depth of about 70-80m. The East – North borders are designated from the contact between the parautochthonous and the allochthonous unit in the Messorachi region, the Delfini tectonic zone and the north part of the Anavatos-Koila fault zone (Fig. 3). In the north, the fault zone Amythounda-Vlyhada separates the Delfini hydrogeological unit from the Nagos-Giosonas unit. The watershed basin of the Delfini karstic coastal system, covers more than 90 km² and the yearly discharge may exceed 30x10⁶ m³, a quantity that is almost three times higher than the actual water demand/consumption on the island. The possible borders of the broader ground water basin that feeds with huge water discharges the gulfs of Pantoukios and Delfini are shown in figure 3.

2.2 Hydrogeological aspects of the Delfini aquifer

The Palaeozoic clastic rocks of the autochthonous unit form the impermeable basement. The early Triassic conglomerates, sandstones, the well bedded limestones which follow, the massive limestones which incorporate Hallstatt inclusions and the more than 1000m thick Ladinian to Rhaetian – Liassic limestones, form the potential permeable cover. The Anisian volcano-sedimentary succession and the well-bedded marly limestones, together with the emersion horizons can form impermeable layers. The quartzose graywakes, sandstones and siltstones of the lower horizon form a possible discontinuous impermeable layer, together with the clastic carbonaceous succession of the early Permian and the clastic sediments in the base of the thick-bedded limestones and dolomites, which close the stratigraphic sequence of the allochthonous unit. The Dachstein type thick-bedded limestones, of early Jurassic age, form a potentially permeable formation. The numerous intersecting faults favored the development of limestone karstification and produced an efficient subsurface drainage system in which probably the Anavatos-Koila fault zone serves as a main collector, which feeds the Krikelis and the parallel to it faults in the Delfini depression.

2.3 Discharge characteristics of the Delfini karstic coastal system

The lower part (*also below sea level*) of the aquifer in the Delfini depression area, which is mainly developed in the autochthonous limestones, is partly (*in unknown extent*) covered by the impermeable strata of the allochthonous and the parautochthonous formations. This cover protects partly the aquifer which discharges a considerable amount of fresh water at the Giuvari spring (SP3), without mixing with seawater. This spring flows at the intersection of a parallel to Krikelis fault with a thick Quaternary clay cover in the bottom of the small gulf in front of it, at zero elevation. The year round discharge is estimated of more than 0.45x10⁶ m³. The Pantoukios gulf, which forms the extension of the Tria Pigadia-Pantoukios fault, discharges below sea level (*>30 m*) big quantities of karst water which are observable at sea surface most of the year. In the Lagada gulf, does not appear any spring over or below sea level. In the north end of the Delfini depression along the Messorachi fault zone area, the Delfini springs (*SP1 at +4.2 m elevation and SP2 at different locations from +2,6 to +0,9 m above sea level*), discharge more than 5x10⁶ m³/annually. The fluctuation of the volume and the salinity of the springs depend on the annual rate of the rainfalls, the location of the springs and the elevation of the discharge. Submarine springs along that fault line are not known. On the north end of the watershed, the Rina springs at an elevation of +56m discharge (*only during the months of the winter*

a quantity that can vary considerably from 0 to more than $1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) at the intersection of a parallel to Anavatos-Koila fault zone with the Rina-Gria fault which is parallel to Messorachi fault zone.

2.4 Investigation of the Delfini discharge zone

Two main springs discharge in the area of Delfini (SP1 and SP2) near the sea level (Figures 2 & 3). Both springs discharge great quantities of fresh water especially during winter and spring times with very good quality of water. The municipality of Chios through the Water Management Organization (DEYAX) has built aqueducts at spring sites SP1 and SP3 (Giuvari) and supplies the water network of the island. During summer time, the great quantities of discharge run short and the water quality is downgraded as it is affected by the seawater intrusion. The feeding of both springs was an unresolved problem and needed further investigation. In one hand, it seems that the fault zone F1 (figs. 1 & 2) is responsible for the discharge at site SP1 and on the other hand the parautochthonous series on the NE side of the fault zone does not show water feeding potential since the upper carbonate rocks of the unit are of small extent. Another interesting point is that the spring at site SP1 during summer time (low discharges) presents higher salinity values although lies at positive altitudes ($\sim 4.2 \text{ m}$). The allochthonous series on the SW side of fault zone F1, is generally considered as a non potentially water exploitation region since it is composed from impermeable rocks.

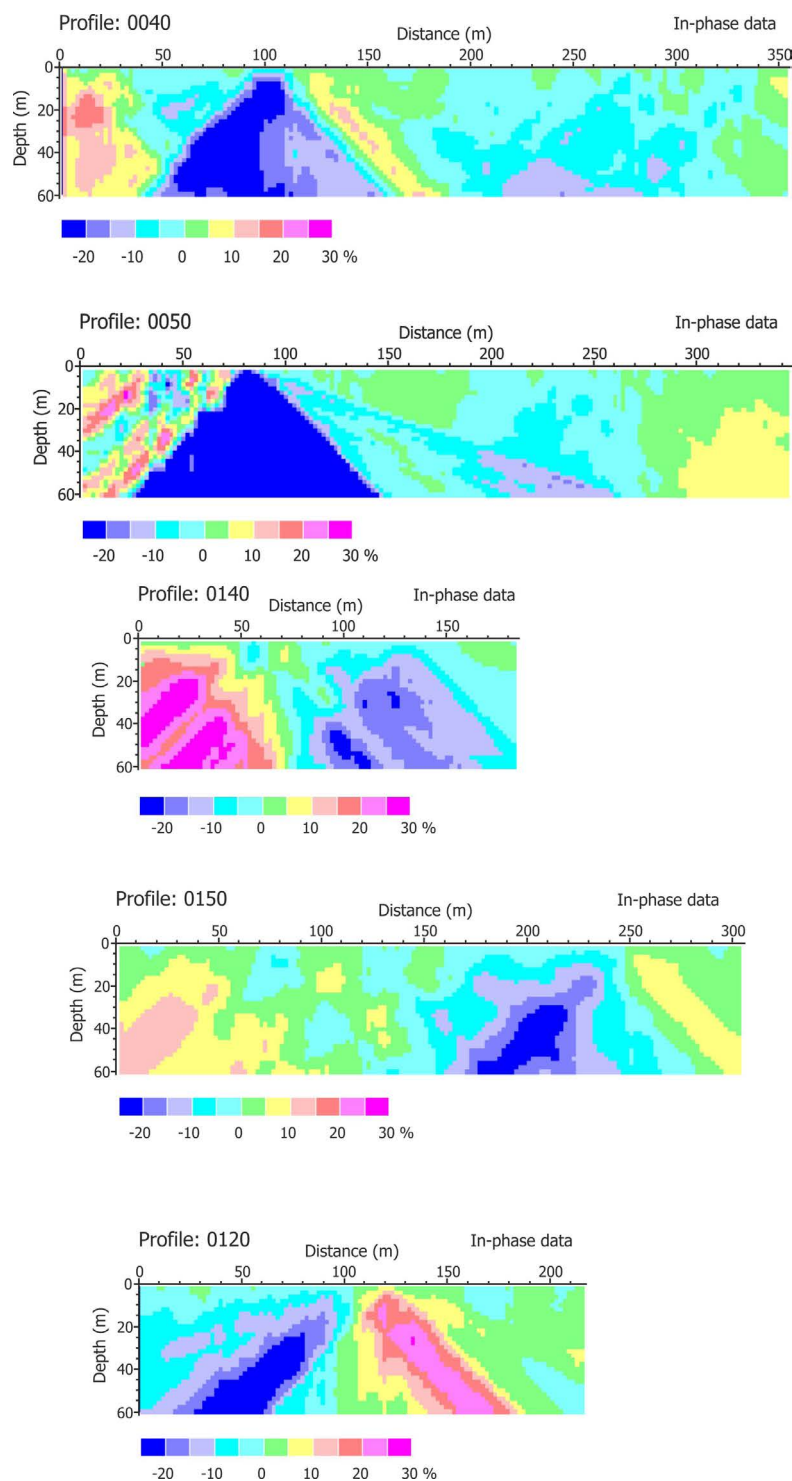
It seems that the springs SP1, SP2 and SP3 (figs 2 & 3), share a common feeding line, of Krikelis fault and the subparallel to it of smaller faults (e.g. F2 and F3) which are well developed in the Delfini depression and are in some way connected to Anavatos – Koila fault zone. The Messorachi fault zone (F1), intersects almost perpendicularly those faults and probably brings the seawater inland. The faults must affect the main aquifer on the autochthonous basement, which is effectively protected from sea water intrusion, mainly by the cover of the allochthonous unit and probably by the recent clay rich deposits, like the case of spring SP3 (Giuvari). This model of the discharge mechanism must be validated prior to establishment of a viable exploitation scheme of that aquifer in the region around the Delfini valleys and at an elevation of less than 100m. So, it is necessary to answer the follow questions: Are the NE to SW faults in the Delfini depression affecting the autochthonous basement? Which of the mapped faults are active hydrologically and in which way they are affected by the seawater intrusion? How deep are the impermeable covers? Is the aquifer limited in the fault zone or not? Is the Messorachi fault zone the canal for seawater intrusion? At what depth the drilling must end up, before getting in contact with a deeper mixed with seawater aquifer?

3. VLF measurements

VLF measurements were conducted in order to detect vertical to sub-vertical conductive zones or karstic structures in carbonate rocks perpendicular to fault zones as it is shown in figure 2. The spacing between stations was 5 meters and the VLF lines were kept long enough (a length greater than 200m) to outline the VLF anomalies. Although the relief was not smooth along almost all lines, however the filtered data [Walen, 2003; Ogilvy, Lee, 1991, Karous, Hjelt, 1983] provided reliable results without applying topographic corrections.

In the area of Delfini, at least five (5) VLF lines were conducted mainly, to detect the NE extension of fault zones F2 and F3. Two (2) VLF lines were also carried out trans-

versely to the fault zone F1 to examine its potential relative to SE-ward discharge of Mes-sorachi Mtn. In figure 4 the interpreted filtered data for the Delfini area are shown. The fault F2 is extended NE-ward (fig. 4) up to the plain of Delfini. Fault F3 does not show a clear NE extension.



*Fig. 4. VLF interpreted filtered data in study area. /
Рис. 4. Интерпретированные отфильтрованные данные
низкочастотной электроразведки исследуемой области.*

4. Resistivity survey

Resistivity measurements were also conducted in the area of Delfini westwards from spring SP1 (fig. 2). Fourteen (14) soundings (VES) were carried out, using the Schlumberger configuration and further three (3) in situ measurements were conducted. The main purpose of this investigation was to outline the inward extension of seawater front and to characterize the nature of the basement in the NE extension of faults F2 and F3. Although the geoelectrical data were processed by applying the automatic method of Zohdy and Bisdorf [Zohdy, 1989] and the commercial software packages IX1D (v^3) of Interpex (2006) and WinSev of W-GeoSoft, the final interpretation was based on IX1D package. A 3D representation of the geoelectrical basement has also been produced (fig. 5), a visualization successfully used in the past by the authors [Alexopoulos, Dilalos, 2010]. According to these resistivity results (high resistivity values, >250 Ohm.m), the basement in the area between the soundings D01, D02, D08 is composed of carbonate rocks at depths greater than 20 meters (fig. 5). The area between soundings D03, D09 and D10 presents lower resistivity values (<60 Ohm.m) up to depths of 40 meters.

The geological formation with such resistivity values is compatible with the presence of clastic rocks of the allochthonous series. At depths greater than 40 meters, highly resistive (>300 Ohm.m) formations of probably carbonate nature are present. The geoelectric sounding D04 showed very low resistivity values (~ 6 Ohm.m) indicating the inward (inland) intrusion of seawater. The area south of sounding D04 is swampy, not allowing further investigation of this area. The interesting point here is that sounding D04 lies at an elevation of approximately 6 meters above sea level and the low (~ 6 Ohm.m) resistivity value was detected at positive elevation of about 1m below ground surface. The spring SP1 that is close to sounding D04 shows similar behavior. All resistivity measurements were carried out during July 2007, at times where fresh water discharges were low. Measurements of water conductivity made in the well W1 (fig. 3) showed high content of chloride ions during August 2007. The well is close to geoelectric sounding D14 (about

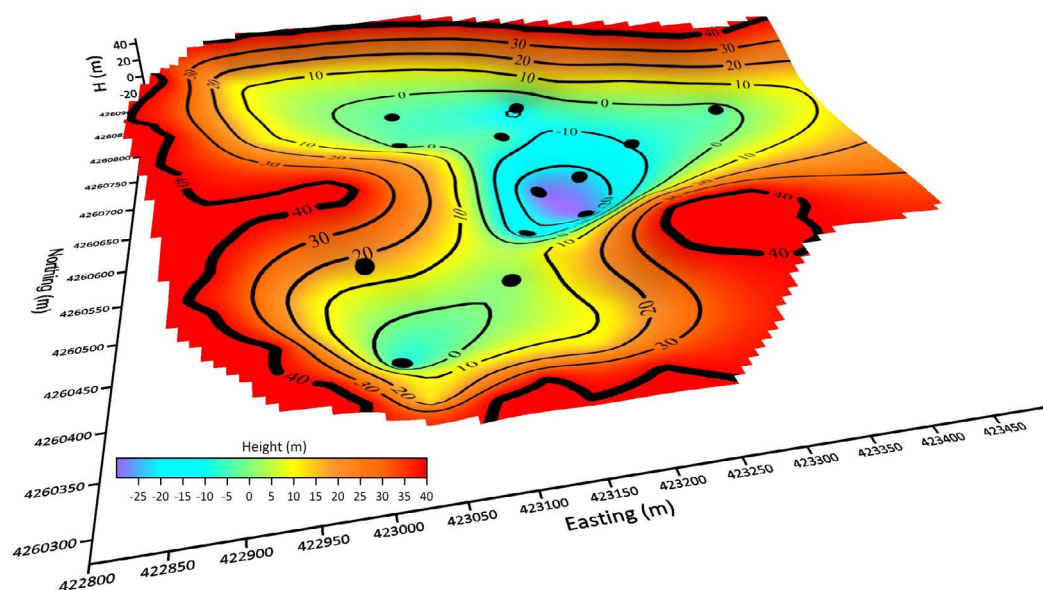


Fig. 5. 3D representation of the geoelectrical basement (limestones/dolomites). /
Рис. 5. Трехмерное изображение геоэлектрического фундамента (известняки/доломиты).

10 meters) and its water level was at an elevation of about 5-5.5 meters. The chloride content indicates the affect of seawater intrusion inland and according to resistivity values found in this area, the seawater front must be extended close to the area of geoelectrical soundings D09 and D10.

5. Integrating geophysical and geological results

In order to integrate geophysical results and geological data obtained from the area of Delfini, two cross sections were drawn in NE-SW (Section 1) and NNE-SSW (Section 2) directions respectively (fig. 2). These two sections are shown in figure 6. The subsurface geological setting of Delfini plain is composed of five mainly formations, two of which are the shallow clastic deposits (Ci-s) and the deeper clastic rocks (Ci) which are both impermeable ones. The presence of the shallow impermeable clastic deposits keep out the sea water intrusion inland and seems that the only free passage of sea water intrusion is through the alluvial and shore deposits NE-ward of sounding D14. The alluvial deposits in this area extend below sea level, allowing thus the seawater intrusion. Below the alluvial and clastic deposits are extended the permeable limestone-dolomite (Ji) and dolomite-limestone (Tr m) formations that form a confined aquifer. The presence of fault F2 in cross section 2, which is extended further to NE, might discharge great quantities of fresh water in the plain of Delfini. The presence of fault F1 might also discharge quantities of fresh water but if this fault extends further SE to Delfini gulf, it could work as well as a canal

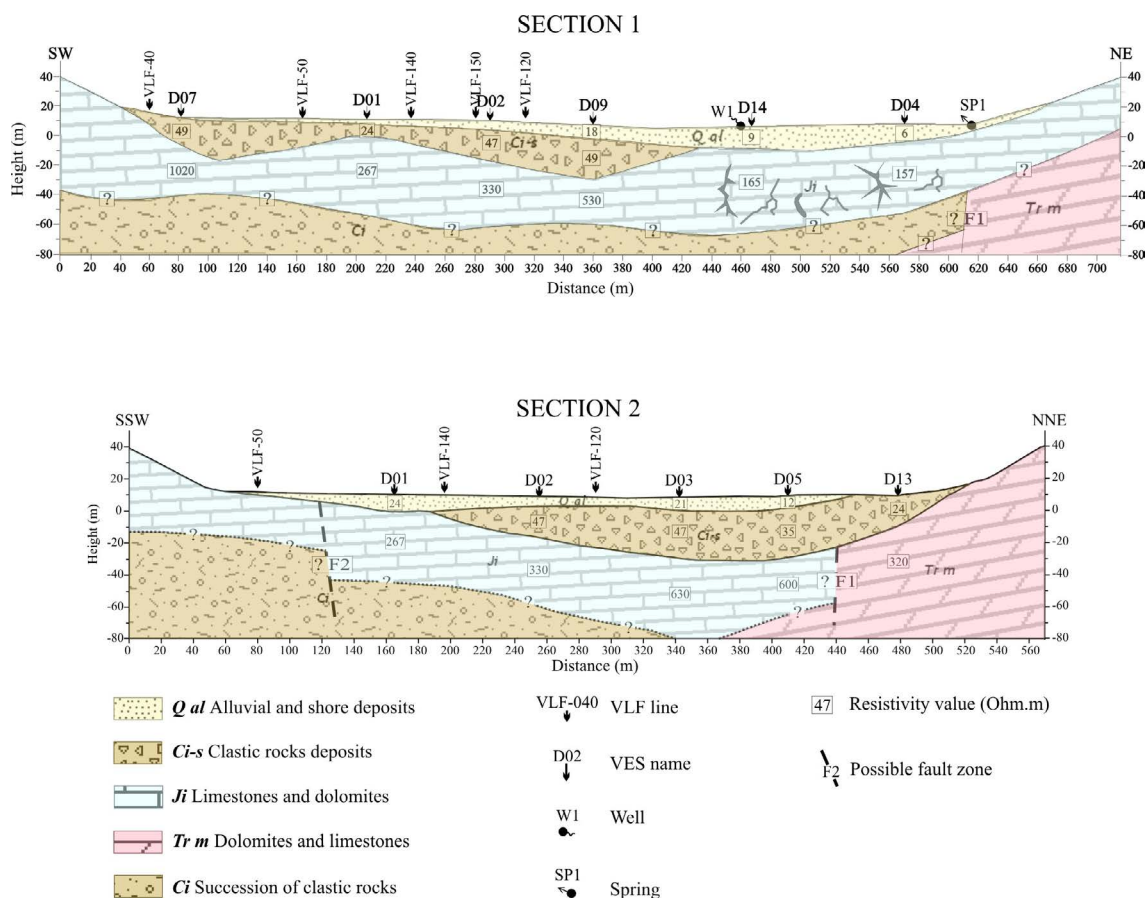


Fig. 6. Integrated geological and geophysical data. /
Рис. 6. Интегрированные геолого-геофизические данные.

for seawater intrusion inland. It is thought that the presence of the impermeable clastic deposits and clastic rocks create a confined aquifer of fresh water affected by saline water especially during summer time when the fresh water discharge is low. This mechanism can explain the presence of brackish waters at positive elevations during summer time.

6. Conclusions

The target of drilling new exploitation wells in the broader area of Delfini at NE side of Chios island was fulfilled, by exploring through geophysical methods the hydrogeological regime and detecting sites of fresh water potential. By combining VLF and geoelectrical results along with geological data it was possible to determine the mechanism and lateral feeding of the springs SP1, SP2 and SP3 which provide huge discharges during winter and spring times. The confined aquifer composed mainly of limestones is overlain by impermeable clastic deposits (Ci-s) which although cover a large part of Delfini plain, allow the fresh water and/or seawater to rise above sea level beyond geoelectrical sounding D14. This is possible since the permeable alluvial deposits lie directly on the limestone basement (fig. 6). The lateral fresh water feeding comes from fault F2 that is extended further to NE in the Delfini plain. Fault F1 might discharge some quantities of fresh water at springs SP1 and SP2 but probably works as a canal for seawater intrusion inland.

References

1. Albouy Y., Andrieux P., Rakotondrasoa G., Ritz M., Descloitres M., Join J.L., Rasolomanana E. Mapping Coastal Aquifers by Joint Inversion of DC and TEM Soundings – Three Case Histories. *Groundwater*. 2001. 39 (1). Pp. 87-97. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2001.tb00354.x>
2. Alexopoulos, J. D., Dilalos, S. Geophysical research for geological structure determination in the region of South Mesogheia (Attica). *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2010. 43 (4). pp. 1898-1906. <http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.11381>
3. Alexopoulos J.D., Dilalos S., Vassilakis E. Adumbration of Amvrakia's spring water pathways, based on detailed geophysical data (Kastraki – Meteora). In: Lambrakis N., Stournaras G., Katsanou K. (eds.), *Advances in the Research of Aquatic Environment*. Environmental Earth Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. 2. pp. 105-112. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24076-8_13
4. Alexopoulos J., Vassilakis Em., Dilalos S. Combined geophysical investigations for detailed groundwater flow modeling in tectonically deformed fractured rocks. *Annals of Geophysics*. 2013. 56 (6), S0669. 7 p. <https://doi.org/10.4401/ag-6236>
5. Alexopoulos J.D., Dilalos S., Mitsika G.S., Poulos S.E. Mapping of deltaic aquifers with the combined application of DC and TEM soundings. In: *Near Surface Geoscience 2019, 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2019. We_25_P13. 5 p. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902468>
6. Alexopoulos J.D., Vassilakis Emm., Dilalos S., Papadopoulos T.D. Contribution of geophysical approach for the definition of subsurface flow paths at coastal wetlands. *Proceedings of the 8th International Hydrogeological Congress of Greece & 3rd MEM Workshop on fissured rocks Hydrology*. 2008. 2. pp. 421-430.
7. Alexopoulos J.D., Tomara V., Vassilakis EM., Papadopoulos T.D., Dassenakis M., Poulos S., Voulgaris N., Dilalos S., Ghionis G., Goumas G., Pirlis E. A contribution to environmental Research of The Korissia Coastal Wetland (Corfu Isl., Greece), With the Application of Combined Geological and Geophysical Methods Supported by Geographic Information Systems. *Bulletin of Geological Society of Greece*. 2007. 40 (4). pp. 1892-1903. <http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.17187>
8. Banks D., Rohr-Torp E., Skarphagen H. Groundwater resources in hard rock. Experiences from the Hvaler study, Southeastern Norway. *Hydrogeology Journal*. 1994. Vol.2, Issue 2. pp. 33-42.

9. Banos Ch., Parasxoudis V., Pippidis M. Reformation of the water balance of Chios Island – An integrated water resources management. Proceedings of 3rd. Hydrogeological Congress, Herakleion, Crete. 1995. pp. 428-442.
10. Bernard G., Valla P. Groundwater exploration in fissured media with electrical and VLF methods. *Geoexploration*. 1991. 27. Pp. 81-91.
11. Besenecker H., Durr S., Herget G., Jacobshagen V., Kauffman G., Ludtke G., Roth W., Tietze K. V. *Geologie von Chios (Agais)*. *Geol. Palaeontol.* 1968. 2. pp. 121-150.
12. Benson A.K., Payne K.L., Stubben M.A. Mapping ground-water contamination using dc resistivity and geophysical method – a case study. *Geophysics*. 1977. 62 (1). pp. 80-86. <https://doi.org/10.1190/1.1444148>
13. Covell C.L., Kaymen D.T., Phillips I.M., Harrison J.C. VLF Geophysics: A case study in locating bedrock wells in water-bearing fracture zones for use in contaminant migration interception. *Proc. SAGEEP 1996 Annual Conf.* 1996. pp. 61-79.
14. Dilalos, S. Exploration of hydrogeological and environmental conditions with geophysical techniques, at selected sites in Chios island (Greece) M. Sc Thesis. National and Kapodistrian University of Athens, Faculty of Geology and Geoenvironment. Athens. 2009.
15. Gustafson P., Krasny J., Crystalline rock aquifers: Their occurrence, use and importance. *Hydrogeology Journal*. 1994. Vol. 2. Issue 2. pp. 64-75.
16. Hayles J.G., Sinha A.K. A portable local loop VLF transmitter for geological fracture mapping. *Geophysical Prospecting*. 1986. 34. pp. 873-896.
17. Karous M., Hjelt S.E. Linear filtering of VLF dip-angle measurements, *Geophysical Prospecting*. 1983. 31. pp. 782-794. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01085.x>
18. Kauffmann G. *Die Geologie von Nordost-Chios (Agais)*. PhD Thesis, Universitaet Marburg, Germany. 1969.
19. Monteiro Santos F. A., Mateus A., Figueiras J., Concalves M.A. Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method – A case study. *Journal of Applied Geophysics*. 2006. 60. pp. 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.01.002>
20. Ogilvy R.D., Lee A.C. Interpretation of VLF-EM in-phase data using current density pseudosections. *Geophysical Prospecting*. 1991. 39. pp. 567-580. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1991.tb00328.x>
21. Papadopoulos T.D., Alexopoulos J. Combined geophysical methods for cavity detection in highly inhomogeneous material over karstic basement. A case history. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society, Budapest, Hungary, VoP6. 1999. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201406523>
22. Paraskevopoulos P., Papadopoulos T.D. VLF measurements for delineating conductive zones in hard rock environment. 1st Workshop on Hardrock Hydrogeology of the Middle East Mediterranean (MEM), Tinos Island, Greece. 2002. pp. 51-57.
23. Sharma S.P., Baranwal V.C. Delineation of groundwater-bearing fracture zones in a hard rock area integrating very low frequency electromagnetic and resistivity data. *Journal of Applied Geophysics*. 2005. 57. pp. 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.10.003>
24. Sree Devi P.D., Srinivasulus S., Kesava K. Raju. Delineation of groundwater potential zones and electrical resistivity studies for groundwater exploration. *Environmental Geology*. 2001. Vol. 40. Issue 10. pp. 1252-1264.
25. Stournaras G., Papadopoulos T.D., Panagopoulos A. Reconnaissances geologiques et geophysiques du site du barrage de Kalamoti (Chios, Grece). *Bull. of the Inter. Assoc. of Engin. Geol.* 1993. No. 47. pp. 151-158. <https://doi.org/10.1007/BF02639604>
26. Walen P.A. Ramag 2, VLF survey planning and interpretation software. 2003.
27. Yang C.H., Tong L.T., Huang C.F. Combined application of dc and TEM to sea-water intrusion mapping. *Geophysics*. 1999. 64 (2). pp. 417-425. <https://doi.org/10.1190/1.1444546>
28. Zohdy A.A. R. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner soundings curves. *Geophysics*. 1989. 54 (2). pp. 245-253. <https://doi.org/10.1190/1.1442648>

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 549.283:549.27 (470.6)

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59067](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59067)

Оригинальная статья

Генезис и рудоносные структуры Чучкурского месторождения благородных металлов Северного Кавказа

И. А. Богуш¹, Г. В. Рябов¹, В. И. Черкашин²

¹Южно-Российский государственный политехнический университет, ул. Просвещения,
132, г. Новочеркасск 346428, Российская Федерация, e-mail: i_bogush@mail.ru

²Институт геологии Дагестанского Федерального исследовательского центра
Российской академии наук, ул. Ярагского, 75, г. Махачкала 367030, Российская
Федерация, e-mail: dangeo@mail.ru

Статья поступила: 18.02.2020, после рецензирования: 12.03.2020, принята к публикации: 27.03.2020

Резюме: Актуальность работы. Крупнейшее на Кавказе Чучкурское месторождение Северного Приэльбрусья разведывалось первоначально как золоторудный объект. Дополнительное опробование в рудной зоне показало постоянное наличие металлов платиновой группы, соизмеримое с его золотоносностью, что позволило рассматривать его как комплексное (Au, Pt, Pd) благороднометалльное. **Цель работы** – выделение рудоносных структур и установление генезиса Чучкурского золоторудного месторождения. **Методы исследования:** составление карты рудной нагрузки Северного Приэльбрусья масштаба 1:25000, геологическая съемка месторождения масштаба 1:5000, геохимическая съемка и изучение рудного тела в масштабе 1:2000. Рудное тело изучалось минералогическим картированием, минераграфическими и петрографическими методами. **Результаты работы.** Благоприятный высокогорный рельеф позволил рассмотреть полный разрез рудогенной структуры и оценить генетические особенности месторождения. Метасоматические рудные тела березит-пропилитов локализуются в вулканогенно-осадочной толще туфов и туффитов киньирчадской свиты (P₁кп) корневой зоны пермского вулкана. Флюидоактивные рудогенные каналы прорывают рудоносную туфовую толщу нижней перми и нижележащие дислоцированные черные сланцы. В подстилающей черносланцевой толще девона (D₂ar) развиты жильные секущие тела метасоматитов и березитов по субвулканическим гранодиоритам. Полагается активизация и вынос благородных металлов из девонских черных сланцев с отложением их в пермских туффитах. Непосредственная связь рудного метасоматоза с пермским андезито-дацитовым вулканом позволяет определить рудогенез как масштабную пропилитизацию кислых пород с рудными метасоматитами и двумя фациями березитизации (березиты и березит-пропилиты). **Вывод.** Функционально рудоносные черные сланцы девона Чучкурского месторождения отчетливо проявляются двояко: с одной стороны являются рудоносными терригенными концентраторами благородных металлов (Au, Pt, Pd) с площадными субпромышленными аномалиями этих металлов; с другой стороны – рудобразующими, выполняя донорские функции и являясь источником золота и платиноидов в Чучкурском месторождении. Рудные концентрации металлов Чучкурского месторождения обусловлены гидротермальной флюидоактивной зоной пермского палеовулкана с мобилизацией металлов из рудоносной девонской черносланцевой толщи, благородные металлы черных сланцев девонской толщи в местах наложения магматических тел и флюидоактивной деятельности мобилизуются и перерабатываются с образованием промышленных рудных скоплений.

Ключевые слова: Северный Кавказ, Чучкурское месторождение, благородные металлы, генезис, рудогенные структуры, черные сланцы.

Для цитирования: Богуш И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И. Генезис и рудоносные структуры Чучкурского месторождения благородных металлов Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (1): 81-95. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59067.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGY

VДК 549.283:549.27 (470.6)

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59067](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59067)

Original paper

Genesis and ore-bearing structures of the Chuchukur noble metals deposit of the North Caucasus

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

¹The M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University, 132 Prosveshcheniya Str.,
Novocherkassk, Russian Federation, e-mail: i_bogush@mail.ru.

²Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, 75
Yaragского Str., Makhachkala, Russian Federation, e-mail: dangeo@mail.ru

Received: 18.02.2020, revised: 12.03.2020, accepted: 27.03.2020

Abstract: Relevance. The Largest Chuchkur deposit in the Caucasus in the Northern Elbrus region was originally explored as a gold ore object. Additional sampling in the ore zone showed the constant presence of platinum group metals commensurate with its gold content, which allowed us to consider it as a complex (Au, Pt, Pd) noble metal. **The purpose of this work:** is to identify ore-bearing structures and establish the Genesis of the Chuchkur gold ore deposit. **Research methods:** mapping the ore load of the Northern Elbrus region at a scale of 1:25000, geological survey of the site at a scale of 1: 5000, geochemical survey and study of the ore body at a scale of 1: 2000. The ore body was studied by mineralogical mapping, mineralogical and petrographic methods. **Result of work.** Favorable high-altitude terrain allowed us to consider the full section of the ore structure and evaluate the genetic features of the Deposit. Metasomatic ore bodies of beresite-propylites are localized in the volcanogenic-sedimentary strata of tuffs and tuffites of the Kinyrchad suite (P₁kn) of the root zone of the Permian volcano. Fluid-active ore channels break through the ore-bearing tuff strata of the lower Permian and the underlying dislocated black shales. In the underlying Devonian (D₂ar) black-shale strata vein-sectioning bodies of metasomatites and beresites are developed along subvolcanic granodiorites. Activation and removal of precious metals from Devonian black shales with their deposition in Permian tuffites is assumed. The direct connection of ore metasomatism with the Permian andesite-dacite volcano allows us to define ore genesis as large-scale propylitization of acidic rocks with ore metasomatites and two facies of beresitization (beresites and beresit-propylites). **Conclusion:** Functionally ore-bearing black shales of the Devonian of the Chuchkur deposit are clearly manifested in two ways: on the one hand, they are ore-bearing terrigenous concentrators of noble metals (Au, Pt, Pd) with areal sub-industrial anomalies of these metals; on the other hand, they are ore-forming, performing donor functions and being a source of gold and platinoids in the Chuchkur deposit. Ore concentrations of metals in the Chuchkur deposit are formed by the hydrothermal fluid active zone of the Permian paleovolcano with the mobilization of metals from the ore-bearing Devonian black shale stratum. The noble metals of the black shales of the Devonian are mobilized and redeposited stratum in superposition areas of magmatic bodies and fluid-active deposits with the formation of industrial ore bodies.

Key words: North Caucasus, Chuchukur deposits, nobles metals, genesis, ore-bearing structures, black shale.

For citation: Bogush I. A., Ryabov G. V., Cherkashin V. I. Genesis and ore-bearing structures of the Chuchukur noble metals deposit of the North Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (1): 81-95. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59067.

Введение

В пределах 370 км-й полосы пермских отложений металлогенической зоны Передового хребта Кавказа оруденение представлено медными и золоторудны-

ми проявлениями и месторождениями [Богуш, 1995; Богуш, Сендецкий, 1997]. Единственным на Кавказе месторождением коренного золота с утвержденными запасами является Чучкурское золоторудное месторождение в Северном Приэльбрусье. Благородные металлы месторождения генетически связаны с флюидоактивной зоной нижнепермской вулканической постройки (вулкан Чуммурлы) в зоне Передового хребта [Богуш, 1995; Богуш, Сендецкий, 1997, Черницин В.Б., Прокуронов, 1977]. Золотосульфидный тип оруденения представляет практический и значительный теоретический интерес, поскольку при значительной протяженности полоса пермских вулканитов и основание вулканов изучено крайне слабо. Орографические особенности высокогорного рельефа Передового хребта дают возможность детально изучить полный разрез рудной структуры и генетические особенности крупного месторождения благородных металлов.

Методика исследований

Рудное поле и Чучкурское месторождение исследовались авторами в течении ряда лет. Начальный этап связан с геологической съемкой масштаба 1:5000 и составлением карты рудной нагрузки участка Передового хребта. В процессе разведки Чучкурского месторождения проводились геохимическая съемка и изучение рудного поля в масштабе 1:2000. Рудное тело изучалось минералогическим картированием, минераграфическими и петрографическими методами.

Геологическое строение Чучкурского месторождения. Чучкурское месторождение благородных металлов по простиранию вскрыто субширотным ущельем реки Чучкур, левого притока реки Худес бассейна реки Кубани. В левом (южном) борту ущелья вскрыта рудная зона Чучкурского месторождения, полого погружающаяся в западном направлении. В правом (северном) борту ущелья наблюдается полный разрез пермского вулкана и его цоколя, представленного девонской черносланцевой толщей. Нижнепермская рудообразующая вулканическая постройка представляет собой поверхностный стратовулкан, входящий в региональную общекавказскую полосу. Основание вулканической постройки с резким угловым несогласием субгоризонтально перекрывает дислоцированную толщу девонских углеродсодержащих черных сланцев.

Рудное тело месторождения залегает в андезито-дацитовая вулканогенно-осадочной туфовой толще (P_1 kn) и тяготеет преимущественно к туфитовой составляющей этой толщи [Богуш, 1995; Сендецкий, 1998; Черницин, 1977]. Рудоносная толща по всему разрезу сопровождается вертикальными магмо- и рудовыводящими разломами корневой зоны палеовулкана. Секущие рудоносные разломы по вертикали содержат благороднометальное оруденение как в пермских породах, так и в черных сланцах цокольной тощи. Верхняя лавовая толща вулкана андезито -дацитов не содержит оруденения (рис.1). Метасоматическое оруденение благородных металлов Чучкурского месторождения сопровождается сульфидизацией (пиритизация) и переработкой вмещающих пород в кварц-серицитовые метасоматиты с хлоритом и карбонатом. Золото визуально и микроскопически не фиксируется, но хорошо обогатимо.

Общее пологое залегание вулкана в зоне Передового хребта сопровождается его погружением в западном направлении под осадочную толщу нижней юры и размывом с обнажением полного разреза в воздымающейся восточной части. Центральная часть вулкана по простиранию вскрыта рекой Чучкур с выходом руд-

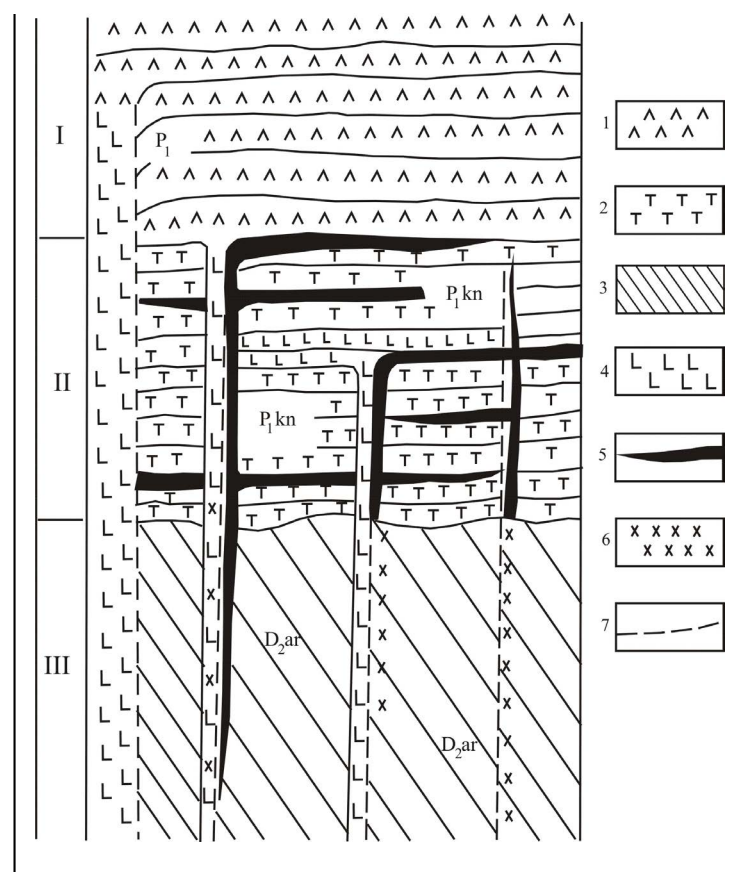


Рис. 1. Разрез и рудоносность нижнепермской вулканической постройки Чучкурского месторождения.

Условные обозначения: I – лавовая андезито-дацитовая толща; II – вулканогенно-осадочная туфовая рудоносная толща киньрчадской свиты; III – цокольная черносланцевая толща девона артыкчатской свиты.

1-андезито-дацитовые лавы; 2-туфы и туффиты; 3-черные сланцы; 4-гранодиориты; 5-руды, метасоматиты, березит-пропилиты; 6-березиты; 7- рудоносные разломы.

Fig. 1. Section and ore content of the Lower Perm volcanic structure of the Chuchkurskoye field.

Legend: I – lava andesite-dacite sequence; II – volcanic-sedimentary tuff ore-bearing stratum of the Kinyrchad Formation; III – basement black shale stratum of the Devonian Artykchat Formation.

1-andesite-dacite lavas; 2-tuffs and tuffites; 3-black slates; 4-granodiorites; 5-ores, metasomatites, birch-propylites; 6-beresites; 7- ore-bearing faults.

ной зоны в северном и южном бортах ущелья этой реки. Северный фланг вулканической полосы ограничен глубинными разломами Тырнауз-Пшекишской шовной зоны, южный и восточный фланги перекрываются Тоханским надвигом.

В рудном поле Чучкурского месторождения, благодаря расчлененности горного рельефа, удастся проследить в рудообразующем разрезе следующие вертикальные составляющие (снизу- вверх): 1) рудоносные и рудоподводящие тектонические структуры в региональной полосе подстилающих девонских черных сланцев; 2) рудоносную вулканогенно-осадочную толщу основания пермского палеовулкана; 3) лавовую безрудную толщу верхней половины вулканической постройки (рис.1).

В разрезе рудогенерирующего вулкана Чуммурлы четко выделяются две толщи киньрчадской свиты (P_1 kn): 1- нижняя продуктивная вулканогенно-осадочная; 2 – верхняя безрудная лавовая. Вулканиды лавовой толщи сложены дацитами, ри-

одацитами до риолитов, трахидацитами натровой серии, высокоглиноземистыми с содержанием щелочей от 4,9 до 8,9% [Сендецкий, 1998].

Вулканогенно-осадочная толща перми и более древние черные сланцы пронизаны секущими субвертикальными жильными магматическими телами (дайки и неки), с наложенными рудоносными гидротермально-метасоматическими структурами. Расчлененный высокогорный рельеф, вскрывший западный фланг и центральную часть месторождения, однозначно демонстрирует тектонический контроль и связь оруденения с флюидоактивной корневой зоной пермского палеовулкана. При этом хорошо доступны к изучению структура и генетические особенности месторождения в полном объеме его разреза, включая рудное тело и рудоподводящие каналы.

Первоначальная разведка Чучкурского месторождения определила только промышленные содержания золота, что позволило отнести его к золотосульфидным месторождениям [Богущ, 1995]. Наложенный на кислые породы метасоматоз, связанный с пермским вулканизмом, определил генетические типы оруденения как березиты и березит-пропилиты [Богущ, 1995]. Дополнительное опробование золотоносных руд, проведенное авторами, позволило значительно увеличить промышленную ценность руд и отнести месторождение к комплексным благороднометальным [Богущ, Черкашин, 2019]. По результатам опробования в рудах месторождения, кроме золота, установлены палладий и платина (таблица 1).

При разведке платина и палладий в рудах и породах Чучкурского месторождения золота не определялись и, соответственно, не учитывались при подсчете запасов. Исходя из полученных нами новых данных, золоторудное Чучкурское месторождение следует относить к золото-платино-палладиевым месторождениям. Причем, обращает на себя внимание четко выраженный палладиевый по отношению к платине приоритет золотых руд.

Цокольный этаж палеовулкана, как уже указывалось, сложен углеродсодержащими черносланцевыми толщами, которые на Северном Кавказе повсеместно обогащены благородными металлами (Au, Pt, Pd) [Парада, 2009, Богущ, Черкашин, 2019]. В девонских цокольных черных сланцах Чучкурского рудного поля это полностью сохраняется (таблица 2).

Генетические особенности и источники благородных металлов. Вулканические метасоматические процессы пропилитизации затрагивают по вертикали вулканогенно-осадочные породы и выполняют трещинные каналы, осуществляя главный рудогенный процесс в породах подошвы и цоколя вулкана. Единый гидротермально-метасоматический процесс в разрезе пермского вулкана распадается на три части: 1) рудоносные вулканогенно-осадочные туфы андезито-дацитов (березит-пропилиты); 2) золотосодержащие березиты в дайках кислых пород (гранодиориты); 3) рудоносные, пиритизированные кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты, приуроченные к субвертикальным тектоническим зонам, секущим черносланцевую и туфогенную толщи пород цоколя и основания вулкана (рис. 1,2,3,4). Единство разнофациальных метасоматических процессов рудогенеза объединено в рудоносных структурах основания вулкана (рис. 2,3,4). В пределах единой тектонической структуры развиты тела березитизированных субвулканических гранодиоритов, рудоносные метасоматиты и оруденелые туффиты. Рудное поле Чучкурского месторождения располагается в пределах Северного разлома глубинной Тырныауз-Пшекишской шовной зоны [Баранов, Греков, 1982; Богущ, 1995;

Таблица 1/Table 1

**Содержания благородных металлов в рудной зоне Чучкурского
месторождения***

Noble metal content in the ore zone of the Chuchkursky deposit *

№ п/п	Номера образца/ Specimen number	Порода/ Formation	Au, г/т /Au, g/t	Pd, г/т /Pd, g/t	Pt, г/т /Pt, g/t
1	Ч-2001-10/1 Ch-2001-10 /1	Гранодиорит (березит)/ Granodiorite (birch)	0,74	0,92	0,25
2	Ч-2001-11/1 Ch-2001-11 / 1	Гранодиорит (березит)/ Granodiorite (birch)	2,6	1,75	0,92
3	Ч-21/1 Ch-21/1	Черный сланец/ Black slate	0,85	0,91	0,45
4	Ч-X01-21/1 Ch-X01-21/1	Метасоматит кварцевый/ Quartz metasomatite	1,30	1,15	0,65
5	Ч-XX01-201/1 Ch-XX01-201/1	Песчаник/ Sandstone	1,49	1,12	0,35
6	Ч-XX01-201/2 Ch-XX01-201/2	Песчаник/ Sandstone	1,50	1,30	0,65
7	Ч-73/94 Ch-73/94	Туфолава/ Welded tuff	1,10	1,20	0,50
8	Ч-74/94 Ch-74/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	1,38	0,92	0,61
9	Ч-75/94 Ch-75/94	Туф/ Tuff	0,64	0,80	0,32
10	Ч-76/94 Ch-76/94	Андезито-дацит/ Andesite-dacite	0,64	0,80	0,32
11	Ч-101/94 Ch-101/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	1,0	0,92	0,52
12	Ч-115/94 Ch-115/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	1,34	1,22	0,38
13	Ч-69/94 Ch-69/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	1,65	1,20	0,38
14	Ч-77/94 Ch-77/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	0,72	0,90	0,22
15	Ч-83/94 Ch-83/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	1,34	1,41	0,60
16	Ч-116/94 Ch-116/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	2,1	1,32	0,64
17	Ч-120/94 Ch-120/94	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	1,72	1,20	0,51
18	Ч-21/13 Ch-21/13	Черный сланец/ Black slate	1,54	1,15	0,32
19	Ч-21/21 Ch-21/21	Метасоматит/ Metasomatite	1,40	1,12	0,54
20	Ч-69/91 Ch-69/91	Андезито-дацитовый туф/ Andesite-dacite tuff	1,57	1,22	0,44
21	Ч-16/2 Ch-16/2	Гранодиорит (березит)/ Granodiorite (birch)	1,0	0,84	0,42

*Анализы выполнены атомно-абсорбционным методом лабораторией физико-химических исследований Института геологии Дагестанского Федерального научного центра РАН.

Таблица 2/ Table 2

**Содержания благородных металлов в черных сланцах
Чучкурского рудного поля***

Noble metal content in the black shales of the Chuchkur ore field *

№ п/п	№ образца /Specimen number,	Порода /Formation	Au, г/т /Au, g/t	Pt, г/т /Pt, g/t	Pd, г/т /Pd, g/t
1	Ч-1/231 Ch-1/231	Сланец (филлит) /Slate (phyllite)	0,85	0,90	0,45
2	Ч-17/94 Ch-17/94	Сланец (филлит) /Slate (phyllite)	0,24	0,20	0,23
3	Ч-23/94 Ch-23/94	Гравелит /Gravelite	0,25	0,24	0,24
4	Ч-26/94 Ch-26/94	Сланец (с кальцитом) /Slate (with calcite)	0,22	0,22	0,25
5	Ч-32/94 Ch-32/9	Сланец (филлит) /Slate (phyllite)	0,31	0,25	0,27
6	Ч-37/94 Ch-37/94	Сланец (филлит) /Slate (phyllite)	0,24	0,21	0,23
7	Ч-38/94 Ch-8/94	Песчаник /Sandstone	0,25	0,21	0,24
8	Ч-39/94 Ch-39/94	Сланец (с кварцем) /Slate (with quartz)	0,0,24	0,20	0,23
9	Ч-40/94 Ch-40/94	Сланец (с кварцем) /Slate (with quartz)	0,19	0,17	0,20
10	Ч-73/94 Ch-73/94	Сланец (филлит) /Slate (phyllite)	0,24	0,19	0,24

*Анализы выполнены атомно-абсорбционным методом лабораторией физико-химических исследований Института геологии Дагестанского Федерального научного центра РАН.

Богуш, Сендецкий, 1997; Омельченко, 2019]. Зона Тырныауз-Пшекишских разломов по данным Черницина, Прокуронова, 1977, [Crauch et al., 1991] ограничивает распространенность золота на Северном Кавказе.

Рудные березит-пропилиты. Они сосредоточены в туфогенной нижней части кынычадской свиты (P_1 kn) основания пермской вулканической постройки и перекрываются верхней лавовой монолитной толщей верхней части вулкана. Положение рудных березитов контролируется системой субвертикальных Чучкурских разломов с простиранием 295° – 310° . Морфология тел березит-пропилитов достаточно сложная, коробчатая. Промышленное оруденение благородных металлов березит-пропилитов локализуется в секущих разломах и на разных стратиграфических уровнях в разрезе туфогенной корневой толщи палеовулкана (рис.1). Стратифицированные рудные тела березит-пропилитов, в сочетании с рудоносными субвертикальными разломами, приурочены к пачкам вулканогенно-осадочных туффитов с гравелитовой составляющей андезито-дацитов. В туфогенной толще рудный метасоматоз затрагивает в первую очередь вулканогенно-осадочные туффиты. Пелитоморфный материал туффитов полностью переработан гидротермальными процессами и превращен в пиритизированный и карбонатизированный кварц-серицитовый, серицитолитовый и кварц-хлорит-серицитовый метасоматит.

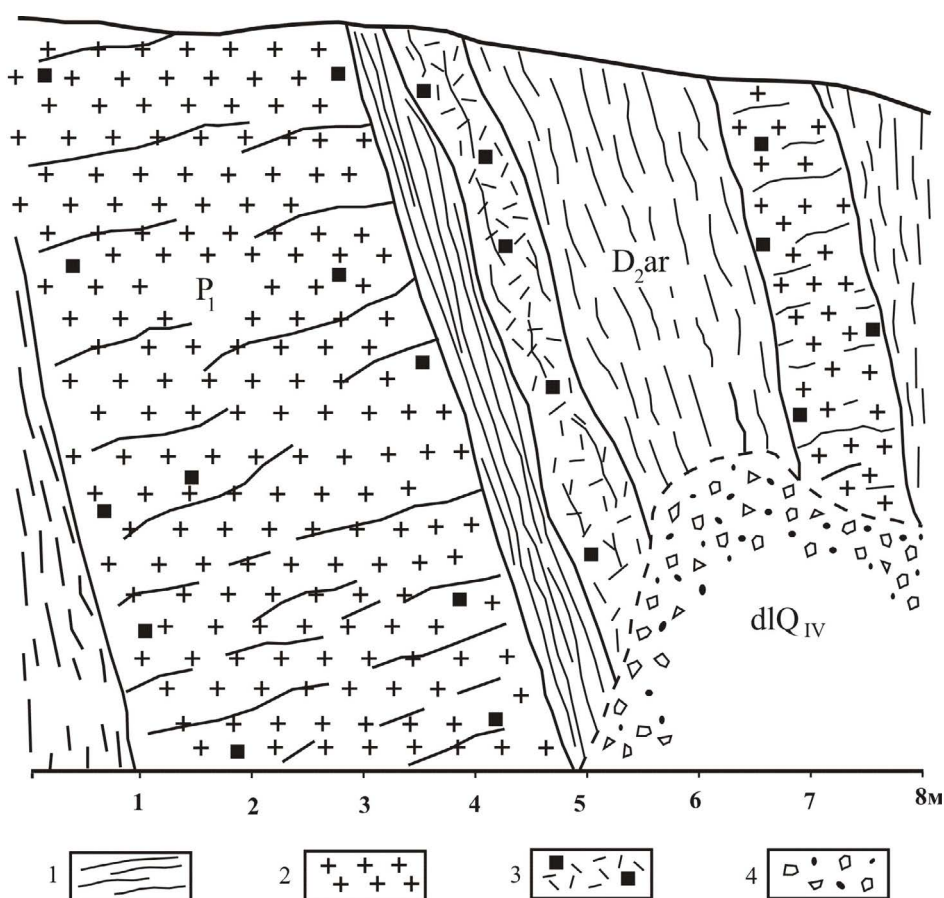


Рис. 2. Березиты и рудные метасоматиты в тектонической зоне черных сланцев артыкчатской свиты перми (P_{1ar}).

Условные обозначения: 1 – филлиты; 2 – березитизированные гранодиориты; 3 – рудные метасоматиты.

Fig. 2. Berezites and ore metasomatites in the tectonic zone of the black schists of the Artykk Formation Permian (P_{1ar}).

Legend: 1 – phyllite; 2 – berezitized granodiorites; 3 – ore metasomatites.

Рудные березит-пропилиты разнообразны в составе рудной минеральной составляющей: пирит (5-17%), магнетит (0,5-7,0%), титаномagnetит (до 3-4%), леллингит (0,2-2,0%), арсенопирит (редок, до 1,0-1,5%), золото, серебро, блеклые руды, сфалерит, халькопирит, галенит, мушкетовит, гематит (редки). Рудным минералам корреспондируют высокие содержания следующих элементов: мышьяка (кларк концентрации $KK=1055$), висмута ($KK=100$), сурьмы ($KK=85$), молибдена ($KK=28$), вольфрама ($KK=28$), серебра ($KK=13$), иттербия ($KK=11$).

Золото – тонкодисперсное, рассеянное, повсеместно количественно положительно коррелируется со степенью гидротермальной проработки и сульфидизации березитов и большей частью локализуется в пирите. Для пиритов Чучкурской рудной зоны свойственно постоянное и относительно высокое содержание золота – 0,02-70 г/т. Максимальное содержание золота в рудах Чучкурского месторождения по данным бороздового опробования достигает 20 г/т.

Кластогенные составляющие туффигов (андезито-дациты, кварц), заключенные в пелитоморфном базисном цементе, в незначительной степени изменены руд-

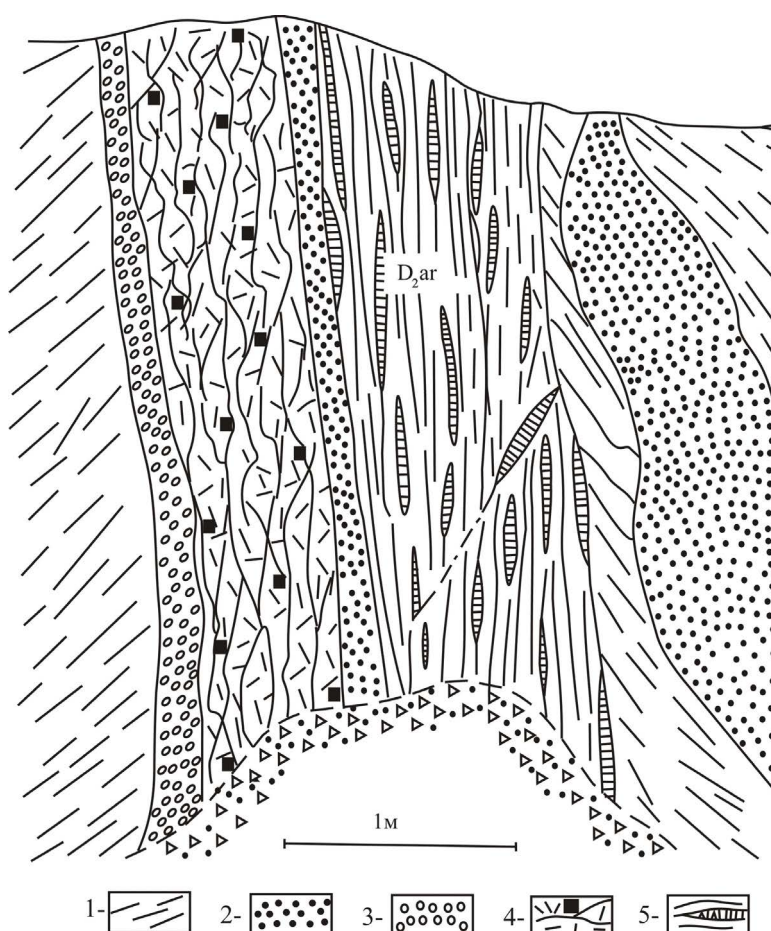


Рис. 3. Рудоносная тектоническая структура в черных сланцах девона, в цоколе пермского палеовулкана Чуммурлы.

Условные обозначения: 1– филлиты; 2 – метапесчаники; 3 – метасоматиты (пропилиты) по сланцам; 4 – линзовидные жилы карбоната в разлистованных филлитах.

Fig. 3. Ore-bearing tectonic structure in the black shales of the Devonian, in the basement of the Permian paleovolcano Chummurly.

Symbols: 1– phyllites; 2 – meta sandstones; 3 – metasomatites (propylites) along schists; 4 – lenticular carbonate veins in stratified phyllites.

ным метасоматозом. Пирокластический андезито-дацитовый материал туффитов при метасоматозе сохраняет свои текстурные и структурные особенности.

Золотосодержащие березиты. Наложенная гидротермальная проработка (березитизация) затрагивает как жильные вулканиты (андезито-дациты) основания вулканогенной перми, так и нижележащие жильные гранодиориты черносланцевой толщи [Богущ, 1995]. Отдельные дайки гранодиоритов березитизированы по всему телу. В большинстве случаев березитизация развита в эндоконтактах внутри даек. Контакты тел березитов постепенные, нечеткие, но хорошо фиксируемые визуально по характерному гидротермальному изменению и сульфидизации. Классические березиты [Богущ, 1995] приурочены к жильным магматическим телам субвулканических гранодиоритов. Начальная стадия березитизации затрагивает эндоконтактные контакты даек и проявляется в локальной серицитизации, хлоритизации и пиритизации гранодиоритов. Местами локальная березитизация следует по контракционным и тектоническим трещинам в дайках гранодиоритов. Крайней сте-

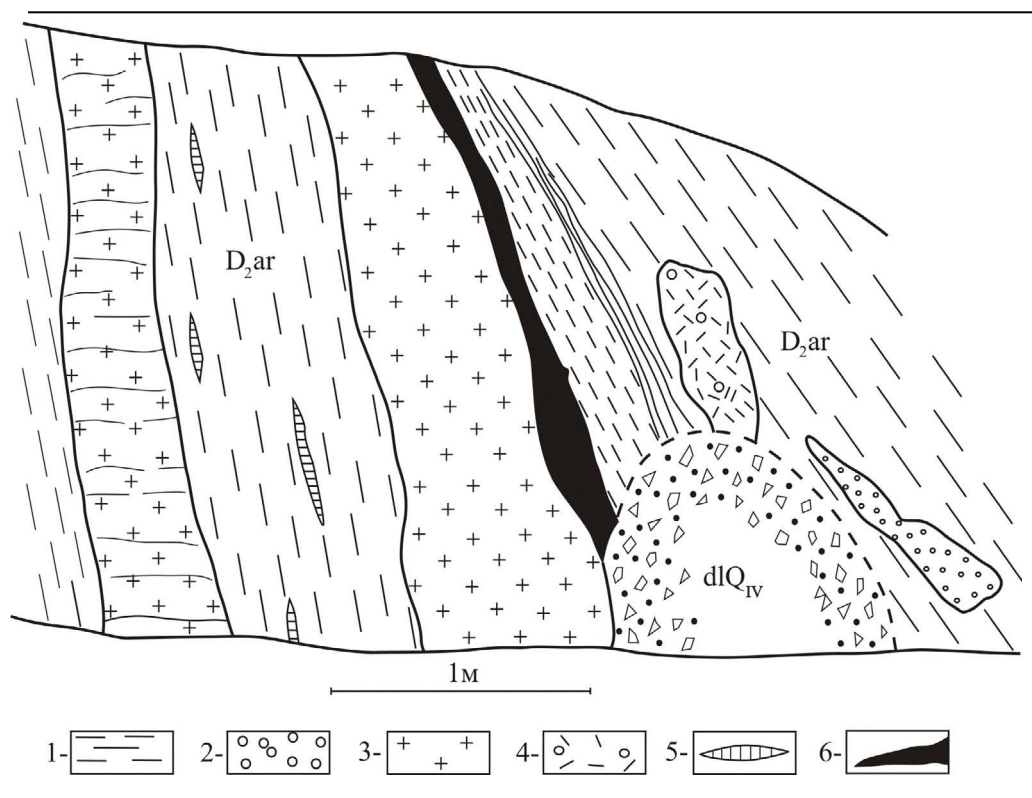


Рис. 4. Рудоносная зона в сланцах девона (D_{2ar}) цоколя пермского вулкана Чуммурлы.
 Условные обозначения: 1 – филлиты; 2 – гранодиориты; 3 – березитизированные гранодиориты;
 4 – анхикварцевые березиты; 5 – конгломераты; 6 – рудные метасоматиты.
 Fig. 4. Ore zone in the Devonian schists (D_{2ar}) of the basement of the Perm volcano Chummurly.
 Legend: 1 – phyllites; 2 – granodiorites; 3 – berezitized granodiorites; 4 – Anchiquartz berezites;
 5 – conglomerates; 6 – ore metasomatites.

пенью березитизации гранодиоритов является практически полное замещение их анхикварцевым агрегатом с пиритом и серицитом.

Метасоматиты. Метасоматические рудные процессы пропилитизации сопровождают рудоподводящие каналы. Флюидоносные растворы, выполняя трещины, изменяют практически все породы в тектонических швах (рис. 2,3,4). Рудоносные метасоматиты развиты в туфовой толще перми и в черных сланцах девона, сопровождая субвертикальные разломы флюидоактивной корневой зоны вулкана. В зоне разломов горные породы превращены в анхикварцевые, кварц-серицитовые и серицит-хлоритовые породы с карбонатом, пиритом, арсенопиритом, халькопиритом.

Источники рудных металлов Au, Pd, Pt. Генетические особенности Чучкурского месторождения наглядно проявились в приведенном выше анализе рудных разрезов и наборе известных геологических фактов. Непосредственная связь рудного метасоматоза с пермским андезито-дацитовым вулканом позволяет определить рудогенез как масштабную пропилитизацию кислых пород с рудными метасоматитами и двумя фациями березитизации (березиты и березит-пропилиты). Приведенные геологические данные по месторождению позволяют рассмотреть также проблему источника благородных металлов.

В мировой практике важнейшим геолого-промышленным типом месторождений благородных металлов являются углеродсодержащие черносланцевые толщи,

содержащие такие объекты как Мурунтау, Сухой Лог, Бакырчик, Олимпиаденское и другие месторождения [Гурская, 2000; Додин и др., 2000; Новожилов, Гаврилов, 1999; Сендецкий, 1997; Gurskaya, 1991; Holland, 1979; Сазонов, Коротеев и др. 2011]. Девонский черносланцевый терригенный комплекс Северного Кавказа по своим геологическим характеристикам является полным аналогом мировых продуктивных черных сланцев [Гончаров и др., 2007; Геология СССР, Северный Кавказ, 1968; Гурская, 2000; Додин и др., 2000; Константинов, 1984; Юдович, Кертис, 1988; Gurskaya, 1991]. Такой вывод подтверждается рудоносностью девонской толщи сланцев [Богуш, Черкашин, 2019; Гончаров и др., 2007; Mao and others, 2002]. Палеозойские черные сланцы Северного Кавказа (эйфельский-франкский ярусы) в региональном масштабе вытянуты 200-километровой полосой при мощности от 0,5 до 1500-2000 м.

Девонские сланцы представляют собой образования исходно глинистого состава с незначительным объемом вулканогенных и псефито-псаммитовых пород. При господствующем положении (85-88%) пелитовых пород (филлиты) в составе сланцев девона участвуют также алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты, кремнистые, карбонатные и туфогенные прослои, согласные и секущие тела вулканогенных и жильных магматических пород.

Исходные глинистые породы артыкчатской (D_{2ar}) и андрюкской (D_{2an}) свит Северного Кавказа представлены в ископаемых толщах исключительно филлитами, глинистая составляющая заменена гидрослюдами, а аквагенное углеродистое вещество метаморфизовано до состояния антрацита и антраксолита [Богуш, Черкашин, 2019]. Основной объем формации составляют филлиты, слагающие более 78% ее разреза. Кластические породы – конгломераты, гравелиты, песчаники и алевролиты – составляют до 21%. Петрографические и геохимические исследования черных сланцев [Богуш, Черкашин, 2019; Гончаров и др., 2007] обосновали в филлитах их специфичность в виде высокой магнезиальности (MgO до 8-9% и более). Своеобразие этих отложений заключается в значительном влиянии терригенного ультраосновного материала на их петрохимические особенности. Отложения черносланцевой формации по вещественному составу относятся к весьма редкому типу – офиокластам, образовавшемуся за счет размыва офиолитов. В составе обломочного материала присутствуют преимущественно фтаниты и серпентиниты, а также филлиты, известняки, граувакки, долериты, плагиограниты [Богуш И. А., Сендецкий, 1997; Богуш, Черкашин, 2019; Гончаров и др., 2007; Сендецкий, 1998; Черницин В. Б., Прокуронов, 1977].

В пределах девонской полосы черных сланцев артыкчатской и андрюкской свит нами было отобрано более 200 точечных и бороздовых литохимических проб и проанализировано атомно-абсорбционным методом на группу благородных металлов Au , Pd , Pt . Во всех пробах черных сланцев выявлено аномальное содержание этой триады в сумме около 1 г/т, причем эти металлы присутствуют в равных пропорциях. Благородные металлы содержатся в рассеянном тонкодисперсном состоянии, визуально и даже микроскопически не фиксируются. Редкие находки платины и золота обнаружены нами в черных сланцах Большешлабинского рудного района. В современном аллювии Урупского и Большешлабинского рудных районов в шлиховых пробах золота встречены минеральные формы платины, осмия, иридия и рутения [Богуш, Черкашин, 2019].

По оценке авторов в черных сланцах Северного Кавказа содержатся гигантские запасы благородных металлов Au, Pd, Pt [Богущ, Черкашин, 2019; Hulbert and others, 1992].

Благороднометалльное оруденение в Чучкурском месторождении в одинаковой степени проявилось как в рудном теле, так и в подстилающих черных сланцах девона. Однотипная по составу рудоносность месторождения в более древних черных сланцах свидетельствует о донорской роли сланцев в формировании оруденения месторождения. Глубинные флюиды андезито-дацитовых очагов пермских вулканов активно проявились в черных сланцах цоколя вулкана. Метасоматические растворы пропилитизации, мигрируя через сланцы, активируют и мобилизуют общий сланцевый фон благородных металлов и формируют локальные рудные концентрации в туффитах туфовой толщи нижней перми. Пермские вулканогенно-осадочные породы служат благоприятным геохимическим барьером для рудоносных (Au, Pd, Pt) флюидоактивных продуктов синвулканической пропилитизации. Рудогенные флюиды, поставляемые тектоническими каналами, разгружаются в самих каналах (метасоматиты и березиты) и туфовой толще (березит-пропилиты). Рудная составляющая не проявлена в лавовой верхней толще палеовулкана, что фиксирует возраст оруденения внутри деятельности нижнепермского вулканизма.

Донорская роль черных сланцев девона находит свое подтверждение на примере полосы пермских вулканов по реке Аксаут. Породы кынырчадской свиты и дайки гранодиоритов здесь не содержат благородных металлов. При сохранении аналогии разреза Чучкурскому месторождению, в разрезе пермского палеовулкана Аксаута, в основании вулкана отсутствует рудоносный девонский черносланцевый комплекс, а развиты каменноугольные породы.

Заключение

1. Функционально рудоносные черные сланцы девона Чучкурского месторождения отчетливо проявляются двояко: с одной стороны являются рудоносными терригенными концентраторами благородных металлов (Au, Pt, Pd) с площадными субпромышленными аномалиями этих металлов; с другой стороны – рудобразующими, выполняя донорские функции и являясь источником золота и платиноидов в Чучкурском месторождении.

2. Рудные концентрации металлов Чучкурского месторождения обусловлены гидротермальной флюидоактивной зоной пермского палеовулкана с мобилизацией металлов из рудоносной девонской черносланцевой толщи.

3. Пример Чучкурского месторождения показывает, что благородные металлы черных сланцев девонской толщи в местах наложения магматических тел и флюидоактивной деятельности мобилизуются и переотлагаются с образованием промышленных рудных скоплений.

4. Синвулканический рудный процесс в продуктах вулканизма указывает на его общую принадлежность к процессам пропилитизации. В данном случае пропилитизация вулканитов кислого андезито-дацитового состава уточняет и детализирует термин «пропилиты», как процесс метасоматоза синхронного вулканической деятельности. Пропилитизация субвулканических пород относит их к классическим березитам, а метасоматическая переработка андезито-дацитовых туфов и туффитов формирует рудоносные березит-пропилиты.

5. Черносланцевый рудогенез благородных металлов углеродсодержащих терригенных черносланцевых толщах относится к весьма сложным и длительным процессам, в котором активно участвуют процессы седиментогенеза, диа- и катагенеза, регионального метаморфизма и наложенного метасоматоза [Богуш, Черкашин, 2019; Гончаров и др., 2007; Гурская, 2000; Додин и др., 2000; Константинов, 1984; Сендецкий, 1997; Holland, 1979]. В данном случае рудогенез благородных металлов на Северном Кавказе в черных сланцах ограничен возрастными рамками девон-карбон. Черные сланцы Северного Кавказа в Чучкурском рудном поле уже в нижнепермское время показывают себя как зрелые, метаморфиты с надфоновым содержанием благородных металлов на уровне аномалий для всей полосы герцинских сланцев. Этот факт фиксирует верхнюю возрастную границу оруденения (Au, Pt, Pd) нижней пермью, т.е. отмечает герцинский возраст оруденения. Одновременно подтверждается допермский герцинский возраст рудных процессов регионального метаморфизма главной складчатости палеозойских толщ Северного Кавказа.

Литература

1. Баранов Г. И., Греков И. И. Геодинамическая модель Большого Кавказа // Проблемы геодинамики Кавказа. М.: Наука, 1982. С. 51-59.
2. Богуш И. А. Золотоносные березиты на Северном Кавказе // Доклады АН РФ. 1995. Т. 342, № 2. С. 205-208.
3. Богуш И. А., Сендецкий И. И. Рудная минерализация золотоносных зон пиритизации «неколчеданной» формации Кубань-Малкинского междуречья (С. Кавказ) // Проблемы геологии и геоэкологии Юга России и Кавказа. Материалы междунар. научн. конф. Т.1. Геология, полезные ископаемые. Новочеркасск. 1997. С. 134-139.
4. Богуш И. А., Черкашин В. И. Источники благородных металлов (Au, Pt, Pd) на Северном Кавказе // Литосфера 2019, том 19, № 3. С. 465-471.
5. Гончаров В. И., Богуш И. А., Исаев В. С., Глазырина Н. В., Джангиров М. Ю., Дарчиева А. Е., Васьков И. М. Поисковые критерии и перспективы благородных металлов девонских черносланцевых толщ на Северном Кавказе // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2007. Т. 7. № 3. С. 19-24.
6. Геология СССР. Северный Кавказ. Ч.1. Геологическое описание. М.: Недра. 1968. С. 135-152, 508-510.
7. Гурская Л. И. Платинометалльное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. С. Пб., изд-во ВСЕГЕИ. 2000. 208 с.
8. Додин Д. А., Чернышов Н. М., Яцкевич Б. А. Платинометалльные месторождения России. СПб., изд-во Наука. 2000. 735 с.
9. Константинов М. М. Генетические системы золоторудных месторождений // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. №3. С. 696-699.
10. Новожилов Ю. М., Гаврилов А. М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. И-во ЦНИГРИ. М., 1999. 175 с.
11. Омельченко В. Л. О глубинных разломах на Северном Кавказе // Литосфера. 2019. Т. 1. С. 130-142.
12. Парада С. Г. Предпосылки и признаки платиноносности Северного Кавказа // Состояние минерально-сырьевой базы Юга России и перспективы ее развития. Материалы науч.-техн. конф. Ростов н/Д. 2009. С. 83-87.
13. Сазонов В. Н., Коротеев В. А., Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Великанов А. Я. Золото в «черных сланцах» Урала // Литосфера. 2011 № 4. С. 70-92.
14. Сендецкий И. И. Петрохимические особенности вулканитов кынырчадской свиты Кубань-Малкинского междуречья // Проблемы геологии и экологии Юга России и Кавказа.

Материалы междунар. научн. конф. Т. 1. Геология, полезные ископаемые. Новочеркасск, 1997. С. 108-110.

15. Сендецкий И. И. Золотоносные гидротермалиты нижнепермского тафрогена Кубань-Малкинского междуречья (Северный Кавказ). Автореферат канд. диссер. Новочеркасск, 1998. 25 с.

16. Черницын В. Б., Прокуронов П. В. Металлогеническая специализация Пшекиш-Тырныаузского глубинного разлома (Большой Кавказ) // Геология рудных месторождений. 1977. № 2. С. 115-118.

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

18. Crauch R. J., Coveney R. M., Murowchick J. B. Black shales as hosts for unconventional platinum-group-element resources/ US Geol. Surv., 1991, № 1062, p. 33-34.

19. Gurskaya L. I. Platinum-group element mineralization associated with the black shales a new stratiform type ore for PGE. Abstr. VI International. Platinum symposium. Perth, W. Australia, 1991, p. 23.

20. Holland H. D. 1979. Metals in black shale – a reassessment Economic Geology. v. p. 1676-1680.

21. Hulbert, L. J., Carne, R. C., Gregoire, D. C., and Paktunc, D., 1992, Sedimentary nickel, zinc, and platinum-group-element mineralization in Devonian black shales at the Nick property, Yukon Canada: A new deposit type: Exploration and Mining Geology, v. 1, p. 39-62.

22. Mao J., Leman B., Du A., Zhang G., Ma D., Wang Y., Zeng M., Kerrich R. (2002) Re-Os Dating of Polymetallic Ni-Mo-PGE-Au Mineralization in Low Cambrian Black Shales of South China and Its Geological Significance. Econ. Geol., 97, 1051-1060.

References

1. Baranov G. I., Grekov I. I. Geodynamic model of the Greater Caucasus. Problems of geodynamics of the Caucasus. Moscow, Nauka, 1982. pp. 51-59. (In Russ.)

2. Bogush I. A. Gold-bearing breccias in the North Caucasus. Doklady of the Russian Academy of Sciences. 1995. Vol. 342. No. 2. pp. 205-208. (In Russ.)

3. Bogush I. A., Sendetskii I. I. Ore mineralization of gold-bearing zones of pyritization of the «non-pyritic» formation of the Kuban-Malka interfluvium (N. Caucasus). Problems of geology and geoecology of Russian South and the Caucasus. In: Proceedings of international scientific conference. Vol. 1. Geology, mineral deposits. Novocherkassk. 1997. pp. 134-139. (In Russ.)

4. Bogush I. A., Cherkashin V. I. Sources of noble metals (Au, Pt, Pd) in the North Caucasus. Lithosphere. 2019. Vol. 19. No. 3. pp. 465-471. (In Russ.)

5. Geology of the USSR. North Caucasus. Part 1. Geological description. Moscow. Nedra, 1968. pp. 135-152, 508-510. (In Russ.)

6. Goncharov V. I., Bogush I. A., Isaev V. S., Glazyrina N. V., Dzhangirov M. Yu., Darchieva A. E., Vas'kov I. M. Search criteria and prospects for noble metals of the Devonian black shale strata in the North Caucasus. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2007. Vol. 7. No. 3. pp. 19-24. (In Russ.)

7. Gurskaya L. I. Black shale type platinum metallization and its prediction criteria. Saint Petersburg. VSEGEI publishing house, 2000. 208 p. (In Russ.)

8. Dodin D. A., Chernyshov N. M., Yatskevich B. A. Platinum deposits of Russia. Saint Petersburg, Nauka, 2000. 735 p. (In Russ.)

9. Konstantinov M. M. Genetic systems of gold deposits. Doklady USSR Academy of Sciences. – 1984. Vol. 275. No. 3. pp. 696-699. (In Russ.)

10. Novozhilov Yu. M., Gavrilov A. M. Gold-sulfide deposits in carbon-terrigenous strata. Moscow. TsNIGRI, 1999. 75 p. (In Russ.)

11. Omel'chenko V. L. About deep faults in the North Caucasus. Lithosphere. 2019. Vol. 1. pp. 130-142. (In Russ.)

12. Parada S. G. Conditions and signs of platinum mineralization in the North Caucasus. The state of the mineral resource base of the Russian South and the prospects for its development. In: Proceedings of scientific and technical conference. Rostov-on-Don, 2009. pp. 83-87. (In Russ.)
13. Sazonov V. N., Koroteev V. A., Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Velikanov A. Ya. Gold in the «black shales» of the Urals. *Lithosphere*. 2011. No. 4. pp. 70-92. (In Russ.)
14. Sendetskii I. I. Petrochemical features of the volcanics of the Kynyrchad Formation of the Kuban-Malkinsky interfluvium. Problems of geology and ecology of Russian South and the Caucasus. In: Proceedings of international scientific conference. Vol. 1. Geology, minerals. Novocherkassk. 1997. pp. 108-110. (In Russ.)
15. Sendetskii I. I. Gold-bearing hydrothermalites of the Lower Permian taphrogen of the Kuban-Malka interfluvium (Northern Caucasus). Abstract of Cand. Thesis, Novocherkassk. 1998. 25 p. (In Russ.)
16. Chernitsin V. B., Prokuronov P. V. Metallogenic specialization of the Pshekish-Tyrnyauz deep fault (Greater Caucasus). *Geology of ore deposits*. 1977. No. 2. pp. 115-118. (In Russ.)
17. Yudovich Ya. E., Kertis M. P. Geochemistry of black shales. Leningrad. Nauka, 1988. 272 p.
18. Crauch R. J., Coveney R. M., Murowchick J. B. Black shales as hosts for unconventional platinum- group-element resources. *US Geol. Surv.* 1991. No. 1062. pp. 33-34.
19. Gurskaya L. I. Platinum-group element mineralization associated with the black shales a new stratiform type ore for PGE. Abstr. VI International. Platinymsemin. Perth, W. Australia. 1991. H. 23.
20. Holland H. D. Metals in black shale – a reassessment *Economic Geology*. v. p. 1979. pp. 1676-1680.
21. Hulbert L. J., Carne R. C., Gregoire D. C., Paktunc D. Sedimentary nickel, zinc, and platinum-group-element mineralization in Devonian black shales at the Nick property, Yukon Canada: A new deposit type: *Exploration and Mining Geology*. 1992. Vol. 1. pp. 39-62.
22. Mao J., Leman B., Du A., Zhang G., Ma D., Wang Y., Zeng M., Kerrich R. Re-Os Dating of Polymetallic Ni-Mo-PGE-Au Mineralization in Low Cambrian Black Shales of South China and Its Geological Significance. *Econ. Geol.*, 97, 2002, pp. 1051-1060.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 553.66:553.61.13 (571.661)

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59068](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59068)

Оригинальная статья

Размещение и прогноз рудных районов юго-запада Корякского нагорья

Г. П. Яроцкий¹, Х. О. Чотчаев²¹Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, бульвар Пийпа, 9, г. Петропавловск-Камчатский 683006, Российская Федерация, e-mail: ecology@kscnet.ru;²Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, ул. Маркова, 93а, г. Владикавказ 362002, Российская Федерация, e-mail: cgi_ras@mail.ru

Статья поступила: 10.01.2020, доработана: 19.03.2020, одобрена в печать: 27.03.2020

Резюме: Актуальность рассматриваемой темы в том, что орогенные пояса материковой части Камчатского края насыщены полезными ископаемыми, приуроченных к поясам, образованным последовательным приростом окраин континента от древних с северо-запада к юго-востоку. Такими поясами с месторождениями Ag, Au, Sn, Hg, S являются Северо-Западно-Корякский олигоценый и Южно-Корякский миоценовый, образованные на северной и южной границе Центрально-Корякской окраины позднемиоценового континента. Они сформированы в олигоцене и миоцене изолированными вулканогенами локальных андезитовых полей, прорванных гранитоидами тектонической активизации. С ними связаны рудные площади, локализация которых позволит обеспечить прирост запасов разрабатываемых россыпей платиноидов. **Цель работы** заключается в установлении тектонических закономерностей образования вулканогенов, связанных с ними рудных районов и получения новых данных по их прогнозу. В Северо-Западном поясе оформилась металлогеническая зона с Ун-нэйваамским, Гайчаваамским и Пальматкинским районами, сопряжёнными с одноимёнными вулканогенами, в Южно-Камчатском – с Ветроваамским вулканогеном. **Методология и методы исследования.** Методология заключена в глыбово-клавишной структуре литосферы и её земной коры на активных окраинах континента. Методика основана на установлении системной связи структурных элементов геолого-геофизической системы «тектоника-вулканогены». **Результаты работ и их анализ.** Предложена схема закономерностей размещения известных и прогнозируемых рудных районов, узлов юго-запада Корякского нагорья. Они обусловлены глыбово-клавишной тектоникой и локализованы в звеньях серии продольных субпараллельных разновозрастных региональных структур СВ простираения, последовательно наращивающих континент к юго-востоку. Звенья являются дискретными и определяют размеры рудных районов. Рассмотрены выделяемые звенья Северо-Западно-Корякского олигоценового и Южно-Корякского миоценового поясов. В первом СВ поперечными межглыбовыми разломами литосферы образованы вулканогены гнездового типа. Они возникли на пересечении фундамента позднего мела и южной окраины сопредельной Пенжинской СФЗ поперечными межглыбовыми разломами. В пересечениях образуется литосферный столб вещества гранитоидной активизации верхней мантии и позднемиоценового осадочного разреза фундамента. **Делается вывод,** что в Южно-Корякском поясе вулканоген является линейным, образованным заключением линейного СВ Ветроваамского выступа фундамента и чехла между двумя поперечными межглыбовыми разломами. В нём рудоносными вторичными кварцитами создан Ильпинский рудный район с крупными месторождениями самородной серы с Ag, Au, Hg, S. Орогенный вулканизм на активных окраинах континентов сопряжён с основными элементами тектоники и магматизма, создавшими условия образования минерагенических таксонов. На примерах орогенных поясов олигоцене и миоцене очевидна роль геотектонических и металлогенических аспектов авторской методологии глыбово-клавишной структуры литосферы активных окраин. Она эффективна в прогнозе рудных площадей и их оценке последующими геологоразведочными работами.

Ключевые слова: глыбово-клавишная тектоника, вулканогены поясов, минерагения, закономерности, рудные районы, узлы.

Для цитирования: Яроцкий Г. П., Чотчаев Х. О. Размещение и прогноз рудных районов юго-запада Корякского нагорья. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (1): 96-113. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59068.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION

OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59068](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59068)

Original paper

The location and Potential Assessment of the Ore Regions in the South-Western Part of the Koryak Highland

G. P. Yarotskii¹, Kh. O. Chotchaev²

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

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

Received: 10.01.2020, revised: 19.03.2020, accepted: 27.03.2020

Abstract: The relevance of the work is that the orogenic belts of the mainland of the Kamchatka Territory are saturated with minerals confined to the belts formed by the successive growth of the continental margins from the ancient ones from the north-west to the south-east. Such belts with deposits of Ag, Au, Sn, Hg, S are the Northwest Koryak Oligocene and South Koryak Miocene, formed on the northern and southern borders of the Central Koryak margin of the Late Cretaceous continent. They are formed in the Oligocene and Miocene by isolated volcanogens of local andesitic fields, broken by granitoids of tectonic activation. Ore areas are associated with them, the localization of which will ensure an increase in the reserves of developed placer deposits. **The purpose of the work** is to establish tectonic patterns of formation of volcanogens, associated ore regions and obtain new data on their forecast. In the North-Western zone, a metallogenic zone took shape with the Unneivayamsky, Gaichavayamsky and Palmatkinsky regions, associated with the same named volcanogenes, in the South Kamchatka – with the Vetrovayamsky volcanogen. Methodology and research methods. The methodology lies in the block-key structure of the lithosphere and its earth's crust on the active margins of the continent. The methodology is based on establishing a systemic connection between the structural elements of the geological and geophysical system «tectonics-volcanogens». The results of the work and their analysis. A scheme of patterns of distribution of known and predicted ore regions, nodes of the south-west of the Koryak upland is proposed. They are caused by block-key tectonics and are localized in the links of a series of longitudinal subparallel regionally different age structures of NE strike, successively expanding the continent to the southeast. The links are discrete and determine the size of the ore regions. The distinguished links of the Northwest Koryak Oligocene and South Koryak Miocene belts are considered. In the first northwestern region, nesting volcanogens are formed by transverse interblock faults of the lithosphere. They arose at the intersection of the Late Cretaceous foundation and the southern edge of the adjacent Penzhinsk structural-facial zone with transverse interblock faults. At the intersections, a lithospheric column of granitoid activation matter of the upper mantle and the Late Cretaceous sedimentary section of the basement is formed. **It is concluded** that the volcanogen in the South Koryak belt, has a linear nature, formed by the conclusion of a linear NE of Vetrovayamsk ledge of the basement and cover between two transverse interblock faults. There ore-bearing secondary quartzites created the Ilpinsk ore region with large deposits of native sulfur with Ag, Au, Hg, S. The orogenic volcanism on the active margins of the continents is associated with the basic elements of tectonics and magmatism, which created the conditions for the formation of minerogenic taxons. The role of geotectonic and metallogenic aspects of the author's methodology of the block-key structure of the active lithosphere margins is evident on the examples of the orogenic Oligocene and Miocene belts. It is effective in forecasting ore areas and evaluating them with subsequent exploration works.

Keywords: key-block tectonics, belt volcanogens, minerageny, regular patterns, ore regions, nodes.

For citation: Yarotskii G. P., Chotchaev Kh. O. The location and Potential Assessment of the Ore Regions in the South-Western Part of the Koryak Highland. Analysis of Features and their Possible Causes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (1): 96-113. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59068.

Введение

В Корякско-Камчатском регионе геологоразведочными работами 60-90-х годов XX в. изучены угольная, серная, золотая, ртутная, газоносная, гидротермальная и гидроминеральная провинции с 22 рудными и рудно-россыпными районами [Карта полезных ископаемых..., 1999; White, Hedenquist, 1995]. Каталог к Карте содержит 1896 объектов, которые обеспечивают возможность прироста рудоносных площадей, в т.ч. в процессе камеральных исследований. Особенностью «Схемы металлогенического районирования» [Схема..., 2001] к Карте является незавершенность контуров ряда районов, неполное использование обширных фактических данных о полезных ископаемых, геофизических материалов в целях прогноза потенциально рудоносных площадей. Это обусловило недостаточность проработки методологических аспектов связи минерации и тектоники, что частично предлагается восполнить настоящей работой. В опубликованной и архивной (фондовой) литературе предлагаемая авторская методология исследования и ее методика не освещается. Их основой является авторское представление глыбово-клавишной структуры (далее – ГКС) земной коры и литосферы в целом активной окраины континента на СВ Азии и блоково-клавишной (БКС) – ее верхних мел-палеогеновых ярусов. Методология предопределена концепцией связи минерации с разломной тектоникой активных окраин континентов Тихоокеанского подвижного (рудного, вулканического, сейсмического и др.) пояса и последовательно конкретизировалась до формулировки основ прогноза минерогенических таксонов. Авторские разработки, геолого-геофизические фактические данные, их интерпретация и обобщение по Камчатке, Корее, Японии, Южной Америке, Новой Зеландии позволяют формулировать последовательность приближения к понятию рудного района как основного минерогенического таксона на активных восточных окраинах континента в Тихоокеанском рудном поясе. Путь последовательного приближения к основным тектоническим и минерогеническим положениям авторской Концепции приведен в [Яроцкий, 1976].

Актуальность проблемы связи тектоники и минерации орогенных поясов и прогноза площадей рудоносных таксонов на юго-западе Корякского нагорья Камчатки заключается в необходимости приращении запасов площадей разрабатываемых россыпей платиноидов погруженной глыбы литосферы Олюторского залива Корейской окраины континента.

Методология и методика исследования

Цель исследования – установить тектонические закономерности размещения известных рудных районов Юго-Запада Корякского нагорья. Определить их роль как основного рудоносного таксона на южной активной позднемезозойской и кайнозойской окраине континента СВ Азии и аргументация на этой основе их полного оконтуривания, а также прогноза новых районов, как резерва прироста рудоносных площадей. **Предмет исследования** – геолого-геофизическая система «разломно-блоковая тектоника и минерация». **Объект** – территория Юго-Запада Корякского нагорья от Камчатского перешейка до восточной границы Камчатского края, с северной границей по Паропольскому долу.

Исследование выполнено в разрабатываемой автором геотектонической Концепции (так и далее) «Системы глыбово-клавишной структуры литосферы активной окраины континента». Тектоника территории описана в статье С. Е. Апрелькова с соавторами [Апрельков и др., 1997; Wilson, Anhaeusser, 1998], которая использована

нами при привязке районов в региональных структурах. Территория является провинцией Корякско-Камчатской металлогенической области с известными минерагеническими таксонами – районами (рисунок). Их металлогеническая специализация взята нами со «Схемы...» к «Карте...» [1999] и дополнена по Государственным геологическим картам СССР и РФ м-ба 1:200000 [Башаркевич и др., 1981; Косько и др., 1972; Поздеев, 1975; Поздеев, Рожкова, 1986].

При исследовании закономерностей размещения и прогноза районов нами, априори, принято районирование «Схемы...», которое рассмотрено в приложении к контексту разрабатываемых авторских положений методологии Концепции активных тихоокеанских окраин континентов. На рисунке приведены районы: известные – без изменения контуров, с уточнёнными границами, прогнозируемые нами. В начале описания районов приводится их площадь согласно «Схемы...», в конце – согласно Концепции. В тексте приведены данные о полях магнитном (ΔT_a) и силы тяжести (Δg_a) (оба качественно).

Методология глыбово-клавишной структуры литосферы и её коры определяет методику выявления роли разломной тектоники окраин континентов в формировании условий локализации рудовмещающих и рудоносных комплексов, как региональных тектонических факторов образования структур районов. Они являются одновременно региональными и локальными тектоническими и минерагеническими факторами как элементы системы. **Метод исследования** – системный геолого-геофизический анализ рудоконтролирующих факторов локализации районов, основанный на выявлении структурных связей между элементами системы.

Разломная тектоника и минерагенические факторы установлены авторскими исследованиями обширных геологических данных, интерпретацией полей гравиметрической и аэромагнитной, детальных комплексных геофизических (магнитных, электроразведочных) съемок. Итогом является Концепция системы структуры литосферы и блоково-клавишной – ее верхних вулканогенно-осадочных ярусов и связь с ними минерагенических таксонов на активных окраинах континента. Методика определяет положение поперечных межглыбовых глубинных разломов СЗ простирания, как поперечных границ обособленных стратиграфических и вещественных таксонов звеньев продольных СВ региональных структур структурно-формационных (тектонических) зон с только для них характерными геологическими и геофизическими полями. Поперечные разломы имеют длительную мезозойскую и кайнозойскую историю, в процессе которой активизация тектонических движений приводила к их локальным разрывам и смещениям, преимущественно по отдельным СВ разломам. Поэтому на рисунке линии СЗ разломов отражают схему генерализации их положения.

Приняты в исследовании априори классические критерии выделения рудных таксонов: возраст, состав, минерагеническая специализация и тектоническая локализация рудовмещающих и рудоносных комплексов их структурная локализация, характеристики их геофизических полей. Кроме локализации линейных звеньев продольных структур между двумя поперечными межглыбовыми разломами показана и локализация орогенных структур и в узловых зонах таких разломов, когда они пересекают сочленения двух продольных тектонических структур.

Глыбово-клавишная структура литосферы, блоково-клавишная – её верхних ярусов и общие аспекты минерагении Корякско-Камчатского региона, Японии, Южной Америки, Новой Зеландии. На активных окраинах Тихоокеанского

подвижного пояса проявлена интенсивная разломно-блоковая тектоника складчатого основания и складчато-блокового чехла продольных структур (поясов, вулканогенов, грабенных и др.), последовательно наращивающих сушу к океану. Ниже приведены основные положения Концепции, с указанием её структурных элементов, даны аналоги известных разломов.

1. Поперечные региональные межглыбовые разломы СЗ простирания расчленяют продольные региональные геоструктуры окраин континента на отдельные самостоятельные отрезки – звенья. Для СЗ части пояса, его Чукотско-Японской ветви, продольные региональные структуры СВ простирания связаны с СВ составляющей диагональной системы планетарной регматической сети. Ее СЗ – поперечная – составляющая расчленяет единые продольные геоструктуры окраины на локальные – отдельные обособленные линейные звенья. Соседние звенья каждой такой единой продольной структуры зачастую принципиально отличаются по стратиграфии, веществу, геофизике. Звенья ограничены парами поперечных межглыбовых глубинных сквозькоровых разломов СЗ простирания, прослеживаемых от побережья океана к СЗ вглубь континента на сотни км, в т.ч. и через Охотское, и на ЮВ – Берингово [Селиверстов, 1998] моря.

Система поперечных межглыбовых разломов является следствием планетарного растяжения литосферы и её коры на СВ Азии. В твердой коре релаксация волновых растягивающих напряжений формирует зоны дроблений (разломов) и монолитов. Расстояния между этими зонами зависят от толщины растягиваемого тела [Шафрановский, Плотников, 1975], то есть мощности коры и ее слоев. В них одновременно закладывались и системы диагональных – СЗ и СВ – разломов разного ранга. Так формировалась иерархическая структура коры и более мелких дроблений ее твердых слоев, включая верхние ярусы.

Определены метрические закономерности размещения поперечных межглыбовых разломов в Корякско-Камчатском регионе. Они ориентированы на северо-запад (310–330°), расстояния между ними – 65–130 км (Камчатка), реже – 165–170 км (материк) которые определяются мощностью твердой коры и её слоёв. Расстояния являются предельной длиной линейного звена региональной продольной структуры и ее специализированного рудного района тоже предельного.

Тектонической функцией поперечных межглыбовых разломов является обеспечение условий субвертикальных движений сопредельных линейных звеньев продольных СВ структур и регулирование осадконакопления в них в разрезе глыбы. Они определяют и *минерагеническую роль межглыбовых разломов* (см. ниже), как региональных поперечных геохимических барьеров – ограничителей минерагенических таксонов обособленных звеньев продольных структур коры.

Этот акцент тектоники ярко выражен в современной геоморфологии побережий восточной окраины Азиатского континента в закономерно чередующихся воздымающихся полуостровах и опускающихся заливами (Чукотка, Корякия, Камчатка, Сахалин, Япония), либо в таком же чередовании групп островов островных дуг (Курильские гряды). Этот аспект также отражен и в палеогеографии Японии [Геологическое..., 1968; Quantitative mineral..., 2008], на Филиппинах, в Новой Зеландии [Эрлих, 1973] и др. В контексте вертикальных движений ЮВ окончания глыб рассматриваются нами вдоль их СЗ простирания как серия последующих в истории развитии окраин чередующихся разноглубинных блоков-клавиш – звеньев продольных структур в сторону от побережий океана вглубь континента. А совокуп-

ность звеньев этих клавиш в глыбе – как *тектоническая глыбово-клавишная модель земной коры и литосферы* окраины континента в целом.

2. Индикационные геолого-геофизические признаки зон поперечных межглыбовых разломов СЗ простирания. Среди них – геологические, геоморфологические, тектонические, минерагенические, геофизические (ΔT) а, Δg , геоэлектрические, сейсмологические. Между разломами и заключены последовательно от океана к СЗ на материк побережья ряд локальных линейных звеньев ряда сопредельных параллельных региональных разновозрастных – «разноцветных» продольных структур СВ простирания, нарастающих окраину континента в разное время его истории. Последовательная совокупность ряда звеньев этих структур, заключенных парой разломов, в направлении от океана к СЗ вглубь континента объединяется в СЗ глыбу земной коры, то есть разломы являются межглыбовыми. Они – мезозойские, длительные и стабильные, сквозные, размещаются вне зависимости от типа коры, пересекая переходную и континентальную древнюю кору региона [Яроцкий, 1976]. Они – элементы диагональной сети, а элементы ортогональной системы планетарной регматической сети осложняют тектонику, но признаются нами второстепенными в рассматриваемой Концепции структуры литосферы активной окраины континента (ГКС).

Поперечные разломы как границы тектонических и металлогенических зон на Камчатке и Сахалине описаны в трудах известного выдающегося исследователя регионов В. К. Ротмана [1984]. Система разломов на Камчатке также ярко видна в районировании кривых МТЗ, составленном Ю. Ф. Морозом [1987]. Для территории СВ Азии подобные разломы как система под названием трансрегиональных выделена коллективом под руководством Н. И. Филатовой [Структуры..., 1984]. Они рассматриваются как регуляторы деструктивных и конструктивных процессов в земной коре окраины континента на СВ Азии, пересекают переходную и древнюю кору рифейского возраста.

Минерагеническая функция поперечных разломов проявилось ярко в локализации звена Восточно-Камчатского вулканического пояса между двумя межглыбовыми разломами ЮВ окончания опущенной – погружённой глыбы Кроноцкого залива. В полосе шириной 45 км и длиной 130 км подавляюще распространены покровные фации риолитов и риодацитов квартера [Карта..., 1999]. С ними связано формирование ряда гидротермальных систем [Леонов, 2003], образующих геотермальный район площадью 5850 кв. км. В Новой Зеландии (о. Северный) в вулканической зоне Таупо длиной 125 км заключено ее опущенное звено клавиши глыбы залива Хоук с рядом гидротермальных систем, связанных с преобладанием риолитового вулканизма [Эрлих, 1973] на площади 3750 кв. км.

Связь минерагенических таксонов с глыбово-клавишной структурой земной коры установлена нами и для Японии. Согласно [Геология..., 1961] положение интрузий, метаморфизованных зон и главных металлогенических районов палеозоя, позднего мезозоя-неогена и четвертичного возраста, а также вулканов плейстоцена и современных согласуется с выделяемой нами системой северо-западных глыб. Контуры рудных районов (Cu, Pb, Au, Ag, W, Mn, S и др.) разного возраста совпадают в плане, а их площади составляют 2,5-6,8 тыс. кв. км. Данные по металлогении Анд (Южная Америка) напрямую связываются с поперечными тектоническими зонами (Талара Морановьон, Эрика-Эббоу-Лайн, Потоси-Серуйо, поднятие Наска и др.) [Казанский и др., 1973], которые являются тектоническими и металлогени-

ческими барьерами в формировании районов. Для этой территории Д. П. Ричардс [2003] приводит обзорную геологическую карту, по которой нами определяются размеры медно-золоторудных районов. При расстояниях между поперечными (СЗ) разломами 100-167 км и ширине рудовмещающих формаций 40-45 км их площади составляют 4000-7515 кв. км.

3. Звенья продольных структур, обособленные в составе каждой из глыб, находятся в разных движениях этапов своей истории геологического развития и наращивания континента: воздымания или опускания (погружения).

В четвертичное время развития Камчатки и ЮВ материковой части СВ Азии (Корякия) это фиксируется заливами, разделенными клавишами воздымающихся полуостров побережья. На поверхности прибрежных ЮВ окончаний воздымающихся глубинных клиньев СЗ глыб подавляюще распространены четвертичные базальты, реже – эпизодически, андезибазальты, опускающихся – дациты, риолиты, риодациты [Карта..., 1999]. Росту воздымающихся звеньев глыб препятствуют изостатические движения через излияния на их поверхность тяжелых компенсационных глубинных вулканических масс основного состава (базальтов, андезибазальтов). Воздымание останавливается, начинаются снос материала в сопредельные опускающиеся глыбы и процессы палингенеза. Это приводит в глыбах к росту разреза и мощности коры. Через некоторое время движение сопредельных глыб останавливается и меняется на обратное, а звено глыбы погружается – в его разрезе и на его поверхности происходит накопление кислого вулканизма и вулканогенно-осадочного материала.

Чередующиеся вулканические излияния и снос продуктов их разрушения регулируют осадконакопление, т.е. вулканизм играет компенсационную роль в стремлении глыб к равновесию. Так нами расценивается как возвратный, компенсационный, четвертичный основной вулканизм, например, в неогеновом Центрально-Камчатском вулканическом поясе (вулканы Хангар, Ичинский), покрывающий воздымающиеся линейные глубинные звенья его продольной СВ структуры. Примерами линейных звеньев продольных региональных геоструктур на материке являются в Корякии вулканогены, как отдельные самостоятельные части вулканических поясов. В Юго-Восточно-Корякском поясе – это разобщённые Ветровая́нский (миоцен), Опускский (миоцен), Пахачинско-Апуквая́нский (миоцен-квартер) вулканогены. Выше сказано о роли поперечных межглыбовых разломов СЗ простирания как ограничений тектоники и минерации звеньев продольных СВ структур на территории прироста суши окраины континента. Это определяет длину звеньев.

Продольными тектоническими барьерами в таких структурах служат СВ разломы, определяющие границы возрастных и вещественных, в т.ч. рудовмещающих, эпизодов осадконакопления в их звеньях. Они играют роль и продольных геохимических барьеров, определяя ширину рудного района, равную в регионе, как правило, 30-50 км. Таким образом, локализуется тектоническое и минерогеническое обособленное положение локального звена продольной региональной структуры в составе глыбы с его однородными индивидуальными стратиграфическими и вещественными комплексами, геофизическими полями. Эти тектонические звенья определяют рудные районы Тихоокеанского пояса на востоке Азии, в Новой Зеландии и Южной Америке. **Районы являются неизбежным следствием тектонического развития окраин континентов, а их размеры предельны и дискретны и составляют по площади 3,5-8,2 тыс. кв. км.**

Линейные обособленные звенья продольных структур в Концепции являются одним из типов локализации их частей как вулканогенов. В Корякском регионе установлен и другой тип локализации частей продольных геоструктур – узловый. Он известен для орогенных стадий, поясов, в частности, классического Северо-Западно-Корякского вулканического пояса олигоцена. Здесь на пересечении поперечными межглыбовыми разломами сочленения двух региональных СВ геоструктур образуются локальные впадины. Они в орогенную стадию тектоно-магматической активизации стали причиной образования узлового (гнездового) типа вулканогена в поясе. Ниже будут показаны оба типа вулканогенов, с которыми связаны рудоносные таксоны. Приведём определение вулканогена: Вулканоген. – Самостоятельное звено вулканических поясов, относящееся к особому генетическому типу тектонических структур, которые «срезают» уже сформированные складчатые образования; связаны с гранитоидными процессами активизации, лежат в локальных впадинах фундамента над выходами к поверхности из верхней мантии рудоносных столбов.

4. В поперечном СВ глубинном сечении клавиши заливов глыб ЮВ окончаний глыб представляются трапециями, а полуостровов – клиньями, «обжатые» боковыми сторонами сопредельных трапеций.

Первоначально была высказана гипотеза об оптимальном сечении звеньев полуостровов, как глубинных клиньев и заливов, как глубинных трапеций литосферы. Она нашла подтверждение в разрезах литосферы в целом по данным МТЗ [Мороз, 1987] и МТЗ-МОВЗ [Белявский и др., 2007; Нурмухамедов и др., 2016]. Этот аспект тектоники ЮВ окончания глыб дал возможность выделить в них продольно-осевые внутриглыбовые литосферные разломы. Они лежат в замках и киях слоёв коры и верхней мантии и являются сейсмогенерирующими. В замках лежат выведенные на поверхность глубинные части рудных колонок, в киях – максимум морских террейнов.

Результаты исследования

Региональные тектонические факторы локализации рудовмещающих комплексов рудных районов юго-запада Корякского нагорья. На Юго-Западе Корякского нагорья (Ильпинский район, ранее – Северо-Камчатский сероносный), на Камчатском перешейке и на Камчатке (на трёх площадях), интерпретаций геолого-геофизических данных автором выделена и классифицирована закономерная система региональных тектонических и стратиграфических факторов рудных районов, играющих и минерагеническую роль. В этом контексте рассмотрим геологию ряда районов территории Корякии, отражённых в «Схеме металлогенического районирования» [Карта., 1999].

Районы известные с уточненными границами (рис. 1). На примере Ильпинского района (4) опишем тектонические элементы системы, локализирующие условия его формирования как минерагенического таксона. Главной магмаконтролирующей структурой района является зона продольного Вывенского (СВ – 60°) глубинного разлома. Она блокового строения фундамента и чехла с диоритовым комплексом – источником рудоносных флюидов, и отраженного цепью линейно-блоковых гравитационных максимумов. Зона фиксирует ЮВ окраину верхнемелового континента СВ Азии и в миоцене является источником формирования рудовмещающего орогенного комплекса (среднего-основного состава) Ветровая́мского вулканогена (Вв) СВ прости́рания. Цепь линейно-блоковых максимумов зоны разделена СВ секу-

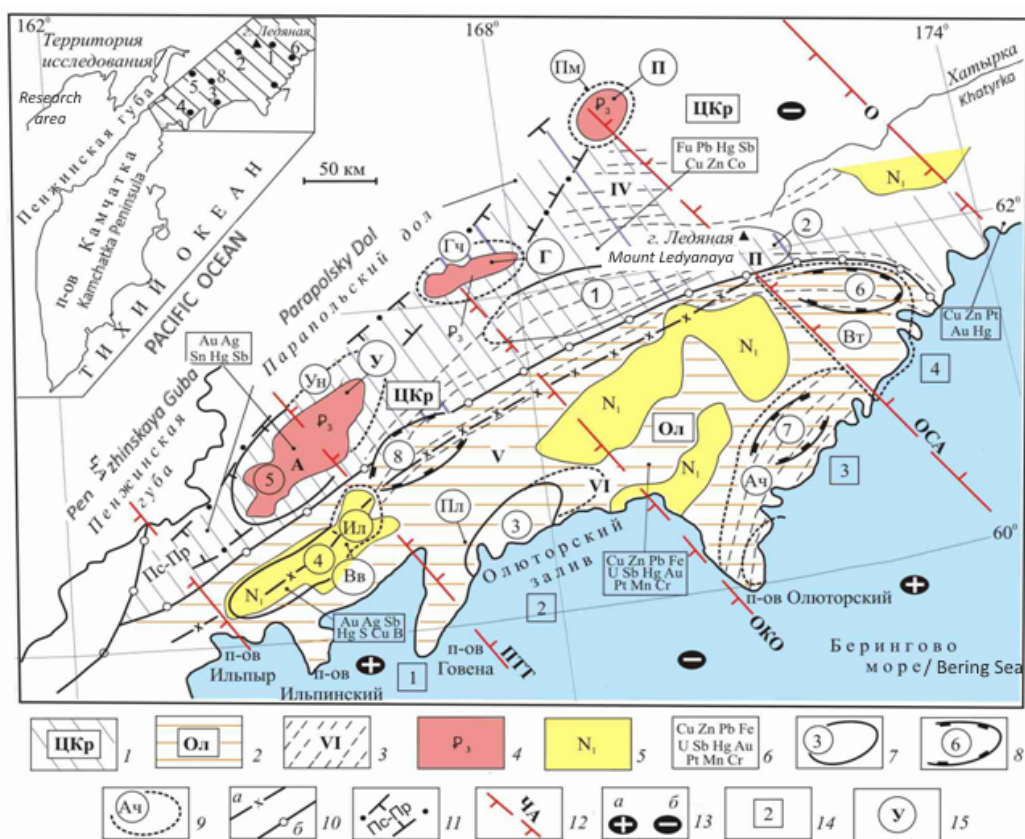


Рис. 1. Закономерности образования и положения вулканогенов и их рудных районов на юго-западе Корякского нагорья по [Карта полезных ископаемых..., 1999, с дополнениями авторов].
 Корякско-Камчатская металлогеническая область. Металлогенические провинции: 1 – ЦКр – Центрально-Корякская; 2 – Ол – Олюторская. Металлогенические зоны: 3 – складчатого основания: IV – Центрально-Корякская, V – Вывенская, VI – Таманваямская; металлогенические зоны наложенные, связанные с проявлением субаэрального вулканизма: 4 – олигоценного возраста, 5 – миоценового возраста; 6 – металлогеническая специализация провинций, зон. Районы. 7 – рудные: Ляганайский (1), Центрально-Корякский (2), Пылгинский (3), Ильпинский (4), Западно-Корякский (5); 8 – рудно-россыпные: Вытынский (6), Ачайваямский (7), Сейнаровский (8). Дополнения: 9 – районы уточненные и прогнозируемые, их специализация по листам геологических съёмок м-ба 1:200 000: Пл – Пылгинский (Hg, Cu, Zn, Pb, Fe, Au, Pt, Mn), Ач – Ачайваямский (Au, Cu), Вт – Ватынский (Mn, Cu), Ун – Уннэиваямский (Ag), Гч – Гайчавайамский (Ag), Пл – Пальматкинский (Ag), Ил – Ильпинский (S, Au); рудные узлы: А – Айнаветкинский, П – Перевальный; 10 – тектонические границы: а – Вывенский глубинный разлом, б – южная граница Центрально-Корякской тектонической зоны (металлогенической провинции); 11 – границы Пусторецко-Парапольского прогиба (Пс-Пр); 12 – поперечные межсдвиговые разломы северо-западного направления (генерализация): ЧА – Чемузнаут-Анапкинский, ПТТ – Парень-Таловско-Тиличикский, ОКО – Омолон-Каменско-Олюторский, ОСА – Олойско/Аянско-Слаутненско-Ачайваямский, О – Опухский; 13 – направления современных субвертикальных движений окончаний сопредельных глыб земной коры: а – воздымающиеся, б – опускающиеся, опаздывающие в воздымании; 14 – юго-восточные окончания глыб земной коры: 1 – п-вов Ильпыр, Ильпинского, Говена; 2 – залива Олюторского; 3 – п-ва Олюторского; 4 – Юго-Восточно-Корякских бухт; 15 – Вулканогены и их сереборудные районы: У – Уннэиваямский, Г – Гайчавайамский, П – Пальматкинский; сернорудный, золоторудный Вв – Ветроваямский. /

Fig. 1. The formation and location patterns of volcanogens and their ore regions in the south-west of the Koryak upland according to [Mineral resources map..., 1999, with amendments of authors].
 Koryak-Kamchatka metallogenetic region. Metallogenetic provinces: 1 – CKr – Central Koryak; 2 – Ol – Olyutor. Metallogenetic zones: 3 – folded base: IV-Central Koryak, V-Vyvensk, VI – Tamanvayamsk; superimposed metallogenetic zones associated with the manifestation of subaerial volcanism:

4 – Oligocene age, 5 – Miocene age; 6 – metallogenic specialization of provinces, zones. Areas. 7 – ore: Lyapganay (1), Central Koryak (2), Pylginsk (3), Il'pinsk (4), West Koryak (5); 8 – ore-placer deposits: Vytynsk (6), Achaivayamsk (7), Seinavsk (8). Amendments: 9 – areas specified and forecasted, their specialization according to the geological survey sheets of the scale 1: 200 000: Pl – Pylginsk (Hg, Cu, Zn, Pb, Fe, Au, Pt, Mn), Ach – Achaivayamsk (Au, Cu), Vt – Vytynsk (Mn, Cu), Un – Unneivayamsk (Ag), Gc – Gaichavaamsk (Ag), Pl – Pal'matkinsk (Ag), Il – Il'pinsk (S, Au); ore nodes: A – Ainavetkinsk, P – Pereval'nyi; 10 – tectonic boundaries: a – Vyvensk deep fault, b – southern boundary of the Central Koryak tectonic zone (metallogenic province); 11 – borders of the Pustoretsk-Parapol'sk trough (Ps-Pr); 12 – transverse interblock faults of the north-western direction (generalization): ChA – Chemurnaut-Anapkinsk, PTT – Paren' – Talovsk-Tilichik, OKO – Omolon-Kamenso-Olyutor, OSA – Oloisk/Ayansk-Slautnensk-Achaivayamsk, O – Opukhsk; 13 – directions of modern subvertical movements of the endings of adjacent blocks of the earth's crust: a – rising, b – falling, late in uplift; 14 – southeastern endings of blocks of the earth's crust: 1 – Peninsulas Il'pyr, Il'pinsk, Goven; 2 – Olyutor Bay; 3 – Peninsula Olyutor; 4 – Southeast Koryak bays; 15 – Volcanogens and their silver ore regions: U – Unneivayamsk, G – Gaichavaamsk, P – Pal'matkinsk; Sulfur ore, gold ore Vv – Vetrovayamsk.

щими субкамчатскими коровыми (простираение СВ – 40°) разломами, по которым происходили излияния пород комплекса. В магнитном поле породы комплекса отражены рядом субпараллельных знакопеременных узких (3-10 км) линейных аномалий (простираение СВ – 40°), а также группами субпараллельных нарушений, зон сланцеватости, смятия и надвиговых чешуи с мелкими экструзивно-интрузивными телами среднего-основного состава [Голяков, 1980]. Такие структуры являются рудоконтролирующими [Яроцкий и др., 2018; Laznicka, 2006; Randall et al., 1994].

В структуре СЗ субалеутских зон в поднятых локальных блоках выведены на поверхность рудоносные массивы вторичных кварцитов. Они располагаются симметрично, отражая релаксацию напряжений в миоценовом ярусе коры и его фундамента. Кварциты с S, Au, Ag, Cu, Hg W, Mo и др. имеют латеральную температурную зональность распределения породообразующих и рудных минералов в направлении от зоны диоритового комплекса Вывенского глубинного разлома к СЗ и ЮВ, отражая миграционную минеральную зональность массивов. Это характеризует СЗ поперечные линейные горстовые зоны как рудоконцентрирующие. В них в Вывенской зоне и ее СЗ надразломном разноамплитудным блоковым линейном грабене образуются сернорудные узлы с золотом площадью ~ 250 кв. км. На участках пересечения рудоконтролирующих и рудоконцентрирующих структур в узлах образуются рудные поля с S, Au, Ag, Hg, Cu площадью около 40-70 кв. км, как правило, с крупным месторождением. Известны три узла, нами прогнозируются еще три. Симметрия подобия расположения разломных дислокаций структур закономерно отражена и в симметрии положения узлов.

Тектонические условия миоценового яруса, локализирующие рудовмещающий и рудоносный комплексы вулканогена, являются одновременно и минерагеническими факторами как элементы системы «тектоника-металлогения». Это позволяет замкнуть контур Ильпинского рудного района на СВ Ветроваямского вулканогена. Таким образом, район целиком локализован только в воздымающемся звене глыбы литосферы полуостровов Ильпырского, Ильпинского и Говена, заключенном между поперечными межглыбовыми ЧА и ПТТ разломами. Площадь линейного вулканогена с его Ильпинским районом (4) составляет 6000 кв. км [Яроцкий, 2006; Izava et al., 1990; Rytuba, 1994].

Ачайваямский район (7) занимает территорию бассейнов рек Аниваям, Мачевна, Кустовка. Металлогеническая специализация на «Схеме...» не указана, а площадь (1400 кв. км) не имеет замкнутого контура.

Территория расположена на Беринговоморском поднятии [Апрелков и др., 1997], отраженном мозаичным магнитным и положительным гравитационным полями. В схеме Концепции ГКС она приурочена к ЮВ окончанию современной клавиши воздымающейся глыбы литосферы Олюторского полуострова. Здесь, на единственной площади ЮЗ Корякии, локализуются рудовмещающие туфогенно-кремнистые надвиговые образования ачайваямской свиты (маастрихт). СЗ внутри-глыбовые рудоконцентрирующие зоны разломов в рудовмещающих образованиях отражают симметрию положения, простирания и размеров. Зоны контролируют рудоносные габброиды, являясь рудоконцентрирующими структурами. С габброидами ассоциируют халькопирит, азурит, малахит, барит с Ti, V, Cu, Zn, отражающие минеральную миграционную зональность. Индикационным геохимическим элементом пород глыбы и признаком её тектоники является барит.

Территория рудовмещающих образований заключена исключительно между поперечными межглыбовыми разломами ОКО и ОСА. Площадь 8200 кв. км.

Центрально-Корякский район (2) с незамкнутым контуром расположен на западных отрогах темени Корякского нагорья г. Ледяной и характеризуется Au, Ag. Площадь 1200 кв.км. Является узловым вулканогенным на границе Центрально-Корякской (поздний мел) и Пикасьваямской (юра-мел) тектонических зон. Вулканоген лежит на границе звеньев воздымающейся глыбы Олюторского полуострова на западе и погружающейся глыбы Юго-Восточно-Корякских бухт на востоке – на площади Олойско-Слаутненско-Ачайваямского поперечного разлома.

Рудовмещающие – осадочные образования корякской серии (кампан) с проявлениями Au, Hg и «ураганными» (десятки сотен г/т) содержаниями Ag, обрамлены ореолами рассеяния Sn. Их площадь локализуется в выступе (готерив) и блоках ватынской серии (кампан) с мелкими интрузиями гранитоидов олигоцена. Известны рудопроявления и ореолы Sn, As, Hg рудного узла района – Перевального. Магнитное поле района – безаномальное, слабоотрицательное. В гравитационном поле рудовмещающие образования отражены локальным глубоким минимумом, на южной периферии которого расположены проявления Sn, Au, Ag, As.

Тектоническая позиция, насыщенность площади ассоциациями Sn с Ag, гранитоидный магматизм характеризуют район как фактический узловой вулканоген с оловорудным узлом общей площадью ~ 600 кв. км.

Ляпганайский район (1). Район не имеет завершенных контуров, специализация исключительно ртутная. Площадь 2625 кв. км.

Район расположен в Центрально-Корякской тектонической зоне. В ГКС он приурочен к продольному звену СВ Энычайваямского грабен-синклинория [Поздеев, Рожков, 1986], отчетливо локализованного между поперечными ОКО и ОСА разломами. Рудовмещающий комплекс – породы вальэнской свиты (палеоцен), простирается от западной границы Центрально-Корякской провинции к ЮВ на 150 км. Комплекс картируется в несогласном залегании с образованиями корякской серии (кампан), фиксируя ось грабен-синклинория. В его полосе породы насыщены исключительно проявлениями Hg. В гравитационном поле район приурочен к южной части обширной, самой глубоко отрицательной, области юго-запада Корякии. В магнитном поле территория отражена характерной, слабо аномальной также обширной, отрицательной областью. Является линейным вулканогеном с районом площадью 3750 кв. км.

Ватынский район (6) на крайнем СВ края занимает площадь бассейнов рек Ватыны и правобережья Ильпивеем. Распространены многочисленные рудопрояв-

ния Мп, менее – Си и ореолы рассеяния Нг. Площадь 1950 кв. км. Район расположен на востоке Беринговоморского поднятия. В схеме ГКС литосферы он приурочен к звену поднятия на южном окончании глыбы Юго-Восточно-Корякских бухт. Звено по простиранию ограничено поперечными ОСА и Опукским межглыбовыми разломами.

Район нами ограничивается контуром выходов рудовмещающих образований ватынской серии, представленных в плане блоком СЗ (315°) простирания от побережья до г. Ледяной. Ориентировка блока указывает на тектоническое влияние глыбы на локализацию рудовмещающего фактора площади района – в отличие от СВ простирания всех районов ЮЗ нагорья! Особым аспектом тектоники района является высокая насыщенность разреза покровами надвигов ватынской свиты [Карта..., 1999]. Площадь 5175 кв. км.

Пылгинский район (3) расположен на побережье Олюторского залива. Специализация, такая же как для всей Олюторской провинции. Площадь 1800 кв. км. Район приурочен к территории звена-клавиши Говенско-Пылгинского горст-антиклинория СВ простирания. В схеме ГКС он занимает ЮВ прибрежную часть современной глыбы Олюторского залива и ограничен ПТТ и ОКО поперечными межглыбовыми разломами.

Контур района включает в центре ядро горста, сложенное образованиями туфокремнистой инетываемской свиты (K_2-P_1), с надвинутыми вулканогенными образованиями хакинской свиты (маастрихт). Ядро обрамлено вулканогенно-осадочными породами ивтыгинской свиты (P_1). На флангах горста – образования иночвиваемской свиты (P_1) и ильпинской серии (P_2-P_3) с телами диоритов, гранодиоритов, дацитов (P_3). Особой примечательностью является насыщенность разреза кислыми интрузиями и надвигами.

Образования горста и его обрамления являются рудовмещающим комплексом с рудоносными интрузивными и жильными телами, зонами метасоматоза. Он подавляюще локализован между поперечными ПТТ и ОКО межглыбовыми разломами в поднятых разноамплитудных блоках звена глыбы, ограниченного нарушениями СЗ простирания. Блоки слагают линейные горстовые структуры, подобные рудоконцентрирующим структурам Ильпинского и Ачайвямского районов. В минерагении района ведущую роль играют Au, Ag, Zn, Hg, Sb и многочисленные проявления Си с Fe. Геохимическими маркерами звена горст-антиклинория являются Fe, Mn, Pt. Территория является частью Олюторской металлогенической зоной складчатого основания.

Границы района оконтуриваются по локализации рудовмещающего комплекса. Его длина около 150 км, ширина, в среднем, 40 км, площадь 6000 кв. км.

Рудные районы уточнённые

Выделяются три района, с общими геологическими и геофизическими характеристиками, среди которых главный признак: все они приурочены к территориям уникальных образований в регионе – субрегиональным орогенным вулканогенам велолныкской серии. Их формирование связывается с олигоценовой гранитоидной тектоно-магматической активизацией на северной окраине верхнемеловой Центрально-Корякской тектонической зоны в полосе ее сочленения с продольным Пусторецко-Парапольским прогибом (Пс-Пр) СВ простирания. В узлах пересечения сочленения поперечными ПТТ и ОКО и ОСА межглыбовыми разломами, сформирова-

рованы Уннэиваямский (У), Гайчаваамский (Г) и Пальматкинский (П) узловые вулканогены, как рудовмещающие комплексы трёх рудных районов (см. далее).

Западно-Корякский район (5). Приурочен к Уннэиваямскому вулканогену (У) с крупнейшей в нагорье Мигитунупской интрузией гранитоидов [Поздеев, 1975]. Его металлогеническая специализация – Au, Ag, Sn, Sb, Hg. Контур района на западе включает западную часть вулканогена с Au и Sn и открыт на СВ. Его площадь приурочена к локальным впадинам по верхнемеловому и кристаллическому фундаментам глубиной 1 и 8 км, соответственно [Мороз, 1987]. Они развиты над рудным столбом из верхней мантии. Рудовмещающие комплексы района – вулканиты олигоцена с Au, Ag, Sb, Hg и образования фундамента (корякская серия) с Sn на его южном фланге. Район не является классическим металлогеническим таксоном, включающим оловорудный Айнаветкинский узел, а выделен по промышленным признакам.

Магнитное поле района отрицательное, почти безаномальное, в гравитационном поле он отражен СВ характерным прямоугольным минимумом. Его восточная площадь совпадает с контуром впадины в кровле кристаллического фундамента и выходами исключительно кислых вулканитов. Западная часть района характеризуется гравитационным минимумом и также впадиной в кристаллическом фундаменте.

Район делится на две указанных выше площади Парень-Таловско-Тиличикским поперечным разломом и Мигитунупской интрузией и по ряду принципиально различных вещественных признаков. На западной – подавляюще распространены покровы и субвулканические фации среднего состава с Au-Ag проявлениями и месторождением золота Аметистовое с геохимической примесью Sn, и рассматривается она как золоторудная. Восточная площадь сложена исключительно кислыми покровами и субвулканическими фациями (риолиты) исключительно серебровмещающего комплекса с высокими – ураганными содержаниями Ag (до десятков тыс. г/т). Обе площади рассматривается нами вместе с Айнаветкинским рудным узлом (А) как *Уннэиваямский сереброрудный район* с одноименным узловым вулканогенном с общей площадью ~ 3200 кв. км.

Районы прогнозируемые

Гайчаваамский прогнозируемый район (Гч) расположен в 130 км к СВ от Уннэиваямского вулканогена. Он связан с Гайчаваамским узловым вулканогеном (Г) с рядом малых интрузий гранитоидов, образующих Инвалопинопский массив[□]. По составу вулканитов район, как и Уннэиваямский вулканоген, делится на две площади поперечным Омолон-Каменско-Олюторским разломом с гранитным массивом в его зоне. Западная – исключительно с покровами и субвулканическими фациями среднего состава (андезиты) и редкими проявлениями Au, Ag. Восточная – исключительно с кислыми покровами и субвулканическими фациями (дациты, риолиты), и интенсивным исключительно высоким – ураганным Ag оруденением. В прилегающих к вулканогену на юге породах эссовееской свиты фундамента (кампан) сконцентрированы проявления Hg, As, Sb (площадь ~ 350 кв. км), рассматриваемые как генетический рудный узел района. В магнитном и гравитационном полях характеристика обеих площадей также полностью идентична площадям Уннэиваямского вулканогена, как и его положения над рудным столбом из верхней мантии.

Полная идентичность полей, состава вулканитов и минерализации Гайчаваамского и Уннэиваямского вулканогенов предполагают и идентичность глубинного

строения Гайчаваамского вулканогена и определяют его как сереброрудный район. Площадь рудовмещающего комплекса около 2250 кв. км, с учетом ртутного узла около 2600 кв. км.

Пальматкинский прогнозируемый район (Пм) расположен в 130 км к востоку от Гайчаваамского вулканогена. Он лежит в зоне поперечного межглыбового Олойско-Слаутненско-Ачайваамского разлома. В нём выделяется Палаваамский вулканоген (П) велолныкской (автоваамской) серии олигоцена с рядом малых интрузий массива гранитоидов в центре [Башаркевич и др., 1981]. Металлогения вулканогена (Ag, Hg, Sb) связана с рудовмещающими кислыми вулканитами (риолиты, дациты) и андезитами (Au). Магнитное и гравитационное поля полностью идентичны полям Уннэйваамского и Гайчаваамского вулканогенов.

Все три вулканогена гнездового типа: приурочены к одной продольной региональной структуре – сочленению Пусторецко-Парапольского прогиба (Пс-Пр) и верхнемелового фундамента Центрально-Корякской тектонической зоны; лежат они на линии СВ Пусторецко-Куюльского глубинного разлома; сформированы на площадях пересечения поперечными межглыбовыми разломами в олигоценовую тектоно-магматическую гранитоидную активизацию; локализованы в надразломных впадинах верхнемелового и кристаллического фундамента, образовавшихся на площадях пересечения сочленения поперечными межглыбовыми разломами; их рудовмещающими комплексами являются одинаковые по составу покровы, субвулканические тела и кислые интрузии велолныкской серии олигоцена; металлогения их однотипна, с подавляющим преобладанием Ag; для них характерна минеральная зональность рудовмещающих комплексов фундамента; они характеризуются однотипными магнитным и гравитационным полями, их площадные размеры одного порядка.

Совокупность приведенных признаков трёх районов становится критерием – аргументом в определении единого тектонического и металлогенического механизма формирования вулканогенов и их рудных районов. Этим механизмом является глыбово-клавишная структура земной коры литосферы. Признаки являются закономерностями размещения региональных тектонических и металлогенических факторов, отражая единство механизма образования вулканогенов и их минерации (подавляюще Ag) во время олигоценовой гранитоидной тектоно-магматической активизации. Три прогнозируемые рудные районы объединяются нами в Северо-Западно-Корякскую сереброрудную провинцию (металлогеническую зону).

Заключение

Орогенный вулканизм на активных окраинах континентов сопряжён с основными элементами тектоники и магматизма, создавшими условия образования минерогенических таксонов. На примерах орогенных поясов олигоцена и миоцена очевидна роль геотектонических и металлогенических аспектов авторской методологии глыбово-клавишной структуры литосферы активных окраин. Она эффективна в прогнозе рудных площадей и их оценке последующими геологоразведочными работами.

Полученные результаты позволяют сделать основной вывод, что тектоника и минерации неразрывно сопряжены. Обе они являются результатом региональных конструкций строительства литосферы и её земной коры активных окраин континентов.

нента на последовательных этапах их развития. Этот аспект развития Земли является основой следующих закономерных процессов литосферы.

1. Поперечные межглыбовые разломы активной окраины континента на Северо-Востоке Азии обеспечили тектоническую локализацию рудовмещающих комплексов в звеньях ряда продольных северо-восточных региональных структур в местах их пересечения межглыбовыми разломами сочленения Центрально-Корякской тектонической зоны с Пусторецко-Парапольским прогибом, с формированием **рудовмещающих узловых олигоценовых вулканогенов** Северо-Западно-Корякского вулканического пояса.

В пределах отдельных линейных звеньев продольных геоструктур, ограниченных парами поперечных межглыбовых литосферных разломов, образуются *линейные вулканогены* (Ветровая́мский) либо крупные линейные части складчато-блоковых геоструктур (Ляпгана́йский район), либо как узловые (Центрально-Корякский) вулканогены.

2. В Южно-Корякском поясе вулканоген является линейным, образованным заключением линейного СВ Ветровая́мского выступа фундамента и чехла между двумя поперечными межглыбовыми разломами. В нём рудоносными вторичными кварцитами создан Ильпинский рудный район с крупными месторождениями самородной серы с Ag, Au, Hg, S.

3. Положение рудных и рудно-россыпных районов юго-запада Корякского нагорья дает основание определить соотношение площадей их металлогенической специализации с тектоникой земной коры. Согласно глыбово-клавишной структуре литосферы и выявленным в ней закономерным связям, основным минерагеническим таксоном рассмотренной активной Центрально-Корякской и Олюторской окраины континента является **рудный район с его рудными узлами**.

4. Рудные и россыпные районы юго-запада Корякского нагорья предельны и дискретны по размерам рудовмещающих комплексов и составляют по площади 2600-8200 кв. км.

5. В общей минерагенической схеме районы с Cr, Cu, Mn, Fe, Hg, Pt специализацией – Пылгинский, Ваты́нский, приурочены к линейным звеньям продольных СВ простира́ния региональных структур, развивавшихся в погруженных глыбах литосферы. Районы с S, Bi, Ba, Hg специализацией – Ильпинский, Ляпгана́йский, Ачайва́мский, приурочены к звеньям структур, развивавшихся в воздымающихся глыбах литосферы.

6. Au, Ag, Hg, As оруденение не проявляет конкретной связи с глыбами коры. Интенсивное Ag оруденение, с исключительно высокими содержаниями, локализуется на площадях в полосе сочленения северо-восточной Пусторецко-Парапольской впадины с Центрально-Корякской тектонической зоной, где это сочленение пересекается поперечными межглыбовыми разломами литосферы. Здесь сформированы узловые вулканогены олигоценовой тектоно-магматической активизации с образованием сереброрудных районов (Уннэ́йва́мский, Гайча́ва́мский, Пальма́т-ки́нский) Северо-Западно-Корякской сереброрудной провинции (металлогенической зоны).

Установленные связи минерагении с тектоникой являются классическими для вулканических областей окраин континента по периметру Тихоокеанских поясов. Предлагаемое минерагеническое районирование обусловлено глыбово-клавишной структурой литосферы, не известной нам в литературе аналогом.

Литература

1. Апрельков С. Е., Декина Г. И., Попруженко С. В. Особенности геологического строения Корякского нагорья и бассейна р. Пенжины. // Тихоокеанская геология. – 1997. – Т. 16. №2. – С. 46-57.
2. Башаркевич А. Л., Бочков Б. В. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Корякская серия. Р-59-VII (г. Острая). Объяснит. записка. 37 л. 1 гр. 1987 г. ВСЕГЕИ СГФ. – 1981.
3. Белявский В. В., Золотов Е. Е., Ракитов В. А. и др. Глубинная сейсмогеоэлектрическая модель Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и Центрально-Корякской складчатой зоны в пределах профиля Корф-Верхнее Пенжино. // Олюторское землетрясение 20 (21) апреля 2006 г. Корякское нагорье. Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский. – 2007. – С. 277-288.
4. Геологическое строение Японских островов (Палеогеография Японских островов). – М.: Мир, 1968. – С. 14-696.
5. Геология и минеральные ресурсы Японии. – М.: ИЛ, 1961. – С. 13-128, 141-267.
6. Голяков В. И. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Корякская. Листы Р-58-XXXIII, О-58-III. Объяснит. записка. – М. – 1980. – 100 с.
7. Казанский В. И., Старостин В. И., Чеботарев М. В. Металлогеническая зональность Анд и тектоника плит. // Металлогения и новая глобальная тектоника. Всесоюзное НТС «Проблемы металлогении». – Л.: Ленкартфабрика объединения «Аэрогеология», 1973. – С. 95-97.
8. Карта полезных ископаемых Камчатской области масштаба 1:500000. Листы 2-8, 11. / Ред. Литвинов А. Ф., Патока М. Г., Марковский Б. А. – СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 1999. – 19 листов.
9. Косько М. К., Радченко Н. С., Савельев Н. А. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Корякская. Лист Р-59-XXVIII. Объяснит. записка. – М. – 1972. – 86 с.
10. Леонов В. Л. Поперечные структуры и их влияние на развитие четвертичного вулканизма. // Геодинамика, магматизм и минерагения континент. окраин севера Пацифики. Мат-лы всеросс. совещания. Т. 1. – Магадан: Изд-во СВКНИИ СВНЦ ДВО РАН, 2003. – С. 159-162.
11. Мороз Ю. Ф. Глубинное строение юго-западной части Корякского нагорья. // Советская геология. – 1987. – №5. – С. 118-123.
12. Нурмухамедов А. Г., Недядько В. В., Ракитов В. А. и др. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2016. – №1. Вып. 29. – С. 35-52.
13. Поздеев А. И. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Корякская. Лист Р-58-XXVIII. Объяснит. записка. – М. – 1975. – 94 с.
14. Поздеев А. И., Рожкова В. К. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Корякская. Лист Р-59-XXIV. Объяснит. записка. – М. – 1986. – 107 с.
15. Ротман В. К. Металлогеническая карта Камчатки, Сахалина и Курильских островов масштаба 1:500000. Металлогения СССР. – Л. – 1984. – С. 32-55.
16. Селиверстов Н. И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. – М.: Научный мир, 1998. – 164 с.
17. Структуры континентальной и переходной земной коры на космических снимках. / Под ред. Филатовой Н. И. и др. – М.: Недра, 1984. – 211 с.
18. Шафрановский И. И., Плотников Л. М. Симметрия в геологии. – Л.: Недра, 1975. – 144 с.
19. Эрлих Э. Н. Современная структура и четвертичный вулканизм западной части Тихоокеанского кольца. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1973. – С. 3-132.
20. Яроцкий Г. П. Поперечные глубинные разломы и некоторые аспекты строения земной коры Корякско-Камчатского региона // «Глубинное строение, магматизм и металлогения Тихоокеанских вулканических поясов». – Владивосток. – 1976. – С. 110-112.

21. Яроцкий Г.П. Земная кора и четвертичный вулканизм Камчатки. // Материалы Междунар. XXXIX тектон. совещ. «Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли». Т. 2. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 415-420.
22. Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Ветроваямский вулканоген и его рудный район (Юго-запад Юго-Восточно-Корякского пояса). // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №1. – С. 79-92.
23. Izawa E., Urashima Y., Ibaraki K., et al. The Hishikari gold deposits: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanic of southern Kyushu, Japan. // Epithermal gold mineralization of the Circum-Pacific. – Elsevier. – 1990. – Pp. 1-56.
24. Laznicka P. Giant Metallic Deposits – Future Sources of Industrial Metals. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 762 p.
25. Quantitative mineral resource assessment of copper, molybdenum, gold, and silver in undiscovered porphyry copper deposits in the Andes Mountains of South America. // U.S. Geological Survey Open-File Report. – 2008. – 282 p.
26. Randall R.J. A., Saldana A.E., Clark K.F. Exploration in a volcanic-plutonic center at Guanajuato. // Economic Geology. – 1994. – Vol. 89. – Pp. 1722-1751.
27. Richards J.P. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu- (Mo-Au) Deposit Formation. // Economic Geology. – 2003. – V. 98. – Pp. 1515-1533.
28. Rytuba J.J. Evolution of volcanic and tectonic features in caldera settings and their importance in the localization of ore deposits. // Economic Geology. – 1994. – Vol. 89. – Pp. 1687-1696.
29. White N., Hedenquist J. Epithermal Gold Deposits: styles, characteristics and exploration. // SEG News Letter. – 1995. No.23. – Pp. 1-12.
30. Wilson M.G. C., Anhaeusser C.R. The Mineral Resources of South Africa. // Handbook, Council for Geoscience. – 1998. No. 16. – 740 p.

References

1. Aprelkov S.E., Dekina G.I., Popruzhenko S.V. Features of the geological structure of the Koryak upland and river Penzhin basin. Pacific geology. 1997. Vol. 16. No. 2. pp. 46-57 (In Russ.)
2. Basharkevich A.L., Bochkov B.V. State geological map of the USSR. Scale 1: 200000. Koryak series. P-59-VII (Ostraya mount). 1981. Explanatory note. 37 sheets, 1 graph. 1987 (In Russ.)
3. Belyavskii V.V., Zolotov E.E., Rakitov V.A. et al. Deep seismic geoelectric model of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt and the Central Koryak fold zone within the Korf-Upper Penzhino profile. Olyutor earthquake on April 20 (21), 2006, Koryak plateau. The first research results. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2007. pp. 277-288. (In Russ.)
4. The geological structure of the Japanese islands (Paleogeography of the Japanese islands). Moscow. Mir, 1968. pp. 14-696. (In Russ.)
5. Geology and mineral resources of Japan. Moscow. IL, 1961. pp. 13-128, 141-267. (In Russ.)
6. Golyakov V.I. Geological map of the USSR on a scale 1: 200000. Koryak Series. Sheets P-58-XXXIII, O-58-III. Explanatory note. Moscow. 1980. 100 p. (In Russ.)
7. Kazanskii V.I., Starostin V.I., Chebotarev M.V. Metallogenic zoning of Andes and plate tectonics. Metallogeny and the new global tectonics. All-Union Scientific and Technical Council «Problems of Metallogeny». Leningrad. Lenkartfabrika, 1973. pp. 95-97. (In Russ.)
8. Map of mineral resources of the Kamchatka region on a scale 1: 500000. Sheets 2-8, 11. Saint Petersburg. Kartfabrika VSEGEI, 1999. 19 sheets. (In Russ.)
9. Kos'ko M. K., Radchenko N. S., Savel'ev N.A. Geological map of the USSR on a scale of 1: 200000. Koryak Series. Sheet R-59-XXVIII. Explanatory note. Moscow. 1972. 86 p. (In Russ.)

10. Leonov V.L. Transverse structures and their influence on the development of Quaternary volcanism. Geodynamics, magmatism and mineralogy of continental outskirts of the north Pacific. Proceedings of all-Russian meeting. Vol. 1. Magadan, Publishing House of SVKNII SVRC FEB RAS, 2003. pp. 159-162. (In Russ.)
11. Moroz Yu. F. The deep structure of the southwestern part of the Koryak Upland. Sovetskaya geologiya. 1987. No. 5. pp. 118-123. (In Russ.)
12. Nurmukhamedov A. G., Nedyad'ko V. V., Rakitov V.A. et al. The boundaries of the lithosphere in Kamchatka according to the method of exchange waves of earthquakes. Bulletin of KRAUNZ. Earth sciences. 2016. No. 1. Vol. 29. pp. 35-52. (In Russ.)
13. 14. Pozdeev A.I. Geological map of the USSR on a scale of 1: 200000. Koryak Series. Sheet P-58-XXVIII. Explanatory note. Moscow. 1975. 94 p. (In Russ.)
14. Pozdeev A.I., Rozhkova V.K. Geological map of the USSR on a scale of 1: 200000. Koryak Series. Sheet P-59-XXIV. Explanatory note. Moscow. 1986. 107 p. (In Russ.)
15. Rotman V.K. Metallogenic map of Kamchatka, Sakhalin and the Kuril Islands in a scale 1: 5000000. Metallogeny of the USSR. Leningrad. 1984. pp. 32-55. (In Russ.)
16. Seliverstov N.I. The bottom structure of the Kamchatka waters and the geodynamics of the junction zone of the Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs. Moscow. Nauchnyi mir, 1998. 164 p. (In Russ.)
17. Structures of the continental and transitional crust in satellite images. Moscow. Nedra, 1984. 211p. (In Russ.)
18. Shafranovskii I.I., Plotnikov L.M. Symmetry in geology. Leningrad. Nedra, 1975. 144 p. (In Russ.)
19. Erlikh E.N. The modern structure and Quaternary volcanism of the western part of the Pacific ring. Novosibirsk, Nauka. Siberian Branch, 1973. pp. 3-132. (In Russ.)
20. Yarotskii G.P. Transverse deep faults and some aspects of the structure of the earth's crust of the Koryak-Kamchatka region. «Deep structure, magmatism and metallogeny of the Pacific volcanic zones». Vladivostok. 1976. pp. 110-112. (In Russ.)
21. Yarotskii G.P. Earth's crust and Quaternary volcanism of Kamchatka. In: Proceedings of the International XXXIX tectonic conference «Areas of active tectogenesis in modern and ancient history of the Earth». Vol. 2. Moscow. GEOS, 2006. pp. 415-420. (In Russ.)
22. Yarotskii G.P., Chotchaev Kh. O. Vetrovayaamsk volcanogen and its ore region (South-West of the South-East-Koryak belt). Geology and geophysics of Russian South. 2018. No. 1. pp. 79-92. (In Russ.)
23. Izava E., Urashima Y., Ibaraki K., et al. The Hishikari gold deposits: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanic of southern Kyushu, Japan. Epithermal gold mineralization of the Circum-Pacific. Elsevier. 1990. pp. 1-56.
24. Laznicka P. Giant Metallic Deposits – Future Sources of Industrial Metals. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 762 p.
25. Quantitative mineral resource assessment of copper, molybdenum, gold, and silver in undiscovered porphyry copper deposits in the Andes Mountains of South America. U. S. Geological Survey Open-File Report. 2008. 282 p.
26. Randall R.J. A., Saldana A.E., Clark K.F. Exploration in a volcanic-plutonic center at Guanajuato. Economic Geology. 1994. Vol. 89. pp. 1722-1751.
27. Richards J.P. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu- (Mo-Au) Deposit Formation. Economic Geology. 2003. Vol. 98. pp. 1515-1533.
28. Rytuba J.J. Evolution of volcanic and tectonic features in caldera settings and their importance in the localization of ore deposits. Economic Geology. 1994. Vol. 89. pp. 1687-1696.
29. White N., Hedenquist J. Epithermal Gold Deposits: styles, characteristics and exploration. SEG News Letter. 1995. No.23. pp. 1-12.
30. Wilson, M. G. C., Anhaeusser C.R. The Mineral Resources of South Africa. Handbook, Council for Geoscience. 1998. No. 16. 740 p.

УДК 504.062.2

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59069](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59069)

Оригинальная статья

Эколого-экономическое обоснование возможности утилизации попутного нефтяного газа на нефтяных месторождениях Российской Федерации

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

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

Статья поступила: 19.02.2020, после рецензирования: 25.03.2020, принята к публикации: 27.03.2020

Резюме: Актуальность работы. Утилизация попутного нефтяного газа методом сжигания его на факельных установках является одной из основных экологических проблем при добыче нефти в мире. При этом данный процесс оказывает колоссальный экономический ущерб, так как попутный нефтяной газ является потенциальным продуктом, который возможно перерабатывать с получением товарной продукции, электроэнергии или тепловой энергии. Только в России на факелах ежегодно сжигается более 30 млрд м³ ПНГ, при этом сжигание 1 млрд куб. м попутного газа эквивалентно потере товарной продукции на сумму более 300 млн долларов. **Цель работы.** В представленной статье авторами проведен подбор оптимального способа утилизации попутного нефтяного газа на малых месторождениях России и его эколого-экономическое обоснование. **Методы исследования.** В качестве наиболее рентабельного метода принят способ электрогенерации с использованием газотурбинной электростанции. Реализация такого проекта на месторождении снижает выбросы загрязняющих веществ в сотни раз, а срок его окупаемости не превышает 2,5 лет. Нефтяная и газовая промышленность – это динамично развивающаяся отрасль мировой экономики, а добываемые нефть и природный газ – один из основных энергоресурсов на нашей планете. В Российской Федерации нефтегазовая промышленность является одной из ключевых отраслей, обеспечивающих формирование бюджета. В 2017 году в России было добыто более 500 млн т нефти и около 600 млрд м³ природного газа, при этом более 50% сырой нефти и около 40% природного газа было отправлено на экспорт. При таких значительных объемах добычи и далеко не самых крупных запасах нефти ресурсообеспеченность России нефтью по различным оценкам составляет от 20 до 25 лет при неизменных объемах добычи. Немного лучше ситуация обстоит с природным газом, ресурсообеспеченность России которым по разным оценкам составляет от 80 до 100 лет. При этом добыча нефти и газа является одним из наиболее опасных производств для окружающей природной среды. **Результаты работы.** В процессе освоения нефтяных и газовых месторождений можно выделить следующие основные проблемы, освещенные в данной работе: нарушение растительного, почвенного и снежного покровов, поверхностного стока, срезка микрорельефа; необратимые деформации земной поверхности в результате извлечения из недр нефти, газа и подземных вод, поддерживающих пластовое давление; загрязнение атмосферы, почвы, поверхностных и подземных водных источников. Однако одной из наиболее актуальных экологических проблем нефтегазового промышленного комплекса в России является утилизация попутного нефтяного газа. Попутный нефтяной газ (далее ПНГ) – один из сопутствующих продуктов процесса добычи нефти и её предварительной подготовки к транспортировке. Основными компонентами ПНГ являются метан и другие низкомолекулярные (летучие) алканы.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, факельная установка, выбросы, электрогенерация, газотурбинная электростанция, эколого-экономическое обоснование.

Для цитирования: Иванов А. В., Стриженов А. В., Супрун И. К. Эколого-экономическое обоснование возможности утилизации попутного нефтяного газа на нефтяных месторождениях Российской Федерации. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (1): 114–126. DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59069](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59069).

GEOECOLOGY

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59069](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59069)

Original paper

Ecological and economic justification of the utilization of associated petroleum gas at oil fields of Russian Federation

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

St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russian Federation,
e-mail: www.igor_suprun@mail.ru

Received: 19.02.2020, revised: 25.03.2020, accepted: 27.03.2020

Abstract: Relevance. One of the main environmental problems in oil production in the world today is the utilization of associated petroleum gas (APG) by combustion it in flares. At the same time, this process has enormous economic damage, since APG is a potential raw material that can be used to produce marketable products, power or heat energy. More than 30 billion cubic meters of APG are combusted in flares annually only in Russia, which is about 20% of the total amount of combusted APG in the world. It should be noted that combustion of 1 billion cubic meters of APG is equivalent to the loss of marketable products worth more than 300 million dollars. **Aim.** In the present article, the authors carried out a selection of the optimal method for utilization of APG at small fields in Russia and its environmental and economic justification. **Methods.** The method of power generation directly at the field using gas turbine power station was adopted as the most cost-effective method. The implementation of such a project at the field reduces emissions of pollutants hundreds of times, and payback period does not exceed 2.5 years. The oil and gas industry is a dynamically developing sector of the world economy, but produced oil and natural gas is one of the main energy resources on our planet. The oil and gas industry is one of the main industries ensuring budget formation in the Russian Federation. More than 500 million tons of oil and about 600 billion cubic meters of natural gas were produced in Russia in 2017, as the same time about 50% of crude oil and about 40% of natural gas were exported. With such significant production volumes and not the largest oil reserves, the resource supply of Russia with oil, according to various estimates, ranges from 20 to 25 years with current production volumes. The situation with natural gas is a little better, as resource supply of Russia with natural gas, according to various estimates, ranges from 80 to 100 years. **Results.** At the same time, oil and gas production is one of the most hazardous industries for the environment. In the process of developing oil and gas fields, the following main problems can be distinguished: violation of vegetation, soil and snow cover, surface runoff, cut microrelief; irreversible deformations of the earth's surface as a result of extraction from the bowels of oil, gas and groundwater that support reservoir pressure; pollution of the atmosphere, soil, surface and underground water sources. However, one of the most pressing environmental problems of the oil and gas industrial complex in Russia is the utilization of associated petroleum gas (hereinafter referred to as APG). APG is one of the by-products of the process of oil production and its preliminary preparation for transportation. The main components of PNG are methane and other low molecular weight (volatile) alkanes.

Keywords: associated petroleum gas, flare, emissions, power generation, gas turbine power plant, environmental and economic feasibility study.

For citation: Ivanov A. V., Strizhenok A. V., Suprun I. K. Ecological and economic justification of the utilization of associated petroleum gas at oil fields of Russian Federation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (1): 114-126. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59069.

Введение

В силу ряда причин технического и экономического характера, а также из-за особенностей правового регулирования нефтедобывающей отрасли, основным

способом утилизации попутного нефтяного газа в России и в некоторых других странах на сегодняшний день является сжигание в факельных установках. Только в России в 2018 году данным способом было утилизировано около 30 млрд м³ ПНГ, что составляет более 20% мирового объема ПНГ, сжигаемого в факельных установках [Волкодаева, Киселева, 2017]. В результате на месторождениях и нефтеперерабатывающих предприятиях по всему миру горят более 17000 факелов, ежегодно выбрасывая в атмосферу около 350 млн т CO₂, сотни тысяч тонн оксида азота, оксида углерода, диоксида серы и продуктов неполного сгорания углеводородов, что по объему составляет более 35% всех выбросов в атмосферу от предприятий нефтегазовой промышленности. Кроме этого, сжигание ПНГ в приарктических регионах приводит к образованию большого количества сажи, оседающей на снежном покрове, что увеличивает поглощение солнечной энергии и ускоряет таяние арктических льдов [Кужаева, Джевага, 2017].

На рисунке 1 представлена картографическая модель рассеивания в приземной атмосфере угарного газа, выбрасываемого факельной установкой на одном из малых месторождений Сибири. Угарный газ является одним из основных загрязнителей при сжигании и обладает токсичным действием на живые организмы [Баркан, Корнев, 2017]. На изолиниях отображается коэффициент, рассчитываемый, как отношение текущей концентрации к нормативному показателю [Vanadzina et al., 2015]. Таким образом, данный коэффициент показывает, во сколько раз концентрация превышает относительно норматива.

На рисунке 1 видно, что в радиусе более 10 километров установленный норматив по угарному газу превышает в десятки раз. При этом в радиус действия рассматриваемой факельной установки попадают еще несколько факелов близле-

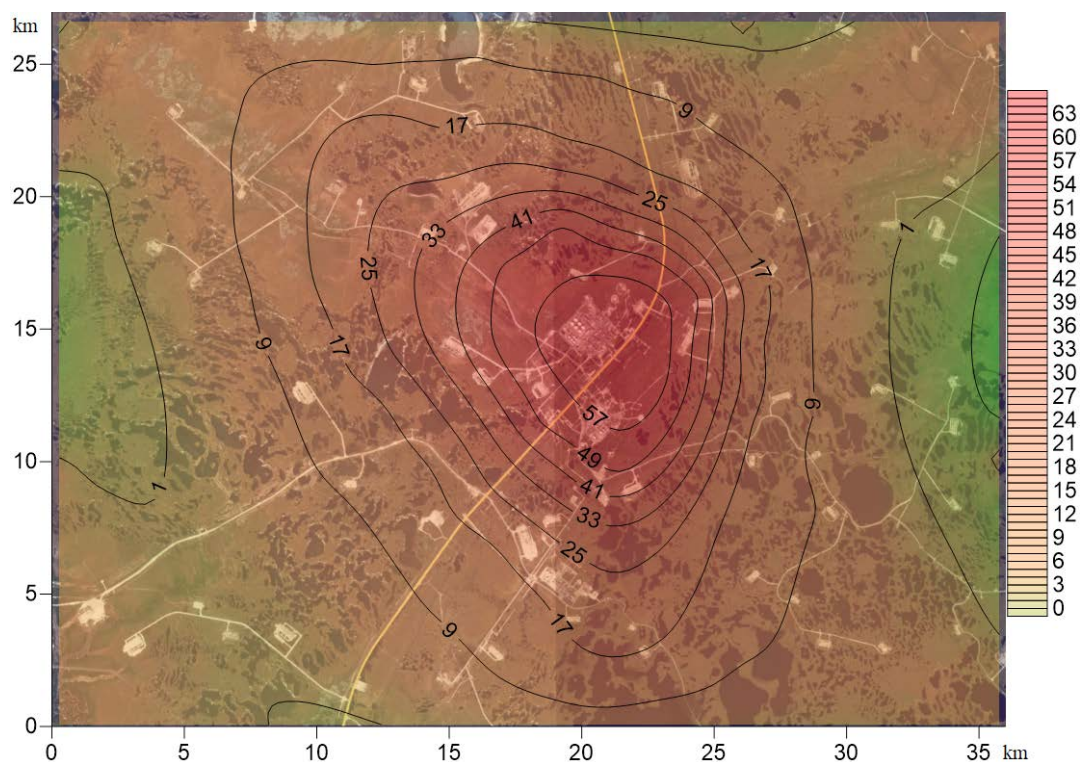


Рис. 1. картографическая модель рассеивания в приземной атмосфере угарного газа /
Fig. 1. Cartographic model of dispersion in the surface atmosphere of carbon monoxide

жащих месторождений, которые не учитывались при построении картографической модели. Следовательно реальная экологическая ситуация на рассматриваемой территории в разы хуже.

Однако колоссальное негативное воздействие на природную среду далеко не единственная причина наблюдающейся сегодня тенденции к уменьшению объемов сжигания ПНГ в факельных установках и поиску альтернативных способов утилизации ПНГ. По расчетам института энергетической стратегии России, сжигание 1 млрд куб. м попутного газа эквивалентно потере товарной продукции на сумму более 300 млн долларов [Леушева, Моренов, 2015]. Данный факт обуславливает актуальность поиска и реализации способов утилизации ПНГ с экономической выгодой для нефтедобывающих предприятий и оптимизацией экологической ситуации в регионах с развитой нефтедобывающей промышленностью.

Актуальность

На сегодняшний день существует несколько общепринятых методов утилизации ПНГ, основными из которых являются [Nannarone, Klein, 2019; Welch, 2014]:

- переработка ПНГ на газоперерабатывающих заводах (глубокая переработка и неглубокая переработка) с получением товарной продукции;
- генерация электроэнергии;
- сжигание на собственные нужды (как правило, с получением тепла);
- закачка обратно в пласт для интенсификации нефтеотдачи (система поддержания пластового давления);
- закачка в добывающие скважины – использование «газлифта».

Из анализа публикаций и фондовых документов нефтедобывающих предприятий следует, что наиболее эффективным с точки зрения эколого-экономического обоснования является переработка ПНГ на газоперерабатывающем заводе с получением товарной продукции [Турбаков, Кожевников, 2013].

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика существующих методов утилизации ПНГ в сравнении «капитальные затраты – стоимость товарной продукции».

Таблица 1 / Table 1

Сравнительная характеристика существующих методов утилизации ПНГ в сравнении «капитальные затраты – стоимость товарной продукции». / Comparative characteristics of existing APG utilization methods in comparison with capital expenditures – the cost of marketable products.

Показатель / Indicator	Сжигание / Burning	Обратная закачка в нефтяной пласт / Re-injection into the oil reservoir	Электрогенерация / Power generation	Неглубокая переработка / Shallow processing	Глубокая переработка / Deep processing
Капитальные затраты, долларов / м ³ / Capital expenditures, USD / m ³	0,01	0,07	0,08	0,23	0,29
Экономический эффект, долларов / м ³ / Economical effect, USD / m ³	0	0	0,07	0,17	0,31

Из таблицы 1 видно, что переработка ПНГ на газоперерабатывающем заводе с получением товарной продукции (глубокая и неглубокая переработка ПНГ) имеет незначительные капитальные затраты по сравнению с получаемым конечным доходом. Кроме этого, переработка *gui* на *ugr* оказывает минимальное негативное воздействие на компоненты природной среды из всех методов утилизации ПНГ [Стриженов, Корельский, 2019]. Однако в таблице 1 рассмотрены идеальные условия, при которых газоперерабатывающий завод (далее ГПЗ) обеспечивается *gui* в объеме, достаточном для работы *ugr* на проектной мощности. Кроме того при расчете экономического эффекта учитывалась только стоимость товарного продукта, но не учитывались транспортные издержки, наличие рынков сбыта и другие второстепенные факторы.

К сожалению, такие условия на территории России встречаются только на очень крупных нефтяных месторождениях с высоким дебитом ПНГ (более 1 млрд м³/год). Таких месторождений на территории России насчитывается не более 10. Таким образом, только при выполнении этих условий данный способ является экономически и технически обоснованным.

Цель

Основная же масса нефти на территории России добывается на средних и малых месторождениях, которые территориально могут располагаться на значительном удалении друг от друга и от населенных пунктов, что делает нецелесообразной транспортировку ПНГ. Кроме этого, такие месторождения имеют небольшой дебит ПНГ и не могут обеспечить постоянство работы ГПЗ на проектной мощности [Коробова, Ткачева, 2016].

Проведенные авторами расчеты показали, что для малых месторождений с относительно небольшими запасами нефти и, соответственно, небольшими объемами добываемого ПНГ (100-300 млн м³/год) данный метод невыгоден с экономической точки зрения, так как требует значительных капитальных затрат на транспортировку и хранение ПНГ, а также не обеспечивает постоянство работы ГПЗ на проектной мощности, что снижает конечную прибыль. Таким образом, срок окупаемости увеличивается до нескольких десятков лет [Кужаева, Берлинский, 2018].

Таким образом, проанализировав несколько десятков малых месторождений нефти на территории России, их разведанные запасы и транспортную доступность, было определено, что универсальным (с точки зрения мощностей по газу, учета развитости инфраструктуры и т.д.) и экономически оправданным вариантом утилизации является генерация электроэнергии на основе генераторов с газотурбинными установками [Дроздов, 2014]. Такие установки могут работать даже на топливе низкого качества, коим является некондиционный ПНГ, тем самым значительно снижая эксплуатационные расходы на предварительную подготовку ПНГ к сжиганию [Литвиненко и др., 2017]. При этом получаемая электроэнергия идет преимущественно на собственные нужды. Отходящие газы при этом могут использоваться в качестве теплового агента в системе центрального отопления производственных объектов месторождения, или могут быть пущены на каталитическую очистку и выброшены в атмосферу со значениями концентраций по основным загрязняющим веществам не превышающими установленные нормативы [Турбаков и др., 2012].

Методы исследования

Мониторинг экологической ситуации и транспортной доступности на рассматриваемых месторождениях проводился средствами лаборатории экологического мониторинга горного университета, а также на основании фондовых материалов геологической разведки рассматриваемых месторождений.

Оценка разведанных запасов нефти, дебит нефти и попутного газа, а также химический состав ПНГ осуществлялся на основании фондовых материалов.

Теплотворные свойства *gu* и возможность его использования для энергогенерации осуществлялись расчетным путем на основании состава *gu* [Seward et al., 2018].

Экспериментальные работы на данном этапе не проводились и будут являться следующим этапом проделанного исследования [Семячков и др., 2018; Wang, Liu, 2016].

Все расчеты проводились в соответствии с аттестованными в России методиками.

Как уже упоминалось выше, проведенные авторами расчеты показали, что на малых месторождениях нефти в силу проблем с инфраструктурой и небольшим дебитом ПНГ (100-300 млн м³/год) наиболее выгодным использованием ПНГ является электрогенерация. Полученная электроэнергия в основном обеспечивает собственные нужды месторождения. Будучи одним из крупнейших в мире поставщиков нефти и газа тарифы на электроэнергию в России достаточно низки и составляют около 0,05 USD за 1 кВт, однако основным преимуществом с экономической точки зрения является не экономия на платежах за электроэнергию, а полная ликвидация затрат на внешнюю инфраструктуру электроснабжения, которая в силу значительной удаленности месторождений требует значительных капитальных затрат [Semyachkov et al., 2018].

К основным преимуществам электрогенерации на месторождении можно отнести:

- выполнение условий лицензионных соглашений по утилизации ПНГ;
- значительное снижение затрат на энергоснабжение и инфраструктуру электроснабжения;
- уменьшение экологического ущерба, причиняемого компонентам природной среды;
- снижение платежей предприятия за загрязнение атмосферного воздуха;
- высокая доходность и быстрая окупаемость.

Проанализировав наиболее популярные методы электрогенерации, было принято решение, что оптимальным с точки зрения технико-экономического обоснования будет получение электроэнергии с использованием газотурбинной установки.

Газотурбинные установки (далее ГТУ) – это тепловые машины, в которых тепловая энергия газообразного рабочего тела преобразуется в механическую. Основными компонентами установки являются: компрессор, камера сгорания и газовая турбина. Для обеспечения работы и управления в установке присутствует комплекс объединенных между собой вспомогательных систем.

Вырабатываемая мощность одного устройства составляет от 20 кВт до сотен МВт. Это классические газотурбинные электростанции. Производство электроэнергии на электростанции осуществляется при помощи одной или нескольких ГТУ.

Газотурбинные установки состоят из двух основных частей, расположенных в одном корпусе – газогенератора и силовой турбины. В газогенераторе, включающем в себя камеру сгорания и турбокомпрессор, создается поток газа высокой температуры. При помощи теплообменника осуществляется утилизация выхлопных газов и одновременное производство тепла через водогрейный или паровой котел, поэтому при оптимальном режиме ГТУ производят электрическую и тепловую энергию.

По количеству вырабатываемой тепловой энергии ГТУ значительно превосходят газопоршневые устройства (далее ГПУ) [Ямашин, Ладанова, 2019].

На основании фондовых данных газодобывающих предприятий России было установлено, что средний расход электроэнергии составляет порядка 50 МВт на каждые 45 дней (1 смена работников – вахтовиков). Расчеты проводились исходя из дебита месторождения по ПНГ 100 млн м³ в год, а также при условии, что вся получаемая электроэнергия будет расходоваться на нужды месторождения, т.е. в экономическом обосновании учитывается только стоимость электроэнергии, которую перестанет потреблять месторождение при появлении собственного источника электрогенерации.

На российском рынке достаточно большой выбор газотурбинных электростанций, как отечественного, так и зарубежного производства. Исходя из энергоемкости месторождения, дебита и состава ПНГ, а также с учетом удаленности месторождения от развитых сетей инфраструктуры предпочтение в выборе электростанции было отдано отечественной мобильной газотурбинной электростанции (далее ГТЭС) «Урал 6000» мощностью 500 МВт/год, в состав которой входит 7 газовых турбин (5 основных и 2 резервные).

При выборе установки электрогенерации также был принят коэффициент запаса 20% на перспективу потенциального увеличения объема добычи нефти, а также на случай аварийных ситуаций и потребности дополнительных мощностей электроэнергии.

ГТЭС будет отпускать электроэнергию для потребления на месторождении напряжением 110 кВт, на собственные нужды напряжением 11 кВ и тепловую энергию в виде горячей воды. Высоковольтные линии с напряжением 110 кВт соединяют газотурбинную электростанцию с подстанциями на Ватлорском месторождении для использования на собственные нужды [Bian et al., 2011].

Полученные результаты и их обсуждение

Часовой расход попутного нефтяного газа при полной нагрузке ГТЭС «Урал 6000» составляет 12400 м³, а годовое – 109 млн м³. Данная электростанция полностью обеспечит потребность месторождения в электроэнергии и частично в тепловой энергии. А добываемого ПНГ на месторождении достаточно для работы электроустановки на мощности 92% от проектной, чего достаточно для нормальной работы месторождения. В качестве резервного топлива при необходимости может использоваться дизельное топливо.

К плюсам выбранной электростанции можно отнести:

- отсутствие необходимости строительства дополнительных зданий;
- минимальное количество обслуживающего персонала;
- высокую степень заводской готовности;
- работа как параллельно в сеть, так и автономно;
- короткий срок окупаемости ГТЭС – 3-5 лет;
- блочно-модульную конструкцию.

При этом для нормальной работы ГТЭС требуется предварительная подготовка ПНГ, которая заключается в понижении давления с 6 атм. до 4 атм. и очистке от капельной влаги с использованием аппарата Скруббер Вентури. Данная установка также входит в состав ГТЭС «Урал 6000». Поэтому ПНГ может напрямую подаваться на ГТЭС с ДНС.

Подготовка попутного нефтяного газа осуществляется в виде очистки. Очистка производится на входе в каждый компрессор в фильтре Скруббере Вентури.

Отходящие газы с ГТЭС поступают в систему очистки, где последовательно проходят через несколько конвективных зон: пароперегревательную зону, испарительную зону, экономайзер и газовый подогреватель конденсата. ГПК предназначен для снижения температуры уходящих газов до 45-38°C. Расчеты показывают, что эффективность очистки отходящих газов на данной установке составляет более 95%. Фактический выброс по основным загрязняющим веществам от трубы ГТЭС приведен в таблице 2.

На основании полученных в результате расчета значений валовых выбросов была построена картографическая модель рассеивания угарного газа в приземной атмосфере, представленная на рисунке 2. На изолиниях отображается коэффициент, рассчитываемый, как отношение текущей концентрации к нормативному показателю. Таким образом, данный коэффициент показывает, во сколько раз концентрация превышает относительно норматива.

На рисунке 2 видно, что концентрация угарного газа незначительно превышает норматив только в радиусе 1 км, что соответствует радиусу санитарно-защитной зоны.

Таблица 2 / Table 2

Фактический выброс загрязняющих веществ. / Actual emission of pollutants.

Название загрязняющего вещества / Pollutant name	Значение выброса, т/год / Emission value, t/year	
	Фактический выброс до внедрения мероприятия / Actual discharge before the implementation of the action	Фактический выброс после внедрения мероприятия / Actual discharge after the implementation of the action
Оксид азота / Nitrogen oxide	499,38	22,04
Диоксид азота / Nitrogen dioxide	549,76	33,03
Сажа / Soot	675,39	0,0
Оксид углерода / Carbon oxide	612,32	11,16
Диоксид серы / sulphur dioxide	511,67	0,0
Железо трихлорид (Железа хлорид) (в пересчете на железо) / Iron trichloride (Iron chloride)	402,77	0,0

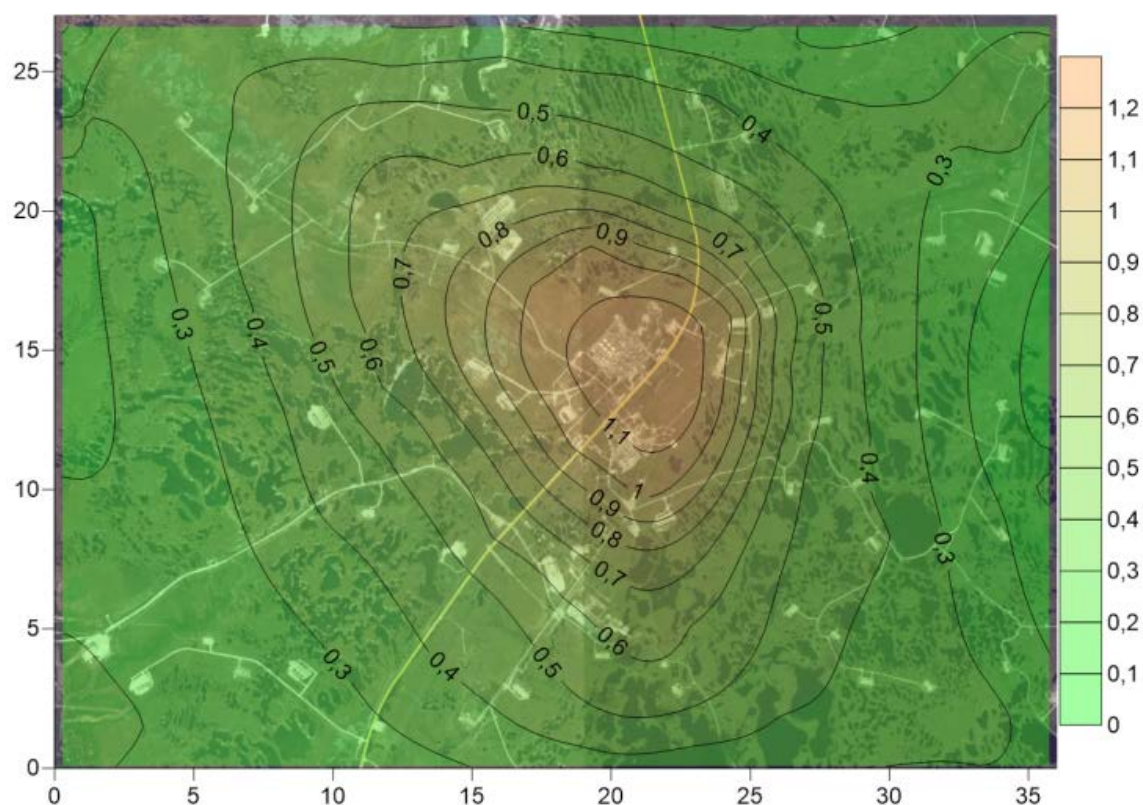


Рис. 2. Картографическая модель рассеивания угарного газа в приземной атмосфере / Fig. 2. Cartographic model of dispersal of carbon monoxide in the surface atmosphere

При реализации данного проекта факельная установка полностью выводится из эксплуатации, что позволяет достичь такого значительного снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Однако факельная установка должна оставаться в рабочем состоянии на случай аварийной остановки ГТЭС или кратковременного увеличения дебита ПНГ на месторождении.

Себестоимость операций по утилизации попутного нефтяного газа на газотурбинной электростанции определяется с одной стороны – капитальными затратами, а с другой – эксплуатационными расходами. В капитальные затраты входят стоимость самого оборудования и стоимость его доставки и затраты на монтаж (строительно-монтажные работы), а в эксплуатационные затраты – заработная плата и амортизационные отчисления [Rajović et al., 2016].

Окупаемость предложенного проекта будет складываться из экономии на электроэнергии и из снижения экологических платежей за загрязнение атмосферного воздуха продуктами сжигания ПНГ на факельной установке.

В таблице 3 приведены сводные данные по расчету эколого-экономической эффективности предлагаемого проекта.

Таким образом, исходя из расчетных данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод о том, что срок окупаемости предложенного проекта на малом нефтяном месторождении составит около 2,5 лет. При этом в данных расчетах не учитывалась экономия на отсутствии необходимости возведения внешней инфраструктуры электроснабжения, так как все рассматриваемые месторождения действующие и инфраструктура на них уже сформирована. При этом, если данный проект вводить на месторождении, на котором эксплуатация только начинается, то отсутствие

Таблица 3 / Table 3

**Сводные данные по произведенному экономическому обоснованию предложенного метода пылеподавления. /
Summary of the business case for the proposed dust suppression method.**

Капитальные затраты, \$ / Capital expenditures, \$	480 000,00
Эксплуатационные затраты, \$ / Operating costs, \$	52 000,00
Сокращение платы за негативное воздействие на ОС, тыс. руб./год / Reduction of fees for negative impact on fixed assets, thousand rubles/year	230 000,00
Экономия на электроэнергии / Energy Savings	15 500,00

необходимости возведения внешней инфраструктуры электроснабжения позволит сэкономить от 200 000,00 \$, что сокращает срок окупаемости вдвое.

Выводы

Утилизация ПНГ путем его сжигания в факельных установках на сегодняшний день является одной из основных экологических проблем нефтегазового комплекса в России и в мире. Ежегодно сотни миллионов тонн загрязняющих веществ попадает в атмосферный воздух в результате этого процесса. Многие из этих веществ являются парниковыми газами, оказывающими негативное воздействие на климат нашей планеты.

Кроме экологического ущерба при сжигании ПНГ оказывается колоссальный экономический ущерб странам с развитой добычей нефти. ПНГ – это потенциальное сырье, которое можно и нужно перерабатывать с целью получения материальной прибыли и снижения антропогенной нагрузки на компоненты природной среды. На сегодняшний день существует большое количество способов утилизации ПНГ, при этом в силу определенных факторов какие-то из них могут оказаться экономически нецелесообразными для конкретных стран и месторождений.

В рамках проделанной работы авторы провели поиск оптимального способа утилизации ПНГ на малых нефтяных месторождениях России (дебит ПНГ 100-300 млн м³/год) и его эколого-экономическое обоснование. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее экономически и экологически обоснованным способом утилизации ПНГ, является переработка ПНГ с получением товарной продукции, однако в силу множества факторов, таких как неразвитая инфраструктура, природно-климатические условия, низкие объемы добываемого ПНГ, данный метод экономически целесообразен только для крупных месторождений нефти (дебит ПНГ более 1 млрд м³/год), которых в России насчитывается не более 10.

2. Наиболее экономически целесообразным методом утилизации ПНГ на малых нефтяных месторождениях является электрогенерация, при этом получаемая электроэнергия расходуется исключительно на нужды месторождения, без полу-

чения дополнительной прибыли с продажи электроэнергии. Оптимальным с точки зрения технического оснащения является использование в качестве агрегата электрогенерации газотурбинных электростанций, так как они наиболее неприхотливы к качеству ПНГ, имеют блочно-модульную (передвижную) конструкцию, а также широко представлены на рынке.

3. Экологические расчеты показали, что при реализации предложенного метода утилизации ПНГ выбросы в атмосферу на месторождении снижаются с тысяч тонн в год до нескольких десятков тонн в год, что значительно улучшает состояние окружающей природной среды и снижает негативное воздействие на живые организмы вблизи месторождения.

4. Экономическое обоснование проекта показало, что при капитальных затратах чуть менее полумиллиона долларов и эксплуатационных затратах около 50 000,00 \$ в год срок окупаемости данного проекта составит около 2,5 лет для эксплуатируемого месторождения. Основными экономическими показателями являются экономия на экологических платежах за загрязнение атмосферного воздуха (230 000,00 \$ в год) и экономия на электроэнергии (около 15 000,00 \$ в год).

5. При этом если рассматривать внедрение данного метода на вновь создаваемом месторождении, то отсутствие необходимости возведения внешней инфраструктуры электроснабжения позволит сэкономить от 200 000,00 \$. В таком случае срок окупаемости проекта может составить немногим больше года.

Все материалы, представленные в статье, получены расчетным путем, а апробация полученных расчетным путем значений и экспериментальное подтверждение будет являться следующим этапом данной работы.

Литература

1. Баркан М. С., Корнев А. В. Перспективы использования попутного нефтяного газа в качестве энергетического продукта. // Международный журнал энергетической экономики и политики. – 2017. – №7 (2). – С. 374-383.
2. Волкодаева М. В., Киселева А. В. О разработке системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха. // Журнал Горного института. – 2017. – №227. – С. 589-596.
3. Дроздов А. Н. Утилизация попутного нефтяного газа с использованием существующей промысловой инфраструктуры. // Нефтяное хозяйство – Нефтяная промышленность. – 2014. – №4. – С. 74-77.
4. Коробова О. С., Ткачева А. С. Экологические аспекты цементного производства. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №7. – С. 42-47.
5. Кужаева А., Берлинский И. Влияние нефтяного загрязнения на окружающую среду. // Международная многопрофильная научная геоконференция геодезия и управление горной экологии, SGEM. – 2018. – 18 (5.1). – С. 313-320.
6. Кужаева А., Джевага Н. Особенности структурной организации нефти. // Журнал инженерных и прикладных наук. – 2017. – №12 (13). – С. 4157-4166.
7. Леушева Е. Л., Моренов В. А. Комбинированная система электроснабжения нефтяных месторождений с использованием нефтяного газа в качестве энергоносителя. // Нефтяное хозяйство – Нефтяная промышленность. – 2015. – №4. – С. 96-100.
8. Литвиненко В. С., Козлов А. В., Степанов В. А. Углеводородный потенциал Урало-Африканского трансконтинентального нефтегазоносного пояса. // Журнал разведки и добычи нефти. – 2017. – №7 (1). – С. 1-9.
9. Семячков А. И., Слаковская Ю. О., Почечун В. А. Методологические особенности оценки экономического ущерба от неблагоприятных экологических последствий в усло-

виях территорий с развитым горнопромышленным комплексом. // Экология и промышленность России. – 2018. – №22 (4). – С. 46-51.

10. Стриженов А.В., Корельский Д.С. Оценка и снижение выбросов метана при плановых и ремонтных отключениях газокomppressorных агрегатов. // Журнал экологической инженерии. – 2019. – №20 (1). – С. 46-51.

11. Турбаков М.С., Кожевников Е.В. Утилизация попутного нефтяного газа на небольших месторождениях. // Нефтяное хозяйство – Нефтяная промышленность. – 2013. – №8. – С. 118-120.

12. Турбаков М.С., Кожевников Е.В., Рябоконь Е.П., Чернышов С.Е. Основные направления утилизации попутного газа. // Нефтяное хозяйство – Нефтяная промышленность. – 2012. – №11. – С. 130-132.

13. Ямашкин С.А., Ладанова Е.О. Разработка эффективного метода классификации и картографирования геоэкологических процессов с использованием спутниковых снимков. // Постулат. – 2019. – №2 (40). – С. 27.

14. Bian H., Xu W., Li X., Qian Y. A novel process for natural gas liquids recovery from oil field associated gas with liquefied natural gas cryogenic energy utilization. // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2011. – No. 19 (3). – Pp. 452-461.

15. Nannarone A., Klein S.A. Start-Up Optimization of a CCGT Power Station Using Model-Based Gas Turbine Control. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2019. – No. 141 (4). – 2019. – article number 041018.

16. Rajović V., Kiss F., Maravić N., Bera O. Environmental flows and life cycle assessment of associated petroleum gas utilization via combined heat and power plants and heat boilers at oil fields. // Energy Conversion and Management. – 2016. – No. 118. – Pp. 96-104.

17. Semyachkov A.I., Slawikowskaja Y.O., Pochechun V.A. Methodological features of the assessment of economic damage from adverse environmental consequences in conditions of territories with a developed mining complex. // Ecology and Industry of Russia. – 2018. – No. 22 (4). – Pp. 46-51.

18. Seward A., Ashraf S., Reeves R., Bromley C. Improved environmental monitoring of surface geothermal features through comparisons of thermal infrared, satellite remote sensing and terrestrial calorimetry. // Geothermics. – 2018. – No. 73. – Pp. 60-73.

19. Vanadzina E., Gore O., Viljainen S., Tynkkynen V.P. Electricity production as an effective solution for associated petroleum gas utilization in the reformed Russian electricity market. // International Conference on the European Energy Market. EEM. – 2015. – Article number 7216626.

20. Wang Q., Liu S. Research and implementation of national environmental remote sensing monitoring system. Yaogan Xuebao. // Journal of Remote Sensing. – 2016. – No. 20 (5). – Pp. 1161-1169.

21. Welch M. Selection criteria for power generation systems to minimise environmental impact. // Society of Petroleum Engineers – SPE Heavy and Extra Heavy Oil Conference. – 2014. – Pp. 845-856.

References

1. Barkan M.S., Kornev A.V. Prospects for the use of associated gas of oil development as energy product. International Journal of Energy Economics and Policy. 2017. No. 7 (2). pp. 374-383. (In Russ.)

2. Volkodaeva M.V., Kiselev A.V. On the development of the system for environmental monitoring of atmospheric air quality. Journal of Mining Institute. 2017. No. 227. pp. 589-596. (In Russ.)

3. Drozdov A.N. Utilization of associated petroleum gas with using of existing field infrastructure. Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. 2014. No. 4. pp. 74-77. (In Russ.)

4. Korobova O.S., Tkacheva A.S. Environmental aspects of cement production. Mountain Information and Analytical Bulletin. 2016. No. 7. pp. 42-47. (In Russ.)
5. Kuzhaeva A., Berlinskii I. Effects of oil pollution on the environment. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2018. No. 18 (5.1). pp. 313-320. (In Russ.)
6. Kuzhaeva A., Dzhevaga N. Particulars of oil structural organization. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. No. 12 (13). pp. 4157-4166. (In Russ.)
7. Leusheva E.L., Morenov V.A. Combined oilfield power supplying system with petroleum gas utilization as an energy carrier. Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. 2015. No. 4. pp. 96-100. (In Russ.)
8. Litvinenko V.S., Kozlov A.V., Stepanov V.A. Hydrocarbon potential of the Ural – African transcontinental oil and gas belt. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2017. No. 7 (1). pp. 1-9. (In Russ.)
9. Semyachkov A.I., Slawikowskaja Y.O., Pochechun V.A. Methodological features of the assessment of economic damage from adverse environmental consequences in conditions of territories with a developed mining complex. Ecology and Industry of Russia. 2018. No. 22 (4). pp. 46-51. (In Russ.)
10. Strizhenok A.V., Korelskiy D.S. Estimation and Reduction of Methane Emissions at the Scheduled and Repair Outages of Gas-Compressor Units. Journal of Ecological Engineering. 2019. No. 20 (1). pp. 46-51. (In Russ.)
11. Turbakov M.S., Kozhevnikov E.V. Utilization of associated petroleum gas at small fields. Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. 2013. No. 8. pp. 118-120. (In Russ.)
12. Turbakov M.S., Kozhevnikov E.V., Ryabokon E.P., Chernyshov S.E. The main directions of the associated gas utilization. Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. 2012. No. 11. pp. 130-132. (In Russ.)
13. Yamashkin S.A., Ladanova E.O. Development of an effective method of classification and mapping of geoeological processes using satellite images. Postulate. 2019. No. 2 (40). pp. 27. (In Russ.)
14. Bian H., Xu W., Li X., Qian Y. A novel process for natural gas liquids recovery from oil field associated gas with liquefied natural gas cryogenic energy utilization. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2011. No. 19 (3). pp. 452-461.
15. Nannarone A., Klein S.A. Start-Up Optimization of a CCGT Power Station Using Model-Based Gas Turbine Control. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2019. No. 141 (4). Article number 041018.
16. Rajović V., Kiss F., Maravić N., Bera O. Environmental flows and life cycle assessment of associated petroleum gas utilization via combined heat and power plants and heat boilers at oil fields. Energy Conversion and Management. 2016. No. 118. pp. 96-104.
17. Semyachkov A.I., Slawikowskaja Y.O., Pochechun V.A. Methodological features of the assessment of economic damage from adverse environmental consequences in conditions of territories with a developed mining complex. Ecology and Industry of Russia. 2018. No. 22 (4). pp. 46-51.
18. Seward A., Ashraf S., Reeves R., Bromley C. Improved environmental monitoring of surface geothermal features through comparisons of thermal infrared, satellite remote sensing and terrestrial calorimetry. Geothermics. 2018. No. 73. pp. 60-73.
19. Vanadzina E., Gore O., Viljainen S., Tynkkynen, V.P. Electricity production as an effective solution for associated petroleum gas utilization in the reformed Russian electricity market. International Conference on the European Energy Market. EEM. 2015. Article number 7216626.
20. Wang Q., Liu S. Research and implementation of national environmental remote sensing monitoring system. Yaogan Xuebao. Journal of Remote Sensing. 2016. No. 20 (5). pp. 1161-1169.
21. Welch M. Selection criteria for power generation systems to minimise environmental impact. Society of Petroleum Engineers – SPE Heavy and Extra Heavy Oil Conference. 2014. pp. 845-856.

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА

УДК 504.55.054:622 (470.6)

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59070](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59070)

Оригинальная статья

Управление геомеханикой массива путем оптимизации технологии разработки

В. И. Голик, О. Г. Бурдзиева, Б. В. Дзеранов

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,
ул. Маркова, 93а, г. Владикавказ 362002, Россия, e-mail: v.i.golik@mail.ru;

Статья поступила: 12.02.2020, после рецензирования: 19.03.2020, принята к публикации: 21.03.2020

Резюме: Актуальность статьи объясняется необходимостью поиска новых ресурсов повышения эффективности использования недр, в том числе, за счет рационального использования геомеханических особенностей скальных массивов при техногенном воздействии на них и механизма взаимодействия пород, слагающих массивы скальных месторождений. **Объектом исследования** служат структурно напряженные скальные массивы Садонского рудного узла. **Целью исследований** является оценка перспектив технологий разработки месторождений при освоении запасов в условиях техногенной ослабленности массивов. **Методы** решения основной задачи исследования образуют собой комплекс, в том числе, систематизация связанных с управлением массивом сведений, разработка критериев эффективности добычи руд и формирование концепции ресурсосберегающей технологии разработки месторождений. **Результаты и обсуждение результатов.** Сформулирована концепция технологии разработки месторождений на основе методов управления состоянием массива путем назначения оптимального уровня напряжений, формируемых совокупностью сейсмотектонических воздействий и техногенной сейсмичности. Дана типизация методов расчета устойчивых пролетов выработок. Приведены примеры решения горнотехнических задач рекомендуемыми методами расчета. Предложена схема-алгоритм взаимодействия параметров управления массивом. Определено, что перспективы технологий разработки месторождений Садонской группы связаны с реализацией концепции управления массивами пород путем регулирования величины напряжений. Доказано, что учет геомеханических факторов позволяет на всех стадиях отработки месторождения корректировать параметры разработки с повышением качества добываемых руд и уменьшением опасности для работающих. В этих условиях удовлетворительные показатели могут быть обеспечены только на первой стадии разработки при выемке первичных камер. Отработка целиков во вторую стадию увеличивает напряжения до критического состояния, что сопровождается потерей запасов или снижением качества руд до убыточных пределов кондиций. Рекомендовано отработку новых запасов и доработку имеющихся запасов осуществлять по комбинированной схеме: ценные руды с закладкой технологических пустот твердеющими смесями, руды с меньшим содержанием металлов – выщелачиванием с использованием хвостов подземного выщелачивания для управления напряжениями, а выщелоченные руды выполняют искусственных целиков, перераспределяя техногенные и природные напряжения.

Ключевые слова: подземная разработка, массив пород, напряжения, выщелачивание металлов, управление состоянием массива.

Для цитирования: Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В., Дмитрак Ю. В. Управление геомеханикой массива путем оптимизации технологии разработки. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (1): 127-137. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59070.

DOI: [10.23671/VNC.2020.1.59070](https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59070)

Original paper

Management of massif geomechanics through optimization of development technologies

V. I. Golik, O. G. Burdzieva, B. V. Dzeranov

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

Received: 12.02.2020, revised: 19.03.2020, accepted: 21.03.2020

Abstract: The relevance of the article is explained by the need to search for new resources to increase the efficiency of subsoil use, including due to the rational use of geomechanical features of rock massifs with anthropogenic impact on them and the mechanism of interaction of rocks composing rock massifs. **The object** of study is the structurally stressed rock massifs of the Sadon ore cluster. The aim of the research is to assess the prospects of field development technologies during the development of reserves in conditions of technogenic weakening of arrays. **Methods** for solving the main research problem form a complex, including the systematization of information related to managing the array, the development of criteria for the efficiency of ore mining and the formation of the concept of resource-saving technology for developing deposits. **Results and discussion of results.** The concept of field development technology is formulated on the basis of methods for controlling the state of an array by assigning the optimal level of stresses generated by a combination of seismotectonic impacts and technogenic seismicity. Typification of methods for calculating stable spans of workings is given. Examples of solving mining problems with the recommended calculation methods are given. An algorithm-algorithm for the interaction of array control parameters is proposed. It was determined that the prospects for the development of deposits in the Sadon Group are related to the implementation of the concept of managing rock masses by regulating stresses. It is proved that taking geomechanical factors into account allows at all stages of field development to adjust development parameters with an increase in the quality of mined ores and a decrease in the hazard for workers. Under these conditions, satisfactory performance can only be achieved at the first stage of development when the primary chambers are removed. The development of pillars in the second stage increases stresses to a critical state, which is accompanied by a loss of reserves or a decrease in the quality of ores to unprofitable limits. It was recommended that the development of new reserves and the refinement of existing reserves be carried out according to a combined scheme: valuable ores with the laying of technological voids with hardening mixtures, ores with a lower metal content – leaching using underground leaching tails to control stresses, and leached ores perform artificial pillars, redistributing technogenic and natural stresses.

Keywords: Underground mining, rock mass, stress, metal leaching, mass state control.

For citation: Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V., Dmitrak Yu. V. Management of massif geomechanics through optimization of development technologies. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (1): 127-137. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59070.

Введение

Важным аспектом горного производства является оценка геомеханических особенностей скальных массивов при техногенном воздействии на них. Перспективы развития технологий разработки с учетом механизма взаимодействия пород, слагающих массивы скальных месторождений, представляют собой **актуальную** проблему современного горного производства.

Комплексное негативное воздействие горного производства на окружающую среду на всех этапах разработки месторождения усиливается вследствие изменения географии месторождений, сокращения государственной поддержки в условиях рынка и кризиса производства [Емельяненко, 2011; Мельков и др., 2010; Свалова и др., 2019].

В напряженных массивах гравитационные и тектонические силы зависят от петрографических и структурных неоднородностей, горизонтальные напряжения в массивах превышают вертикальные, вертикальные напряжения не всегда подчиняются геостатическому закону распределения, величина напряжений с глубиной, в общем, возрастает, но корреляции подлечит не всегда.

Наиболее перспективно направление оптимизации технологических процессов горного производства по фактору управления геомеханикой рудовмещающих массивов путем выщелачивания металлов из руд и утилизации отходов горного производства после извлечения из них полезных компонентов [Голик и др., 2015; Golik et al., 2015a; Golik, Lukyanov, 2013].

Направление включает в себя компоненты:

- минимизация количества и номенклатуры отходов добычи и переработки полезных ископаемых;
- глубокое извлечение металлов из хвостов добычи и переработки минерального сырья путем увеличения энерговооруженности процессов комбинированного химического обогащения и их механической активации.

Цель

Целью исследований является оценка перспектив технологий разработки месторождений Садонской группы при освоении активных запасов в условиях децентрации выработок и техногенной ослабленности массивов. Сверхзадачей исследования является разработка корректного механизма управления взаимодействием слагающих массивы пород путем регулирования величины напряжений в рудовмещающих массивах.

Методика

Цель достигается решением комплекса задач, в том числе, систематизация сведений о причинах потерь металлов, разработка критериев эффективности добычи руд и формирование концепции природоохранной и ресурсосберегающей технологии разработки месторождений на базе Садонского рудного пояса, а также разработка методов геофизического контроля горного производства с дифференциацией по видам технологических процессов [Дмитрак и др., 2006; Чотчаев и др., 2018; Шемпелев и др., 2017; Burdzieva et al., 2015].

Результаты и их обсуждение

Оптимизация технологии освоения скальных месторождений руд и установление закономерностей взаимодействия природных и технических систем на месторождениях Садонского рудного узла осуществляется по критерию полноты и безопасности использования недр с использованием физико-математической модели взаимодействия природных и технических систем.

Концепция природоохранной и ресурсосберегающей технологии разработки месторождений Садонского рудного пояса предусматривает управление состояни-

ем массива путем назначения оптимального уровня напряжений с не превышением критических значений, формируемых совокупностью сейсмотектонических воздействий и техногенной сейсмичности.

Оценка сейсмичности и напряженно-деформированного состояния массива осуществляются для конкретных геотехнических условий с привлечением методов численного моделирования системы целиков и очистных камер. Метод рассматривает континуум как совокупность дискретных элементов, границы которых определяются узловыми точками, что позволяет описывать реакцию континуума на внешнее воздействие движением узловых точек.

Проблема разрушения природных ландшафтов в зоне деятельности горного производства становится все более актуальной, особенно для горных ландшафтов Северного Кавказа с воронками провалов и отвалами отходов переработки руд на террасных участках и в долинах горных рек.

При разработке рабочей документации параметры управления нередко массивом завышают в сторону увеличения безопасности, что увеличивает потери в целиках и разубоживание руды породами. Это происходит еще и потому, что расчеты не учитывают влияния динамических напряжений техногенного характера.

Извлечение руды из недр происходит в условиях недостаточной изученности состояния массива, подверженного суммарному воздействию природных (тектоника, гравитация, магматизм, сейсмичность) и техногенных (горные выработки, технологические взрывы, вибрации) полей напряжений.

Увеличение глубины горных работ и объемов выемки минералов в сейсмически активных районах усиливают статическое и динамическое воздействие на геомеханические системы, что объясняет необходимость учета сейсмической составляющей, в том числе техногенного характера.

Сейсмичность разрабатываемого участка обусловлена уровнем геодинамической активности территории и литологическими и тектоническими условиями формирования массивов и происходящих в них процессов. Руды Садонских месторождений залегают в неоднородных скальных массивах, что позволяет выделить их в группу сложноструктурных. Особенностью месторождений, определяющей состояние их массивов, является применение систем разработки с открытым выработанным пространством.

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 характерны общие закономерности:

- нарушение природного равновесия с деконцентрацией выемочных работ;
- увеличение потерь и разубоживания руд при интенсификации работ;
- выборочная выемка разносортных руд при изменении кондиций на руду;
- активизация разрушения массива с увеличением глубины разработок.

Поля напряжений и деформаций в массивах пород являются результатом сложного взаимодействия полей, формирующихся под влиянием техногенных и природных факторов.

Результаты инструментальных исследований массивов сводятся к следующему:

- показатели технологии добычи руд зависят от величины напряжений;
- применение дискретных материалов не обеспечивает необходимого уровня управления напряжениями;

– эффективное управление напряжениями осуществляется технологиями с заполнением пустот монолитными твердеющими смесями.

Условие сохранения рудовмещающего массива и поверхности над ним:

$$H' > H_c,$$

где H' – фактическая глубина верхней границы пустоты от границы выветрелых пород; H_c – зона влияния пустот, м;

Это условие обеспечивается разделением месторождений рудными или искусственными целиками. Оптимальна модель, при которой массив разделяется на участки, где условие удовлетворяется.

Условие прочности массива на различных стадиях разработки описывается моделью:

$$\sigma_1 \pm k\sigma_{2,3} \leq \sigma_{сж} = \begin{cases} \sigma_{сж}^0 = \int_0^{Z_0^{max}} f(x)(dx_1, dx_2 \dots dx_n) \rightarrow \begin{cases} \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0^{max}} f(x)(dH_s) \\ \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0^{max}} f(x)(dH_s + dH_c) \end{cases} \\ \sigma_{сж}^{ост} \text{ при } H_c = H \rightarrow \sigma_{закл} = \int_0^B f(x)(dH) \end{cases}$$

где σ_1 – вертикальная составляющая главных напряжений; $\sigma_{2,3}$ – горизонтальная результирующая составляющая, МПа; k – коэффициент искажения напряжения структурно-тектоническими условиями; $\sigma_{сж}$ – напряжения в верхнем слое разупроченных отдельных массивов, МПа; $\sigma_{сж} \pm$ – напряжения в зоне влияния работ, МПа; $\sigma_{сж}^{ост}$ – 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; H – высота зоны обрушения, м; H_c – высота зоны влияния работ, м; H_s – высота закладочного массива, м.

При моделировании процессов разрушения скальных массивов их состояние описывается условием:

$$\sigma \cdot K_z = \int_{l_{min}}^{l_{max}} f(x)(dx_1, dx_2, \dots, dx_n) \rightarrow P, R = \int_{l_{min}}^{l_{max}} f \cdot x(dh_z + dh_n)$$

где σ – напряжения в зоне влияния выработок, МПа; K_z – коэффициент корректировки напряжений; l_{max}, l_{min} – пролеты обнажения пород, м; $x_1 \dots x_n$ – технологические, физико-механические и иные характеристики; P – потери руд, доли ед.; R – разубоживание руд породами, доли ед.; h_z – высота закладочного массива, м; h_n – высота влияния горных выработок, м.

При разработке ценных руд размеры целиков минимизируют, запас прочности увеличивают креплением и подпором закладочным материалом.

Для эффективности разработки важно, чтобы кровля выработок сохраняла плоскую форму, т.е. растягивающие и сжимающие напряжения не были критическими. Структурные блоки смещаются в выработанное пространство, а кровля принимает форму свода, если не принять мер управляющего воздействия (табл. 1).

Сохранность земной поверхности определяется высотой свода 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.

Условие сохранности земной поверхности по ВНИИ:

$$H' > H_p = \kappa_1 \ell_{э\kappa\text{в}},$$

Таблица 1 / Table 1

Методы расчета устойчивых пролетов обнажений кровли. /
Methods for calculating stable spans of roof exposures

Характеристики массива / Massif specifications		Методы / Methods			Основные показатели / Basic indicators
		Механические / Mechanical	Инженерные / Engineering		
			несущий элемент / carrier element	гипотеза горного давления / rock pressure hypothesis	
Квази-сплошной с гравитационным полем / Quasi-continuous with a gravitational field	Изотропный / Isotropic	Механика сплошной среды; вероятно-статистические методы / Continuum mechanics; probabilistic and statistical methods	Несущая способность материала кровли / Bearing capacity of roofing material	Гипотезы сводов: давления и обрушения / Hypotheses of arches: pressures and collapses	Механо-физические свойства пород, углы анизотропии структурноеослабление для анизотропных сред, мощность слоя, балки, плиты / Mechanical and physical properties of rocks, anisotropy angles, structural attenuation for anisotropic media, layer thickness, beams, plates
	Анизотропный / Anisotropic		Плита или балка в кровле / Plate or beam in the roof		
Квази-сплошной, гравитационно-тектоническим полем / Quasi-continuous with a gravitational-tectonic field	Изотропный / Isotropic		Несущая способность материала, нарушенного трещинами / Bearing capacity of a material broken by cracks		
	Анизотропный / Anisotropic		Плита или балка с трещиной / Plate or beam with crack		
			Столбы с трещиной / Pillars with a crack		
Дискретный с гравитационно-тектоническим полем / Discrete with a gravitational tectonic field	Изотропный или анизотропный / Isotropic or anisotropic	Механика дискретной среды; вероятностно-статистические методы / Mechanics of a discrete medium; probabilistic-statistical methods	Плита или балка / Plate or beam	Зоны обрушений, свободные консоли / Collapse zones, free consoles	Структурное ослабление, размеры блоков, прочность пород и др. / Structural weakening, block sizes, rock strength, etc.
			Система столбов для ромбоидов / Pillar system for rhomboids		
			Трехшарнирная арка / Three-hinged arch	Своды равновесия / Vaults of equilibrium	

где H – глубина верхней границы выработанного пространства от выветренных пород и рыхлых отложений, м; H_p – расчетная глубина выработанного пространства от выветренных пород м; κ_1 – коэффициент, учитывающий свойства горных пород в зависимости от свойств покрывающих пород.

Метод поясняется примерами:

Пример 1. Рудное тело мощностью 6 м обрабатывается камерной системой разработки с закладкой пустот твердеющей месью. Массив находится под защитой заклинившихся блоков нижнего слоя пород.

Нормативная прочность смеси находится по прямой 1. При максимальной высоте камеры прочность закладки должна быть 1,2 МПа для интервалов по глубине 48-60 м; 0,7-1,0 МПа – для интервалов 35-48 м и 0,4-0,7 МПа – для интервалов 23-35 м. Интервал 0-23 м может быть заложен закладкой любой прочности.

Если заклинивания пород не происходит, напряжения в массиве закладки создаются массой пород внутри свода естественного равновесия и закладки. Нормативная прочность находится по прямой 3. При высоте камеры 60 м, интервал глубин 20-60 м должен иметь прочность от 1,0 до 3,0 МПа соответственно. Малопрочную закладку можно применять для погашения интервала 0-20 м.

Пример 2. В случае заклинивания пород толщина слоя находится пересечением значений прочности с линией 1 и проекцией на шкалу справа. При отсутствии трехшарнирной арки толщина слоя находится пересечением с линией 3 и проекцией на ту же шкалу.

Минимальная прочность оценена, по данным практики, величиной 0,2 МПа, максимальное значение при высоте этажа 60 м составляет 1,2 МПа.

Перспективы освоения месторождений предусматривают создание единого проекта добычи запасов открытыми, подземными и специальными способами до-

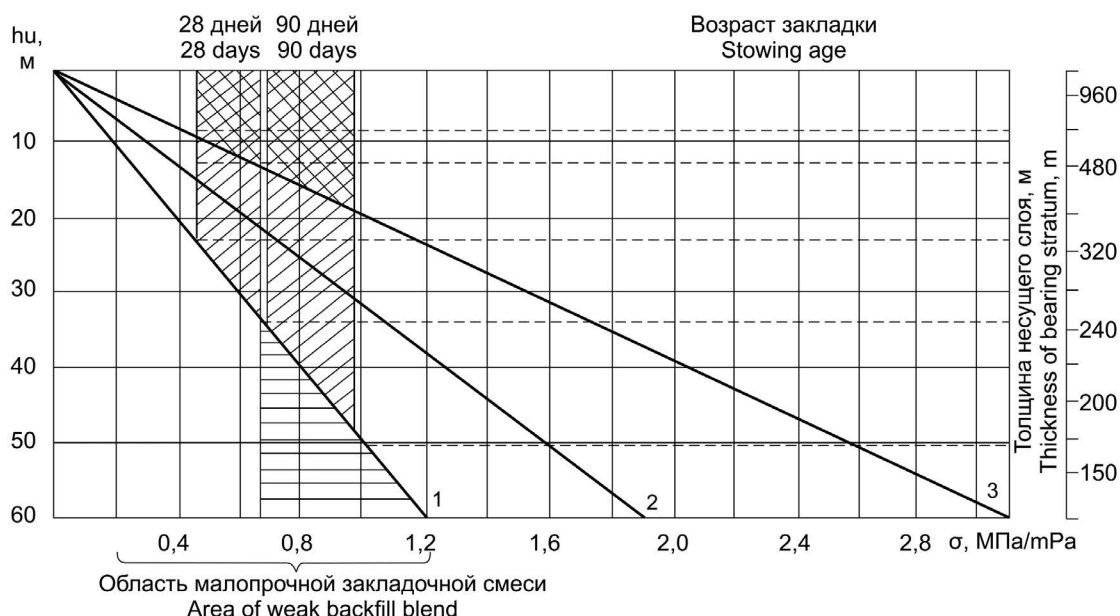


Рис. 1. Номограмма выбора прочности твердеющих закладочных смесей: 1, 2, 3 – соответственно, напряжения от собственной массы, от пригрузки пород и результирующие (заштрихована область разнопрочной закладки). /

Fig. 1. Nomogram of the strength choice of hardening filling mixtures: 1, 2, 3 – respectively, stresses from own weight, from rock loading and resulting (the area of multi-strength stowing is shaded).

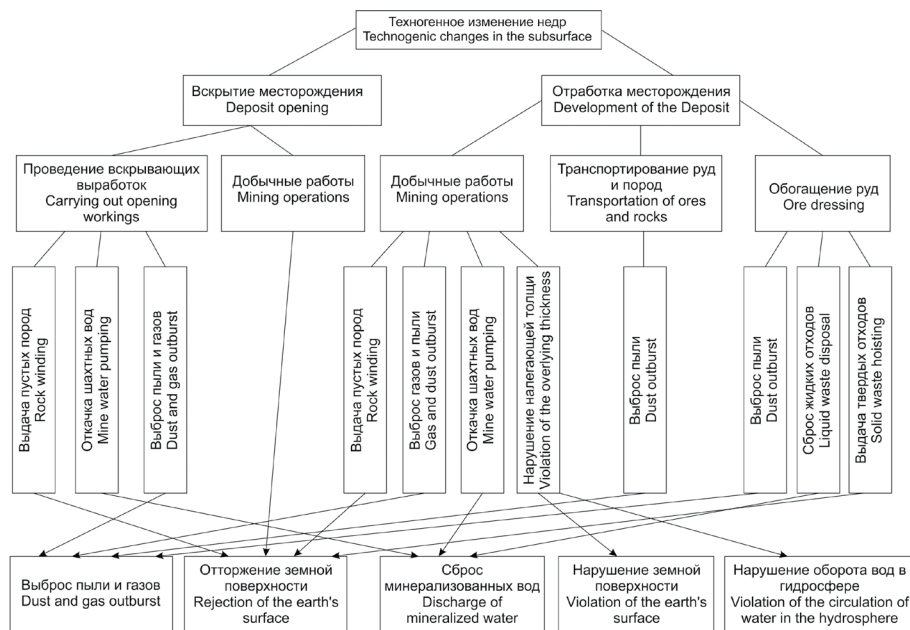


Рис. 2. Факторы управления развитием горных работ. /

Fig. 2. Factors of mining development management.

бычи, взаимоувязанными и оптимизированными по эколого-экономическим критериям (рис. 2).

Целью проекта становится не эффективное извлечение запасов месторождения одним из традиционных способов, а создание благоприятных условий для применения и альтернативных технологий, чтобы совокупный доход от освоения месторождения был максимальным [Burdzieva et al., 2015; Golik et al., 2015b].

Профилактика разрушающих напряжений и сопровождающих их деформаций обеспечивается технологически посредством ограничения концентрации напря-

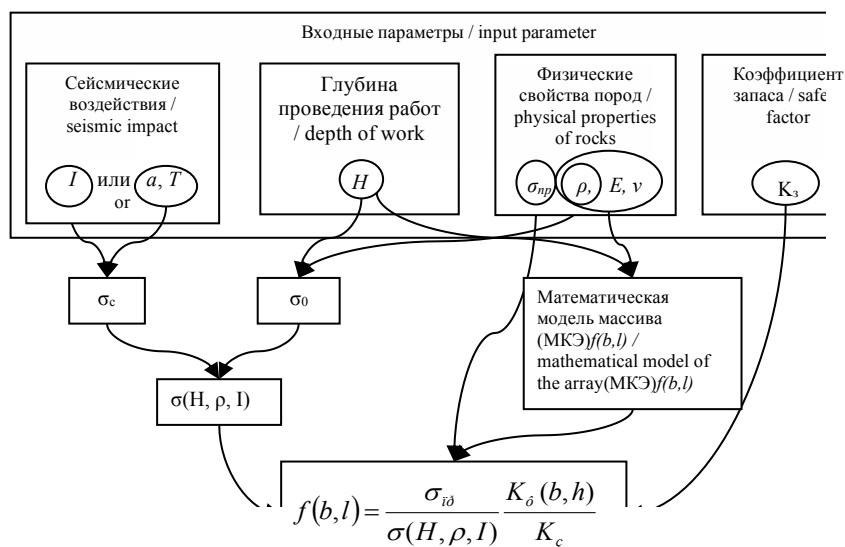


Рис. 3. Геомеханическая модель управления массивом. /

Fig. 3. Geomechanical mass control model.

жений: опережающей отработкой, исключением целиков, проходкой выработок и взрывами и др. технологическими мерами.

Взаимодействие параметров управления массивом описывается схемой (рис. 3):

Решение основных задач оптимизации процессов разработки сопряжено с исследованиями соседствующих процессов, в частности, при обеспечении сырья для приготовления закладочных смесей [Дмитрак, 2000; Дмитрак, Вержанский, 2000; Дмитрак и др., 2007].

Результаты исследования согласуются с результатами, полученными в аналогичных условиях российскими и зарубежными исследователями [Протосеня, Куранов, 2015; Ben-Awuah et al., 2016; Bonsu et al., 2017; Doifode, Matani, 2015; Woodward, Wesseloo, 2015; Jarvie-Eggart, 2015].

Заключение

Перспективы технологий разработки месторождений Садонской группы связаны с разработкой корректного механизма управления взаимодействием слагающих массивы пород путем регулирования величины напряжений в рудовмещающих массивах.

Исследованиями установлено, что массивы Садонских месторождений характеризуются крайне непостоянным размещением запасов в пределах рудных полей и склонностью вмещающих пород перераспределять напряжения, в том числе, в геодинамическом режиме.

При разработке сложноструктурных месторождений величина и знак напряжений во времени и пространстве может быть прогнозирована с достаточной для оперативного управления детализацией.

Учет геомеханических факторов при отработке таких участков позволяет корректировать параметры разработки с повышением качества добываемых руд и уменьшением опасности для работающих.

Литература

1. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Страданченко С.Г., Хашева З.М. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. №7. – С. 6-14.
2. 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.
3. Дмитрак Ю.В., Вержанский А.П. Тенденции применения оборудования для тонкого измельчения горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №6. – С. 184-188.
4. Дмитрак Ю.В., Логачева В.М., Подколзин А.А. Геофизическое прогнозирование нарушений и обводненности массива горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №11. – С. 35-36.
5. 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.
6. 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
7. Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Кануков А.С., Заалишвили В.Б. Оценка сейсмической опасности урбанизированной территории на основе современных методов сейсми-

ческого микрорайонирования (на примере г. Владикавказа). // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки Сборник работ молодых ученых. – Владикавказ. – 2010. – С. 348-351.

8. Протосеня А. Г., Куранов А. Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения. // Горный журнал. – 2015. – №1. – С. 67-71.

9. Свалова В. Б., Заалишвили В. Б., Ганапати Г. П., Николаев А. В., Мельков Д. А. Оползневый риск в горных районах. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – №2. – С. 109-126.

10. 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.

11. Шемпелев А. Г., Кухмазов С. У., Компаниец М. А., Харебов К. С., Чотчаев Х. О., Шамановская С. П. Строение земной коры по геофизическим данным вдоль чегемского профиля (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №7. – С. 116-120.

12. 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.

13. Bonsu J., van Dyk W, Franzidis J.-P., Petersen F., Isafiade A. A systemic study of mining accident causality: an analysis of 91 mining accidents from a platinum mine in South Africa. // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2017. – Vol. 117. No. 1. – Pp. 59-66.

14. Burdzieva O., Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Modelling of rock massifs tension at underground ore mining. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – T. 7. No. 8. – Pp. 540-543.

15. Doifode S. K., Matani A. G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. // International Journal of Chemical and Physical Sciences. – 2015. – Vol. 4. Special Issue. NCSC. – Pp. 536-540.

16. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015a. – T. 7. No. 4. – Pp. 321-324.

17. 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. – 2015b. – T. 7. No. 4. – Pp. 325-329.

18. Golik V. I., Lukyanov V. G. Optimization of filling mixture strength considering rock intensity // Голик В. И., Полухин О. Н. Природоохранные геотехнологии в горном деле. – Белгород. – 2013. – 195 с.

19. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting. // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2015. – Vol. 115. No 11. – Pp. 1044-1056.

20. Jarvie-Eggart M. E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. – Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. – 804 p.

References

1. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Stradanchenko S. G., Khasheva Z. M. Principles and cost-effectiveness of combining ore mining technologies. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering. 2015. Vol. 326. No. 7. pp. 6-14. (In Russ.)

2. 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.)

3. 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.)

4. 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.)
5. 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.)
6. M. V. Rylnikova, E. A. Gorbatova, E. A. Emelianenko Research of technological properties of technogenic objects of copper-pyrite deposits. *Mountain Information and Analytical Bulletin*. 2011. No. 6. pp. 148-156 (In Russ.)
7. Melkov D. A., Dzeranov B. V., Kanukov A. S., Zaalishvili V. B. Assessment of the seismic hazard of an urbanized territory based on the modern methods of seismic microzonation (case study: the city of Vladikavkaz). In: *Proceedings «Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem nauki»*. Vladikavkaz. 2010. pp. 348-351. (In Russ.)
8. Protosenya A. G., Kuranov A. D. The methodology for predicting the stress-strain state of a rock massif during the combined development of the Koashvinsk field. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 1. pp. 67-71. (In Russ.)
9. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapati G. P., Nikolaev A. V., Melkov D. A. Landslide risk in mountainous areas. *Geology and geophysics of Russian South*. 2019. No. 2. pp. 109-126. (In Russ.)
10. 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.)
11. Shempelev A. G., Kukhmazov S. U., Kompaniets M. A., Kharebov K. S., Chotchaev Kh. O., Shamanovskaya S. P. The structure of the earth's crust according to geophysical data along the Chegem profile (North Caucasus). *Geology and geophysics of Russian South*. 2017. No. 7. pp. 116-120. (In Russ.)
12. 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.
13. Bonsu J., van Dyk W., Franzidis J.-P., Petersen F., Isafiade A. A systemic study of mining accident causality: an analysis of 91 mining accidents from a platinum mine in South Africa. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017. Vol. 117. No. 1. pp. 59-66.
14. 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.
15. Doifode S. K., Matani A. G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. – 2015. – Vol. 4. Special Issue. NCSC. – Pp. 536-540.
16. 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.
17. 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*. 2015b. Vol. 7. No. 4. pp. 325-329.
18. Golik V. I., Lukyanov V. G. Optimization of filling mixture strength considering rock intensity: In: *Environmental geotechnologies in mining*. – Belgorod. 2013. 195 p. (In Russ.)
19. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015. Vol. 115. No 11. pp. 1044-1056.
- Jarvie-Eggart M. E. *Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World*. Englewood, Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. – 804 p.

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. Резюме 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.

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

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

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

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

Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт 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 (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, const , $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and υ , 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
(№ 1. 2020 г. Том 10)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать __. __. 2020 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода __. __. 2020 г.

Усл. печ. лист 16,6. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 46.

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

